

# Влияние протонного облучения на свойства высоковольтных интегрированных 4H-SiC диодов Шоттки в рабочем диапазоне температур

© А.А. Лебедев<sup>1</sup>, В.В. Козловский<sup>2</sup>, М.Е. Левинштейн<sup>1</sup>, Д.А. Малевский<sup>1</sup>, Г.А. Оганесян<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 21 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 16 января 2023 г.

Принята к публикации 16 января 2023 г.

Влияние протонного облучения (энергия протонов 15 МэВ) на параметры высоковольтных 4H-SiC интегрированных (JBS) диодов Шоттки впервые исследовано в диапазоне рабочих температур  $T_i$  (23 и 175°C). Блокирующее напряжение исследованных диодов,  $U_b$  составляло 600 и 1700 В. Для приборов с  $U_b = 600$  В диапазон флюенсов  $\Phi$  составлял  $5 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>; для приборов с  $U_b = 1700$  В величина  $\Phi$  составила и  $3 \cdot 10^{13} - 6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Увеличение температуры облучения приводит к заметному уменьшению влияния облучения на вольт-амперные характеристики диодов. Исследовано влияние отжига на вольт-амперные характеристики облученных приборов.

**Ключевые слова:** карбид кремния, диоды Шоттки, протонное облучение, отжиг, вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.21883/FTP.2023.01.54930.4475

## 1. Введение

Мощные высоковольтные карбид кремниевые интегрированные диоды Шоттки на основе 4H-SiC (4H-SiC junction barrier Schottky diodes, JBS) с каждым годом играют все более важную роль в таких применениях, как автомобильная и космическая электроника, оборудование ядерных электростанций, источники питания, конвертеры солнечных батарей и т.д. Влияние облучения протонами на свойства этих приборов исследовалось в целом ряде работ (см., например, [1–6] и ссылки в этих работах). Диапазон энергий протонов, использовавшихся при облучении, лежал в диапазоне 100 кэВ — 62.5 МэВ, значения флюенсов  $\Phi$  лежали в пределах  $5 \cdot 10^7 - 10^{14}$  см<sup>-2</sup>.

Подавляющее число работ выполнено при облучении, проводившемся при комнатной температуре. В работе [5] максимальная температура облучения  $T_i$  составляла 500°C. Показано, что с ростом  $T_i$  радиационная стойкость приборов монотонно возрастает. Установлено, что спектр дефектов, возникающих в SiC при высокотемпературном („горячем“) облучении существенно отличается от спектра дефектов, вводимых при облучении при комнатной температуре. В работе [6] исследовалось облучение протонами в диапазоне температур  $T_i$  100–400 К. Изучение особенностей, возникающих при облучении протонами при пониженных температурах, представляет значительный интерес как с точки зрения фундаментальных вопросов дефектообразования, так и для понимания особенностей работы

приборов на околоземных орбитах и в космическом пространстве.

С практической точки зрения, однако, наибольший интерес представляет исследование влияния облучения в диапазоне температур от комнатной до предельно допустимой для высоковольтных диодов Шоттки рабочей температуры (175°C) [7,8]. В этом температурном диапазоне работает подавляющее большинство используемых на практике диодов [9].

В настоящей работе влияние облучения протонами с энергией 15 МэВ на параметры высоковольтных 4H-SiC JBS исследовано для температуры облучения  $T_i = 23^\circ\text{C}$  и предельной рабочей температуры  $T_i = 175^\circ\text{C}$ .

## 2. Условия эксперимента

JBS структуры с блокирующим напряжением  $U_b = 1700$  В (CPW3-1700SO10) и  $U_b = 600$  В (GW3-S06010) облучались протонами с энергией 15 МэВ на циклотроне MGTs-20 [10]. Исходная концентрация некомпенсированной примеси ( $N_d - N_a$ ) в *n*-базе диодов с  $U_b = 1700$  В составляла  $3.4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Значение ( $N_d - N_a$ ) в базе диодов с  $U_b = 600$  В равнялось  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. При малых прямых смещениях в области экспоненциальной прямой вольт-амперной характеристики оба типа диодов характеризовались близкой к идеальной вольт-амперной характеристикой  $I = I_o \exp(qU/\beta kT)$  [4,5] со значением коэффициента идеальности  $\beta = 1.02 - 1.05$ . При малых обратных смещениях ток утечки составлял  $\sim 10^{-12} - 10^{-11}$  А

(здесь  $q$  — элементарный заряд,  $k$  — постоянная Больцмана).

Образцы облучались в импульсном режиме с частотой следования импульсов 100 Гц при длительности импульсов 2.5 мс. Плотность тока пучка протонов составляла 10–100 нА/см<sup>2</sup>. Во время облучения температура поддерживалась с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Длина пробега протонов с энергией 15 МэВ (рассчитанная с помощью программы SRIM [11]) составляла 1 мм. При длине базы диодов  $L \leq 10$  мкм распределение вводимых облучением дефектов однородно с очень высокой точностью.

Отжиг облученных структур проводился в атмосфере сухого азота при температурах 200 и 300 °C в течение 60 мин.

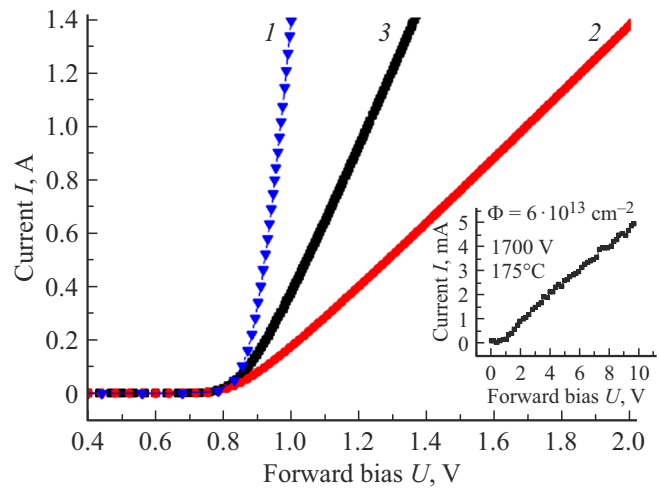
Вольт-амперные характеристики диодов до и после облучения, и после отжига измерялись при комнатной температуре в режиме одиночных импульсов, обеспечивающих изотермический характер измерений.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны прямые вольт-амперные ( $I$ – $V$ ) характеристики образца с блокирующим напряжением 1700 В (CPW3-1700SO10) в области прямых напряжений, превышающих „напряжение отсечки“, т. е. в условиях, когда подавляющая часть приложенного напряжения падает на базе диода. При относительно небольших прямых смещениях, в области экспоненциальной зависимости тока от напряжения, ни электронное, ни протонное облучение не оказывает заметного влияния на параметры прямых вольт-амперных характеристик [12,13].

В необлученном диоде (кривая 1) измеренное значение дифференциального сопротивления базы  $R_d = 0.092$  Ом очень хорошо согласуется с данными изготовителя [8]. После облучения флюенсом  $\Phi = 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре (23 °C) сопротивление  $R_d$  возросло до значения  $R_d = 0.81$  Ом. При одинаковой величине подвижности в исходном и облученном диодах [14] концентрация электронов в облученном диоде уменьшилась в  $\sim 8.8$  раза. Скорость удаления электронов (removal rate) из базы диода вследствие генерации акцепторных центров [5,12],  $\eta_e$  составляет  $\eta_e = (n_0 - n)/\Phi \approx 100$  см<sup>-1</sup> ( $n_0$  — концентрация электронов в необлученном диоде,  $n$  — концентрация после облучения.) Полученное значение  $\eta_e$  разумно согласуется с ранее полученными результатами [13,15].

Облучение диодов той же дозой при предельной рабочей температуре 175 °C заметно снижает величину  $\eta_e$  (кривая 3). После облучения флюенсом  $\Phi = 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  величина дифференциального сопротивления составила  $R_d = 0.37$  Ом, т. е. уменьшилась в  $\sim 2$  раза по сравнению со случаем, когда облучение проводится при комнатной температуре. Скорость удаления электронов в этом случае составляет  $\eta_e \approx 85$  см<sup>-1</sup>



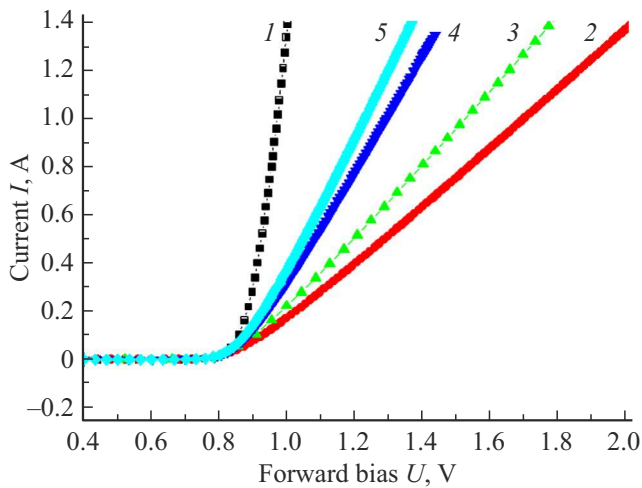
**Рис. 1.** Прямые вольт-амперные характеристики диода с блокирующим напряжением 1700 В. 1 — исходная  $I$ – $V$ -характеристика необлученного диода, 2 —  $I$ – $V$ -характеристика после облучения протонами флюенсом  $\Phi = 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при комнатной температуре ( $T_i = 23^\circ\text{C}$ ), 3 — то же после облучения тем же флюенсом при температуре  $T_i = 175^\circ\text{C}$ . На вставке показана вольт-амперная характеристика диода после облучения флюенсом  $\Phi = 6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> при  $T_i = 175^\circ\text{C}$ .

При облучении при 175 °C ( $\eta_e = 85$  см<sup>-1</sup>) концентрация электронов  $n$  формально становится равной нулю при значении флюенса  $\Phi_0 = n_0/\eta_e \approx 4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Физически это означает, что при  $\Phi > \Phi_0$  суммарная концентрация введенных облучением акцепторных уровней превышает исходную концентрацию электронов  $n_0$ . В этом случае с дальнейшим увеличением  $\Phi$  сопротивление возрастает значительно более резко, чем в области линейного спада зависимости  $n(\Phi)$  [4,5].

На вставке к рис. 1 показана  $I$ – $V$ -характеристика диода после облучения диода при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  флюенсом  $\Phi > \Phi_0 = 6 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. В этом случае дифференциальное сопротивление базы  $R_d$  равняется 1850 Ом, т. е. возрастает в  $\approx 5 \cdot 10^3$  раз при двукратном увеличении дозы.

На рис. 2 представлены результаты, полученные при отжиге облученных диодов с  $U_b = 1700$  В.

Кривые 1 и 2 на рис. 2 совпадают с соответствующими кривыми рис. 1. Видно, что отжиг в течение 60 мин при температуре  $T_a = 200^\circ\text{C}$  (кривая 3) несколько уменьшает дифференциальное сопротивление диода, облученного при комнатной температуре (от значения  $R_d = 0.81$  Ом до  $R_d = 0.59$  Ом). Последующий отжиг в течение 60 мин при  $T_a = 300^\circ\text{C}$  уменьшает величину  $R_d$  до значения  $R_d = 0.41$  Ом (кривая 4). Однако и после такого двукратного отжига величина  $R_d$  оказывается все же больше, чем значение  $R_d$  после облучения при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  ( $R_d = 0.35$  Ом, кривая 5). Такой результат представляется вполне объяснимым: полный отжиг дефектов, генерируемых протонным облучением, происходит при температурах порядка 1800–2100 К (см., напри-



**Рис. 2.** Прямые вольт-амперные характеристики диода с блокирующим напряжением 1700 В. 1 — исходная  $I$ - $V$ -характеристика необлученного диода, 2 —  $I$ - $V$ -характеристика после облучения протонами флюенсом  $\Phi = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре ( $23^\circ\text{C}$ ), 3 — после последующего отжига в атмосфере сухого азота в течение 60 мин при  $200^\circ\text{C}$ , 4 — после повторного отжига в течение 1 ч при  $300^\circ\text{C}$ , 5 — вольт-амперная характеристика диода после облучения флюенсом  $\Phi = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  и двух последовательных отжигов в течение 1 ч при температурах 200 и  $300^\circ\text{C}$ .

мер, [16]). С другой стороны, часть дефектов отжигается уже при температурах 500–650 К ( $200$ – $350^\circ\text{C}$ ) [16].

При отжиге структур, облученных при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  дозой  $\Phi > \Phi_0$ , т.е. приводящей к „полной компенсации“ (см. вставку на рис. 1), сколько-нибудь эффективно восстановления дифференциального сопротивления не наблюдается. Такая ситуация аналогична результату, полученному при облучении 1700 В диодов при комнатной температуре электронами [17]

Двукратный отжиг диода, облученного при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  в течение часа последовательно при температурах 200 и  $300^\circ\text{C}$  (кривая 5), не оказывает практически никакого влияния на величину дифференциального сопротивления базы.

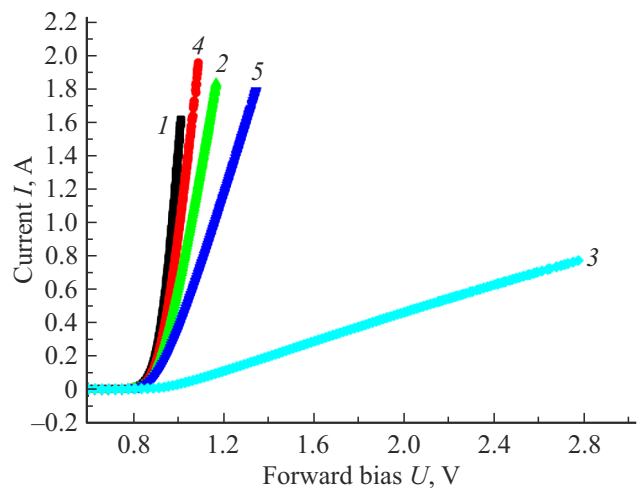
На рис. 3 показаны прямые  $I$ - $V$ -характеристики в области прямых напряжений для образца с блокирующим напряжением 600 В (GW3-S06010).

Измеренное значение дифференциального сопротивления базы необлученного диода  $R_d = 0.05 \text{ Ом}$ . После облучения при комнатной температуре флюенсом  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (кривая 2) значение  $R_d$  составило 0.12 Ом. Облучение при комнатной температуре флюенсом  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  приводит к росту значения  $R_d$  до значения  $R_d = 2.29 \text{ Ом}$ . Считая, как и прежде, подвижность постоянной, получаем при  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  для скорости удаления электронов  $\eta_e = (n_0 - n) / \Phi$  величину  $\eta_e \approx 110 \text{ см}^{-1}$ , близкую к значению, полученному для 1700 В диодов.

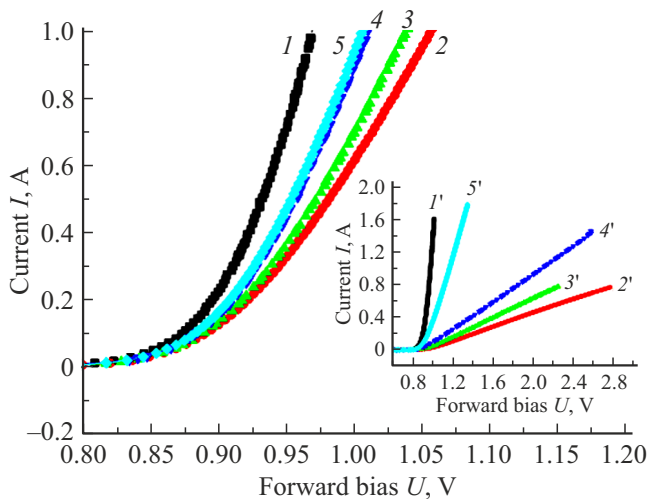
При  $\eta_e \approx 110 \text{ см}^{-1}$  и исходной концентрации носителей в необлученном диоде  $n_0 = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  концентрация электронов в базе  $n$  формально становится равной нулю при  $\Phi_0 = n_0 / \eta_e \approx 9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Эта величина очень близка к значению  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , которому соответствует кривая 3 рис. 3. Экспериментально измеренное значение  $n$  при  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  меньше исходного значения  $n_0$  в  $\sim 46$  раз. Расхождение между рассчитанным и оцениваемым из эксперимента значениями  $\Phi_0$  составляет  $\sim 10\%$  и может объясняться как неточностью в оценке экспериментального значения  $\Phi$ , так и „выполживанием“ зависимости  $n(\Phi)$  при приближении к „пороговому“ значению  $\Phi_0$ . Возможные механизмы такого выполживания применительно к электронному облучению рассмотрены в [19].

Облучение при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  флюенсом  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (кривая 4) приводит к возрастанию дифференциального сопротивления до значения  $R_d = 0.09 \text{ Ом}$ ; после облучения флюенсом  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  величина  $R_d$  составила 0.24 Ом (кривая 5). Таким значениям  $R_d$  соответствуют скорости удаления электронов  $\eta_e = (n_0 - n) / \Phi \approx 90 \text{ см}^{-1}$  для  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $\eta_e \approx 80$  для  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Исходя из полученных значений  $\eta_e$  следует считать, что условие „полной компенсации“, т.е. ситуации, когда концентрация электронов  $n$  в базе формально становится равной нулю, реализуется для  $T_i = 175^\circ\text{C}$  при  $\Phi_0 = n_0 / \eta_e \approx 1.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 4 представлены результаты отжига 600 В диодов, облученных дозами  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (см. вставку).



**Рис. 3.** Прямые вольт-амперные характеристики диода с блокирующим напряжением 600 В. 1 — исходная  $I$ - $V$ -характеристика необлученного диода, 2 —  $I$ - $V$ -характеристика после облучения протонами флюенсом  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при  $T_i = 23^\circ\text{C}$ , 3 — то же после облучения при той же температуре флюенсом  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 4 — после облучения флюенсом  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при  $T_i = 175^\circ\text{C}$ , 5 — после облучения флюенсом  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  при  $175^\circ\text{C}$ .



**Рис. 4.** Прямые вольт-амперные характеристики диода с блокирующим напряжением 600 В после облучения дозой  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и последующего отжига. 1 — исходная  $I$ - $V$ -характеристика необлученного диода, 2 —  $I$ - $V$ -характеристика после облучения при  $T_i = 23^\circ\text{C}$ , 3 — после последующего отжига в атмосфере сухого азота в течение 60 мин при  $200^\circ\text{C}$ , 4 — после повторного отжига в течение 1 ч при  $300^\circ\text{C}$ , 5 — после облучения при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  и двух последовательных отжигов в течение 1 ч при температурах  $200$  и  $300^\circ\text{C}$ . На вставке представлены данные для диода, облученного дозой  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . 1' — исходная  $I$ - $V$ -характеристика необлученного диода, 2' —  $I$ - $V$ -характеристика после облучения при  $T_i = 23^\circ\text{C}$ , 3' — после последующего отжига (60 мин при  $200^\circ\text{C}$ ), 4' — после повторного отжига (60 мин при  $300^\circ\text{C}$ ), 5' — после облучения при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  и двух последовательных отжигов в течение 60 мин при температурах  $200$  и  $300^\circ\text{C}$ .

Кривые 1 и 2 на рис. 4 совпадают с соответствующими кривыми рис. 3. Отжиг после облучения при комнатной температуре в течение 60 мин при температуре  $200^\circ\text{C}$  лишь незначительно снижает дифференциальное сопротивление (кривая 3). Однако после последующего отжига при  $300^\circ\text{C}$  (кривая 4) вольт-амперная характеристика с очень хорошей точностью совпадает с  $I$ - $V$ -характеристикой диода, облученного при температуре  $T_i = 175^\circ\text{C}$  (кривая 5). Сравнивая данные, приведенные на рис. 2 и 4, легко убедиться, что отжиг при температуре  $300^\circ\text{C}$  для 600 В диодов оказывается более эффективным, чем для диодов с блокирующим напряжением 1700 В.

Следует заметить, что превышение температуры отжига до значений, заметно превышающих  $300^\circ\text{C}$ , по-видимому, нецелесообразно. Нагрев до температур, превышающих  $370^\circ\text{C}$ , ведет к разгонке и частичному вплавлению металла (Ni) в поверхность карбида кремния [19].

Облучение диода при температуре  $T_i = 175^\circ\text{C}$  значительно уменьшает скорость удаления электронов по сравнению с облучением той же дозой при комнатной температуре (ср. кривые 2 и 5 рис. 4). Однако последующие отжиги, в отличие от случая облучения

при комнатной температуре, практически не влияют на вольт-амперную характеристику диода, облученного при  $T_i = 175^\circ\text{C}$ .

На вставке к рис. 4 показаны результаты отжига 600 В диодов, облученных дозой  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При сравнении данных, приведенных на рис. 4 и вставке, прежде всего следует отметить, что результаты отжига структур, облученных дозами  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , кардинально отличаются.

После облучения дозой  $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и двукратного отжига в течение 60 мин последовательно при  $200$  и  $300^\circ\text{C}$   $I$ - $V$ -характеристика диода с хорошей точностью совпадает с вольт-амперной характеристикой диода, облученного той же дозой при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  (рис. 4). Дифференциальное сопротивление базы,  $R_d$ , после такого двукратного отжига составляет 0.12 Ом и превышает величину  $R_d$  в необлученной структуре в  $\sim 2.4$  раза.

При  $\Phi = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и после такого же двукратного отжига величина  $R_d$  на порядок больше и равняется  $\sim 1.15$  Ом (кривая 4' на вставке). Это значение в  $\sim 5$  раз превышает значение  $R_d$  после облучения той же дозой при  $T_i = 175^\circ\text{C}$  и в  $\sim 23$  раза больше, чем сопротивление  $R_d$  необлученной структуры (рис. 4).

Такой результат служит убедительной иллюстрацией весьма сильной зависимости результатов отжига в зависимости от дозы облучения. Эффективность отжига заметно снижается даже при дозах  $\Phi_0$ , несколько меньших, но достаточно близких к порогу компенсации.

## 4. Заключение

Исследовано влияние облучения протонами (с энергией 15 МэВ) на параметры высоковольтных (блокирующее напряжение,  $U_b$ , 600 и 1700 В) 4H-SiC диодов Шоттки в рабочем диапазоне температур ( $23$  и  $175^\circ\text{C}$ ). Радиационная стойкость приборов возрастает с ростом температуры облучения. При относительно небольших значениях флюенсов  $\Phi$  ( $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) для приборов с  $U_b = 1700$  В и  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  для диодов с  $U_b = 600$  В даже относительно кратковременный (60 мин) отжиг при температуре  $300^\circ\text{C}$  после облучения позволяет существенно уменьшить дифференциальное сопротивление базы диодов  $R_d$ . При относительно больших значениях  $\Phi$ , превышающих или даже несколько меньших, чем величина  $\Phi_0$ , соответствующая случаю, когда концентрация электронов в базе диода формально становится равной нулю, влияние отжига становится практически несущественным.

## Финансирование работы

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-12-00003.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S. Nigam, J. Kim, F. Ren, G.Y. Chung, M.F. MacMillan, R. Dwivedi, T.N. Fogarty, R. Wilkins, K.K. Allums, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, J.R. Williams. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2385 (2002).
- [2] Zh. Luo, T. Chen, J.D. Cressler, D.C. Sheridan, J.R. Williams, R.A. Reed, P.W. Marshall. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **50** (6), 1821 (2003).
- [3] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti. *J. Appl. Phys.*, **98**, 053706 (2005).
- [4] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, M.E. Levinshtein, S.L. Rummyantsev, J.W. Palmour. *J. Appl. Phys.*, **123**, 024502 (2018).
- [5] A.A. Lebedev, V.V. Kozlovski, M.E. Levinshtein, A.E. Ivanov, K.S. Davydovskaya. *Solid-State Electron.*, **181–182**, 08009 (2021).
- [6] L. Zhao, Y. Tang, Yun Bai, M. Qiu, Zh. Wu, Yu Yang, C. Yang, X. Tian, X. Liu. *Electronics*, **11**, 1341 (2022).  
<https://doi.org/10.3390/electronics11091341>
- [7] <https://datasheetspdf.com/datasheet/CPW3-0600S002>
- [8] <https://datasheetspdf.com/datasheet/CPW3-1700S010>
- [9] Sh. Ji, Zh. Zhang, Fei Wang. *CES Trans. Electric. Machines and Systems*, **1**, 254 (2017).
- [10] L.F. Zakharenkov, V.V. Kozlovski, B.A. Shustrov. *Phys. Status Solidi A*, **117**, 85 (1990).
- [11] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark. *The Stopping and Range of Ions in Matter* (Pergamon Press, N.Y., 1985).
- [12] P. Hazdra, J. Vobecký. *Phys. Status Solidi A*, **216**, 1900312 (2019).
- [13] A.A. Lebedev, V.V. Kozlovski, K.S. Davydovskaya, M.E. Levinshtein. *Materials*, **14**, 4976 (2021).  
<https://doi.org/10.3390/ma14174976>
- [14] M.E. Levinshtein, S.L. Rummyantsev, M.S. Shur (eds). *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons Inc. N.Y., 2001).
- [15] V.V. Emtsev, A.M. Ivanov, V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, G.A. Oganessian, N.B. Strokan, G. Wagner. *ФТП*, **46**, 473 (2012).
- [16] A.A. Lebedev, A.I. Veinger, D.V. Davydov, V.V. Kozlovski, N.S. Savkina, A.M. Strel'chuk. *J. Appl. Phys.*, **88**, 6262 (2000).
- [17] A.A. Лебедев, В.В. Козловский, М.Е. Левинштейн, Д.А. Малевский, Г.А. Оганесян, А.М. Стрельчук, К.С. Давыдовская. *ФТП*, **56** (4), 441 (2022).
- [18] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, E.V. Bogdanova. *J. Appl. Phys.*, **117**, 155702 (2015).
- [19] R. Karsthof, M.E. Bathen, A. Galeckas, L. Vines. *Phys. Rev. B*, **102**, 18411 (2020).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.184111>

Редактор Г.А. Оганесян

## Effect of proton irradiation on the properties of high-voltage integrated 4H-SiC Schottky diodes at operating temperatures

A.A. Lebedev<sup>1</sup>, V.V. Kozlovski<sup>2</sup>, M.E. Levinshtein<sup>1</sup>, D.A. Malevsky<sup>1</sup>, G.A. Oganessian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Department of Experimental Physics,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
195251 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The effect of proton irradiation (proton energy 15 MeV) on the parameters of high-voltage 4H-SiC integrated Schottky diodes (JBS) was studied for the first time in the operating temperature range  $T_i$  (23 and 175°C). The blocking voltage of the diodes under study,  $U_b$ , was 600 and 1700 V. For devices with  $U_b = 600$  V, the fluence range was  $5 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ; for devices with  $U_b = 1700$  V, the fluence range was  $3 \cdot 10^{13} - 6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . An increase in the irradiation temperature leads to a noticeable decrease in the effect of irradiation on the current-voltage characteristics of the diodes. The effect of annealing on the current-voltage characteristics of irradiated devices is studied.