

Характеристики выпрямительных диодов Шоттки на основе карбида кремния при повышенных температурах

© А.М. Стрельчук¹, А.А. Лебедев¹, П.В. Булат²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, 190005 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: anatoly.strelchuk@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 23 июля 2020 г.

В окончательной редакции 27 июля 2020 г.

Принята к публикации 27 июля 2020 г.

Исследованы прямые и обратные вольт-амперные характеристики коммерческих выпрямительных диодов на основе барьера Шоттки к 4H-SiC в диапазоне температур 20–370°C; максимальный ток составлял 10–20 мА, максимальное напряжение 10–100 В. Установлено, что диоды можно считать близкими к идеальным с высотой барьера Шоттки ~ 1.5 эВ, при этом прямой ток во всем диапазоне температур, а обратный ток при высоких температурах в значительной степени обусловлены термоэлектронной эмиссией. Верхняя граница диапазона рабочих температур выпрямительных диодов Шоттки на основе 4H-SiC при исследуемых токах и напряжениях примерно соответствует фундаментальной границе, определяемой высотой барьера, и в представленном эксперименте достигает 370°C.

Ключевые слова: карбид кремния, выпрямительный диод, барьер Шоттки, высокая температура.

DOI: 10.21883/FTP.2020.12.50238.9494

1. Введение

Карбид кремния характеризуется значительно большей шириной запрещенной зоны E_g (~ 3 эВ для гексагональных политипов SiC) по сравнению с наиболее широко используемыми полупроводниковыми материалами Si, GaAs, GaP (E_g в диапазоне 1–2.4 эВ). Вследствие этого уже в ранних публикациях верхняя граница диапазона рабочих температур выпрямительных диодов на основе p – n -перехода в SiC ожидалась при значительно более высоких температурах, чем при использовании упомянутых материалов [1]. Стандартный диапазон температур при тестировании корпусированных и некорпусированных p – n -структур на основе SiC в атмосферных условиях лежит в пределах от 20 до 300–500°C, и высокотемпературная граница обычно определяется не полупроводником, а характеристиками корпуса или металла на поверхности SiC. В условиях вакуума ($\sim 10^{-5}$ мм рт.ст.) нами было показано сохранение выпрямляющей способности диодов, представляющих собой p – n -структуры на основе 6H-SiC, вплоть до температуры 800°C, при этом наблюдалось качественное соответствие наблюдаемых характеристик известной модели генерации–рекомбинации в широкозонных полупроводниках при малых токах [2].

В настоящее время коммерчески доступны выпрямительные диоды на основе барьера Шоттки к 4H-SiC. В данной работе представлены результаты исследования вольт-амперных (I – V) характеристик выпрямительных диодов CPW2-0650-S010B на основе 4H-SiC с уровнем легирования базового слоя n -типа проводимости $\sim 6 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Диоды представляют собой чипы с

площадью барьера Шоттки $2.7 \cdot 10^{-2}$ см 2 . Исследование прямых и обратных I – V -характеристик проведено в диапазоне температур 20–370°C в атмосферных условиях. Ток измерялся пикоамперметром 6485 Keithley до максимальных токов 10–20 мА, при которых рассчитывалось последовательное дифференциальное сопротивление R_s прямосмещенного диода. Обратный ток измерялся до максимальных обратных напряжений 10–100 В. Нагрев осуществлялся поэтапно с выдержкой в нагретом состоянии в течение 1.5–2 ч и последующим охлаждением до комнатной температуры после каждого нагрева с целью контроля возможного эффекта отжига. При измерениях использовались прижимные контакты.

Все диоды до нагрева характеризовались практически идеальной I – V -характеристикой при прямом смещении (до области влияния R_s) вида $I = I_0 \exp(qV/nkT)$, с коэффициентом идеальности $n \approx (1.02–1.03)$ (рис. 1, кривая 0). Разброс величины I_0 от диода к диоду практически отсутствовал и в большей степени определялся „разбросом“ комнатной температуры: $I_0 \approx 4.2 \cdot 10^{-16}$ А при $T = 292.2$ К (плотность тока $J_0 \approx 1.6 \cdot 10^{-14}$ А/см 2) или $I_0 \approx 1.5 \cdot 10^{-15}$ А при $T = 296.6$ К ($J_0 \approx 6 \cdot 10^{-14}$ А/см 2). R_s диодов до нагрева составляло ~ 3 Ом. При малых обратных напряжениях (до -10 В) до нагрева обратный ток не регистрировался (был $< 10^{-12}$ А) и становился заметен при увеличении обратного напряжения до -100 В (рис. 2, кривые 0).

Прямые I – V -характеристики диодов при нагреве сохраняют экспоненциальный характер (рис. 1), n слабо растет до $n \approx 1.2$ при 480 К (см. вставку на рис. 3), I_0 меняется экспоненциально с обратной температурой, $I_0 \propto \exp(-E_a/kT)$, и характеризуется энергией актива-

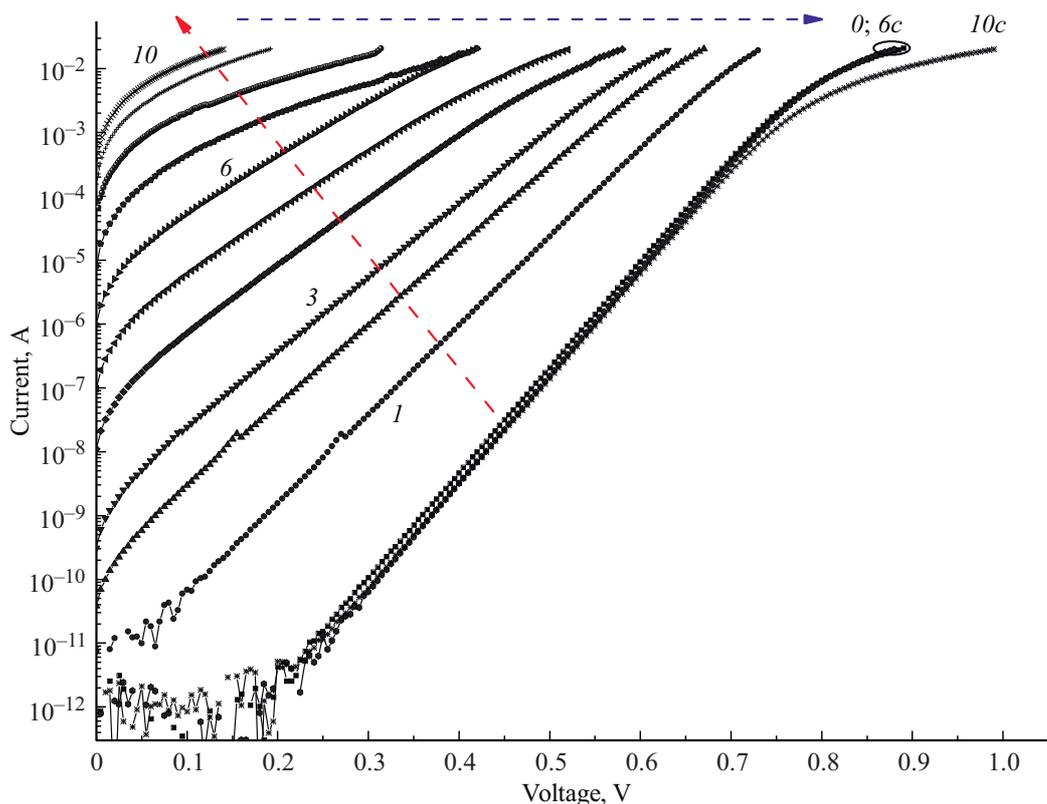


Рис. 1. Прямые I - V -характеристики диодов Шоттки при комнатной температуре $T = 295$ К до нагрева (0), при температурах 336 (1), 365 (2), 386 (3), 419 (4), 448 (5), 482 (6), 524 (7), 570 (8), 611 (9), 638 К (10) и при комнатной температуре $T = 293$ – 295 К после охлаждения от температур 482 (6с) и 638 К (10с).

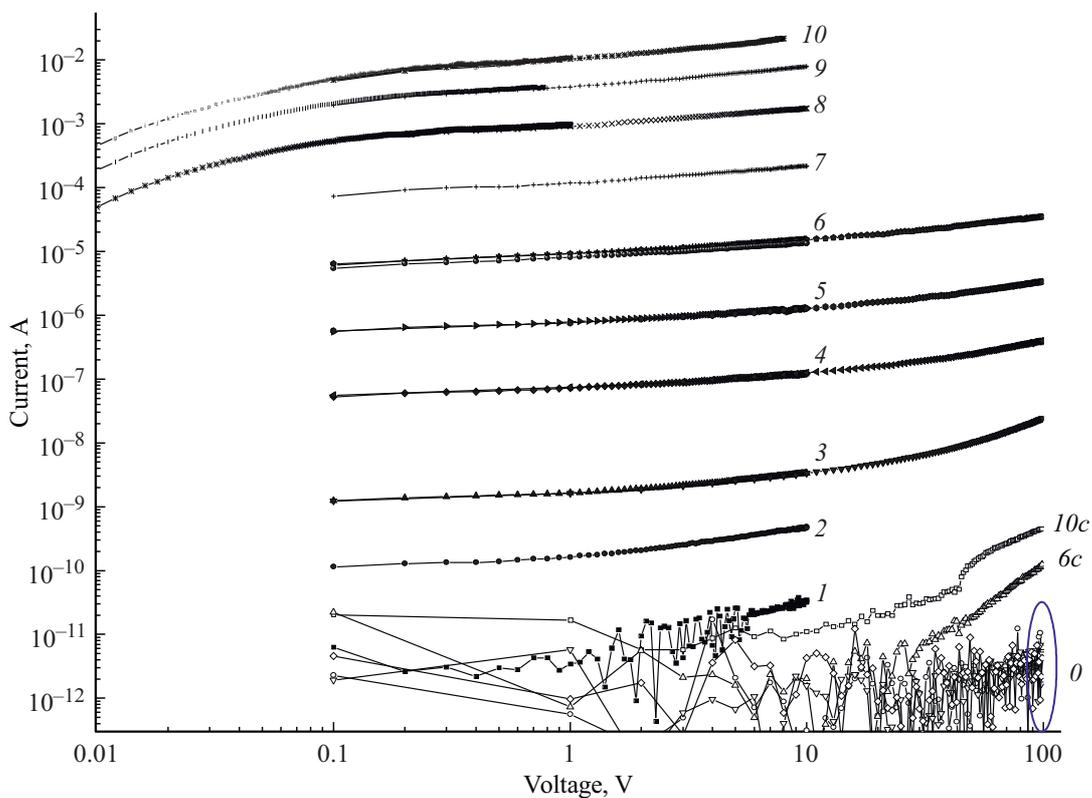


Рис. 2. Обратные I - V -характеристики диодов Шоттки при комнатной температуре $T \approx 295$ К до нагрева (кривые 0 для 5 диодов), при температурах 336 (1), 365 (2), 386 (3), 419 (4), 448 (5), 482 (6), 524 (7), 570 (8), 613 (9), 641 К (10) и при комнатной температуре $T = 293$ – 295 К после охлаждения от температур 482 (6с) и 641 К (10с).

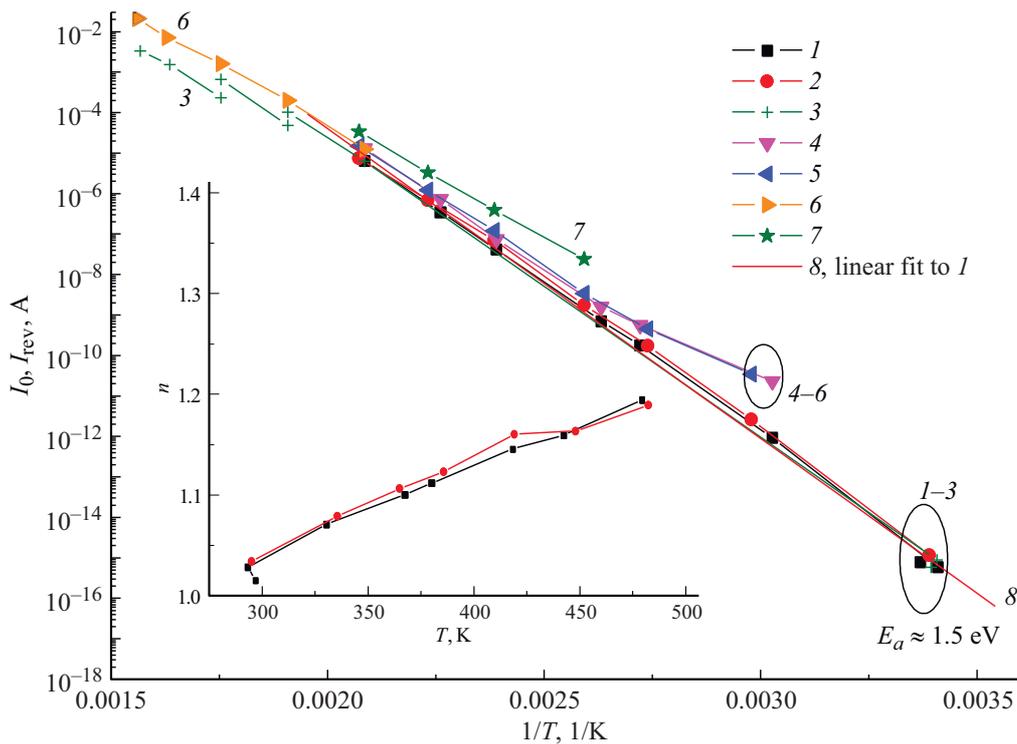


Рис. 3. Зависимости предэкспоненциального множителя I_0 прямой I – V -характеристики (1–3) и обратного тока I_{rev} при обратных напряжениях $V_{rev} = -10$ (4–6) и -100 В (7) от обратной температуры (для I_0 и $I_{rev}(-10$ В) представлены результаты трех измерений). На вставке — температурная зависимость коэффициента идеальности прямых I – V -характеристик (представлены результаты двух измерений).

ции $E_a \approx 1.5$ эВ (рис. 3, кривая 8). R_s характеризуется значительным разбросом, но, по-видимому, слабо растет с температурой (с энергией активации $E_a \approx 0.02$ эВ).

Обратный ток при обратных напряжениях до -10 В начинает регистрироваться только при нагреве; он растет при увеличении температуры с энергией активации $E_a \approx 1.5$ эВ при высоких температурах (рис. 2 и 3). Зависимость обратного тока от напряжения до -100 В близка к степенной, $I_{rev} \propto V_{rev}^k$, со слабо растущим показателем степени от $k \approx 0.1$ – 0.15 при обратных напряжениях $-(0.1-1)$ В, до $k \approx 0.2$ – 0.3 при обратных напряжениях $-(1-10)$ В и до $k \approx 0.38$ при обратных напряжениях $-(10-100)$ В (рис. 2).

Контроль I – V -характеристик при комнатной температуре после каждого нагрева показывает, что прямые I – V -характеристики остаются практически неизменными после нагрева вплоть до самых высоких температур, а обратный ток несколько возрастает (в качестве примера на рис. 1 и 2 приведены I – V -характеристики при комнатной температуре (кривые bc и $10c$) после нагрева до температур 482 и 640 К).

Исследуемые диоды Шоттки можно считать близкими к идеальному по такому критерию, как величина n (близкая к 1), по характеру зависимости обратного тока от напряжения при малых обратных напряжениях (близкой к степенной $I_{rev} \propto V_{rev}^k$ с показателем степени $k \approx 0.25$), а также по характеру температурных зави-

симостей прямого тока во всем диапазоне температур и обратного тока при высоких температурах. Указанные особенности I – V -характеристик типичны для тока, обусловленного термоэлектронной эмиссией [3]. Энергия активации прямого и обратного токов (~ 1.5 эВ) примерно соответствует в этом случае высоте барьера Шоттки ϕ_b (с учетом других слабых температурных зависимостей $I_0 \phi_b \approx 1.4$ – 1.5 эВ). Слабый рост R_s с ростом температуры обусловлен, по-видимому, уменьшением подвижности носителей заряда при нагреве. Таким образом, установлено, что верхняя граница диапазона рабочих температур выпрямительных диодов Шоттки на основе $4H$ -SiC в диапазоне исследуемых токов и напряжений примерно соответствует фундаментальной границе, определяемой высотой барьера (~ 1.5 эВ), и в нашем эксперименте достигает 370°C .

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации проекта „Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные пози-

ции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего“, № FZWF-2020-0015.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.R. O'Connor, J. Smiltens (eds). *Silicon carbide a high temperature semiconductor* [Proc. Conf. on Silicon Carbide] (Pergamon Press, 1960).
- [2] A.M. Strel'chuk et al. Mater. Sci. Forum, **457–460**, 1133 (2004).
- [3] Э.Х. Родерик. *Контакты металл–полупроводник* (М., Радио и связь, 1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Characteristics of Schottky rectifier diodes based on silicon carbide at elevated temperatures

A.M. Strel'chuk¹, A.A. Lebedev¹, P.V. Bulat²

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Sevastopol State University,
299053 Sevastopol, Russia

Abstract Forward and reverse current–voltage characteristics of commercial rectifier diodes based on the Schottky barrier to 4H-SiC in the temperature range 20–370°C were studied; the maximum current was 10–20 mA, the maximum voltage was 10–100 V. It was found that diodes can be considered as being close to ideal with the barrier height of ~ 1.5 eV, while the forward current over the entire temperature range, and the reverse current at high temperatures being largely due to thermoelectronic emission. The upper limit of the operating temperature range of 4H-SiC-based Schottky rectifier diodes at the studied currents and voltages corresponded approximately to the fundamental limit determined by the barrier height, and in the presented experiment reached 370°C.