

07

Высоковольтные (1600 V) размыкатели тока с субнаносекундным (150 ps) быстродействием на основе 4H-SiC

© П.А. Иванов, О.И. Коньков, Т.П. Самсонова, А.С. Потапов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 сентября 2017 г.

Изготовленные на основе эпитаксиальных 4H-SiC $p^{++}-p^+-p-n_o-n^+$ -структур высоковольтные (1600 V) диоды испытаны в качестве быстродействующих размыкателей тока в составе специальной импульсной схемы. Измеренное время обрыва тока составляет около 150 ps. Такое время является рекордно коротким для высоковольтных (свыше 1000 V) карбидкремниевых диодных размыкателей. Впервые экспериментально оценена величина насыщенной скорости дрейфа дырок в 4H-SiC p -типа: $v_{s,p} = 3 \cdot 10^6$ cm/s.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.03.45572.17025

Импульсная электроника в современном мире обладает большим научно-техническим потенциалом. Мощные импульсные устройства необходимы в самых разнообразных областях, таких как сверхширокополосная радиолокация и связь, электромагнитное противодействие, ускорение заряженных частиц, томография, очистка жидких и газообразных сред, питание импульсных лазеров и др. Успешное развитие современных импульсных устройств и систем во многом обусловлено созданием эффективных генераторов коротких импульсов на кремниевой элементной базе [1–3].

В последние годы отечественными исследователями были начаты разработки импульсных диодов на основе карбида кремния политипа $4H$ ($4H$ -SiC) [4–9]. $4H$ -SiC — это широкозонный полупроводниковый материал, который намного превосходит кремний по электронным и тепловым свойствам. Оценки показывают, что применение $4H$ -SiC может существенно улучшить основные характеристики генераторов: динамические параметры и тактовую частоту импульсов, удельную коммутируемую мощность. Кроме того, применение $4H$ -SiC позволит радикально уменьшить габариты и массу импульсных устройств и повысить их надежность.

В настоящей работе продемонстрированы высоковольтные (1600 V) диодные размыкатели тока с субнаносекундным (150 ps) быстродействием на основе $4H$ -SiC и приведено краткое обсуждение их характеристик.

Диоды изготавливались на основе пластины $4H$ -SiC n -типа с выращенной на ней эпитаксиальной $p^{++}-p^+-p-n_0-n^+$ -структурой (пластина была приобретена в компании Cree, Inc (США) за счет средств гранта Российского научного фонда). Слои p^{++} и p^+ имеют толщину $0.5\ \mu\text{m}$ и концентрацию акцепторов $2 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ соответственно, p -слой обладает толщиной $6\ \mu\text{m}$ и концентрацией акцепторов $5 \cdot 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$, n_0 -слой имеет толщину $20\ \mu\text{m}$ и концентрацию доноров $5 \cdot 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$, а n^+ -слой — толщину $5\ \mu\text{m}$ и концентрацию доноров $1 \cdot 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$.

Технология изготовления диодных чипов включала стандартные для постростовой технологии $4H$ -SiC-приборов процессы: оптическую фотолитографию, напыление омических контактов к p^{++} -слою (Al/Ti) и к n^+ -подложке (Ni), вжигание контактов в вакууме при температуре 950°C , травление меза-структур в плазме SF_6 на глубину $15\ \mu\text{m}$, резку пластины на отдельные чипы размером $1.5 \times 1.5\ \text{mm}$. Диаметр диодов составляет $0.8\ \text{mm}$.

Для импульсных испытаний диодов была создана специальная схема (рис. 1). В данной схеме накачка диода осуществляется с помощью импульсного источника тока, который состоит из источника положительного (постоянного) напряжения (V_1), накопительного конденсатора (C_1), зарядных резисторов (R_1 и R_2) и быстродействующего кремниевого n -канального МОП-транзистора¹ (T). Испытываемый диод (DUT)

¹ МОП — металл–оксид–полупроводник.

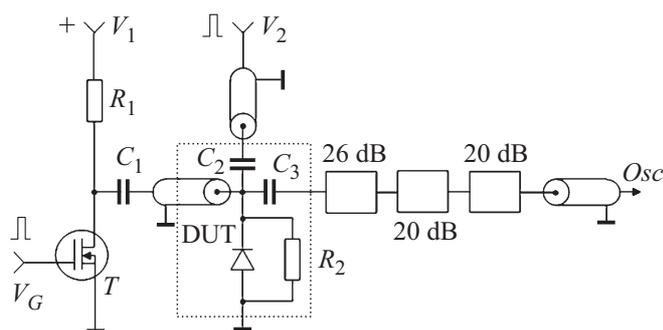


Рис. 1. Схема импульсных испытаний диодов. Пунктирной линией обведены элементы схемы, включенные в микрополосковую линию передачи.

включен в цепь разряда накопительного конденсатора. В исходном состоянии конденсатор C_1 заряжен до напряжения источника V_1 . При включении транзистора положительным импульсом затвора (V_G) через диод протекает импульс прямого тока, амплитуда и длительность которого задаются напряжением V_1 , временем включения транзистора T и временем разряда конденсатора C_1 через транзистор, коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50Ω и прямосмещенный диод. В экспериментах амплитуда импульсов прямого тока составляла до 10 A , а их длительность варьировалась в пределах $10\text{--}20 \text{ ns}$. Выкачка плазмы импульсом обратного тока осуществлялась с помощью импульсного генератора V_2 , в качестве которого был использован стандартный генератор фирмы „Фидтехника“, выдающий на нагрузку 50Ω положительные импульсы с амплитудой до 5 kV , длительностью около 4 ns и фронтом нарастания около 2 ns . Входной импульс обратного напряжения от генератора подается на диод в момент окончания импульса накачки через длинную линию с волновым сопротивлением 50Ω и развязывающий конденсатор C_2 . Регистрирующая цепь включает развязывающий конденсатор C_3 , высокочастотные аттенюаторы фирмы „Barth Electronics“ и цифровой осциллограф Tektronix DPO 70404C. Входное сопротивление аттенюаторов выполняет роль нагрузки (50Ω), подключенной параллельно с диодом.

На рис. 2 показаны осциллограммы выходных импульсов. Кривая I записана при отключенном диоде, т.е. эта кривая повторяет форму

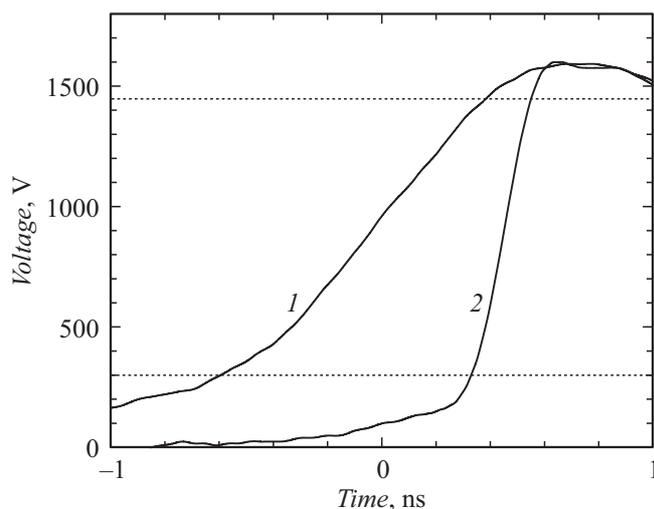


Рис. 2. Оциллограммы выходных импульсов: 1 — диод отключен, 2 — диод подключен.

входного импульса (амплитуда 1600 V и фронт нарастания около 2 ns). Кривая 2 записана при подключенном диоде. При оптимальных параметрах накачки диод выполняет функцию обострителя переднего фронта входного импульса: до обрыва тока длинная линия зашунтирована на конце малым сопротивлением диода, а сразу после восстановления блокирующей способности диода генератор начинает работать на согласованную нагрузку 50 Ω .

На оциллограмме выходного импульса (кривая 2 на рис. 2) есть участок относительно медленного роста напряжения — так называемый „пьедестал“, величина которого достигает 200 V. Сразу за пьедесталом выходное напряжение резко поднимается до 1600 V. Длительность фронта нарастания быстрого участка (размах 1150 V) составляет 220 ps. Коэффициент обострения входного импульса составляет при этом около 10. Очевидно, что это регистрируемое время обрыва определяется помимо быстродействия диода также и полосой пропускания элементов регистрирующей цепи, включая микрополосковую линию и цифровой осциллограф (20 GHz-аттенюаторы искажений не вносят). Измеренное

нами время нарастания переходной характеристики микрополосковой линии равно 120 ps. Время нарастания переходной характеристики осциллографа с полосой пропускания 4 GHz составляет 90 ps. С учетом этого рассчитанное время обрыва диодом тока равно 150 ps. Насколько нам известно, такое время является рекордно коротким для высоковольтных (свыше 1000 V) карбидкремниевых размыкателей.

Наблюдаемый на осциллограмме выходного импульса пьедестал обусловлен падением напряжения на p -области диода при протекании обратного тока. К моменту начала обрыва тока сопротивление p -области становится максимальным вследствие двух причин: 1) p -область освобождается от инжектированных носителей; 2) скорость дрейфа равновесных дырок в этой области приближается к насыщенной. В этом случае насыщенная скорость дрейфа дырок v_{sp} может быть рассчитана по формуле

$$v_{sp} = \frac{I}{0.9qpS}, \quad (1)$$

где I — обрываемый ток, q — элементарный заряд, p — концентрация равновесных дырок в p -области, S — площадь диода. При $I = 32$ А и $p = 1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (концентрация акцепторов $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) рассчитанная по формуле (1) насыщенная скорость дрейфа дырок составляет $v_{sp} = 3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$. Отметим, что определенная таким образом насыщенная скорость дрейфа дырок в 5 раз меньше полученной нами ранее насыщенной скорости дрейфа электронов в 4H-SiC [10].

В заключение можно отметить, что изготовленные карбидкремниевые диодные размыкатели приблизительно на порядок превосходят кремниевые дрейфовые диоды с резким восстановлением по времени обрыва тока (при сопоставимой блокирующей способности).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00094).

Список литературы

- [1] Грехов И.В., Месяц Г.А. // УФН. 2005. Т. 175. № 7. С. 735–744.
- [2] Брылевский В.И., Смирнова И.А., Родин П.Б., Грехов И.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 8. С. 80–87.

- [3] Брылевский В.И., Рожков А.В., Смирнова И.А., Родин П.Б., Грехов И.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 7. С. 1–7.
- [4] Грехов И.В., Иванов П.А., Константинов А.О., Самсонова Т.П. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 13. С. 24–29.
- [5] Grekhov I.V., Ivanov P.A., Khristyuk D.V., Konstantinov A.O., Korotkov S.V., Samsonova T.P. // Solid State Electron. 2003. V. 47. N 10. P. 1769–1774.
- [6] Грехов И.В., Кюрегян А.С., Мнацаканов Т.Т., Юрков С.Н. // ФТП. 2003. Т. 37. В. 9. С. 1148–1151.
- [7] Иванов П.А., Коньков О.И., Самсонова Т.П., Потанов А.С., Грехов И.В. // ФТП. 2015. Т. 49. В. 1. С. 1558–1562.
- [8] Афанасьев А.В., Иванов Б.В., Ильин В.А., Кардо-Сысоев А.Ф., Лучинин В.В., Серков Ф.Б. // Сб. трудов Всерос. конф. „Микроэлектроника СВЧ“. СПб.: СПбГЭТУ, 2012. С. 260–262.
- [9] Иванов М.С., Родин П.Б., Иванов П.А., Грехов И.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 1. С. 87–94.
- [10] Ivanov P.A., Potanov A.S., Samsonova T.P., Grekhov I.V. // Solid State Electron. 2016. V. 123. P. 15–18.