

Устойчивость к электронному облучению высоковольтных 4H-SiC диодов Шоттки в рабочем диапазоне температур

© А.А. Лебедев¹, В.В. Козловский², М.Е. Левинштейн¹, Д.А. Малевский¹, Р.А. Кузьмин¹

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

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: melev@nimis.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 19 мая 2022 г.

В окончательной редакции 30 мая 2022 г.

Принята к публикации 30 мая 2022 г.

Впервые исследовано влияние облучения электронами с энергией 0.9 МэВ на параметры 4H-SiC диодов Шоттки с предельным блокирующим напряжением $U_b = 600$ и 1700 В в диапазоне рабочих температур T_i (23 и 175°C). Диапазон флюенсов Φ составлял $1 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для приборов с $U_b = 600$ В и $5 \cdot 10^{15} - 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для приборов с $U_b = 1700$ В. Облучение при комнатной температуре значительно увеличивает дифференциальное сопротивление базы диодов. Облучение теми же дозами при $T_i = 175^\circ\text{C}$ — предельной рабочей температуре приборов практически не сказывается на параметрах вольт-амперных характеристик. Тем не менее DLTS-спектры демонстрируют значительное увеличение концентрации глубоких уровней в верхней половине запрещенной зоны не только после облучения при комнатной температуре, но и после облучения при $T_i = 175^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: карбид кремния, диоды Шоттки, электронное облучение, вольт-амперные характеристики, DLTS-спектры.

DOI: 10.21883/FTP.2022.08.53150.9891

1. Введение

Высоковольтные карбид-кремниевые интегрированные (JBS) диоды Шоттки с блокирующим напряжением $U_b = 600$ и 1700 В сделались в настоящее время важными компонентами современной электроники. Они используются в автомобильной и аэрокосмической электронике, компенсаторах реактивной мощности, конверторах солнечных батарей большой площади, импульсных источниках питания, оборудовании ядерных электростанций и т. д. [1–5]. Радиационная устойчивость приборов на основе карбида кремния к различным типам излучения нередко служит важным критерием, определяющим возможность применения соответствующих электронных компонентов в космической и авиационной электронике, оборудовании ядерных реакторов и в ускорителях заряженных частиц.

Влияние облучения электронами с энергиями в диапазоне $\sim 0.25 - 10$ МэВ на свойства карбида кремния и приборов на его основе исследовалось в целом ряде работ (см., например, [6–10] и ссылки в них). Во всех этих работах облучение проводилось при комнатной температуре. Недавно в работах [11–13] было исследовано влияние температуры облучения электронами 4H-SiC JBS диодов с блокирующим напряжением 1700 В при температурах $T_i = 300$ и 500°C , значительно превосходящих предельную рабочую температуру диодов. Показано, что радиационная стойкость приборов монотонно возрастает с ростом температуры облучения. Продемонстрировано, что при высокотемпературном („горячем“) облучении

возникают дефекты, отсутствующие при облучении при комнатной температуре.

Однако температуры, при которых в [11–13] исследовано влияние горячего облучения на свойства 4H-SiC JBS структур, значительно превосходят допустимую предельную рабочую температуру диодов Шоттки с блокирующим напряжением $U_b = 600$ и 1700 В (175°C) [14,15].

В настоящей работе сопоставлено влияние облучения электронами с энергией 0.9 МэВ, проведенного при комнатной температуре и предельной рабочей температуре, на параметры 4H-SiC JBS с блокирующим напряжением $U_b = 600$ и 1700 В.

2. Условия эксперимента

Исследовались диоды Шоттки CPW3-0600S002.0 с блокирующим напряжением 600 В (среднее значение выпрямленного тока 2 А) [14] и диоды CPW3-1700-S010B-WP с блокирующим напряжением 1700 В и средним значением выпрямленного тока 10 А [15]. Облучение проводилось электронами с энергией 0.9 МэВ в импульсном режиме при длительности импульсов 330 мкс и частоте следования импульсов 490 Гц. Радиационные дефекты генерировались в базе структур с высокой степенью однородности [11–13]. Облучение диодов проводилось в специально сконструированной мишенной камере на воздухе. Ускоренные электроны выводились из вакуумного объема ускорителя

через титановую фольгу толщиной ~ 50 мкм. Точность поддержания температуры составляла $\pm 5^\circ\text{C}$. Изотермические вольт-амперные характеристики диодов измерялись при комнатной температуре в режиме одиночных импульсов.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены прямые вольт-амперные характеристики диода с блокирующим напряжением 600 В. Кривая 1 соответствует I - V -характеристике исходного (необлученного) диода CPW3-0600S002.0 в области относительно больших смещений. При небольших прямых смещениях, в области экспоненциальной части I - V -характеристики электронное облучение оказывает незначительное влияние на параметры вольт-амперных характеристик [10–12].

Измеренное значение дифференциального сопротивления базы R_d в необлученном диоде составляет 0.076 Ом. В результате облучения электроны из зоны проводимости захватываются на генерируемые акцепторные центры, что приводит к возрастанию сопротивления базы. Облучение флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре приводит к росту R_d в 1.9 раза, до величины $R_d \approx 0.145$ Ом; после облучения флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ величина R_d составила ≈ 0.35 Ом, т.е. возросла в ~ 4.6 раза. Исходное значение концентрации n_0 равняется $\approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [16]. При одинаковой величине подвижности в облученном и исходном диодах [17] скорость удаления электронов из базы диода под влиянием

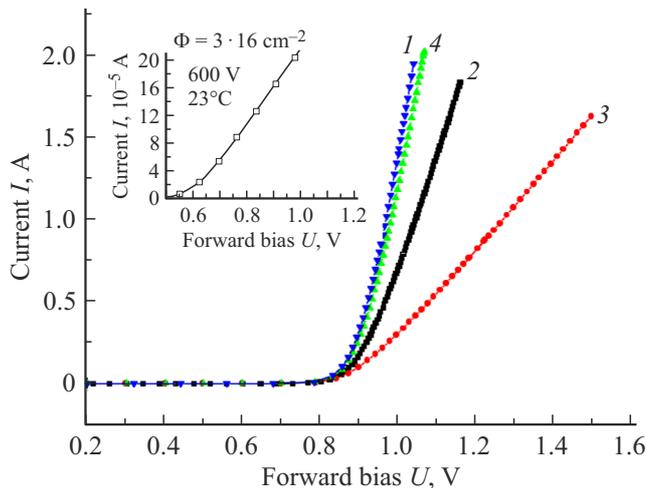


Рис. 1. Прямые вольт-амперные характеристики диода с блокирующим напряжением 600 В. 1 — исходная I - V -характеристика, 2 — после облучения электронами флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре (23°C), 3 — после облучения при комнатной температуре электронами флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 4 — после облучения электронами флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при температуре 175°C . На вставке показана вольт-амперная характеристика диода после облучения флюенсом $\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при 23°C .

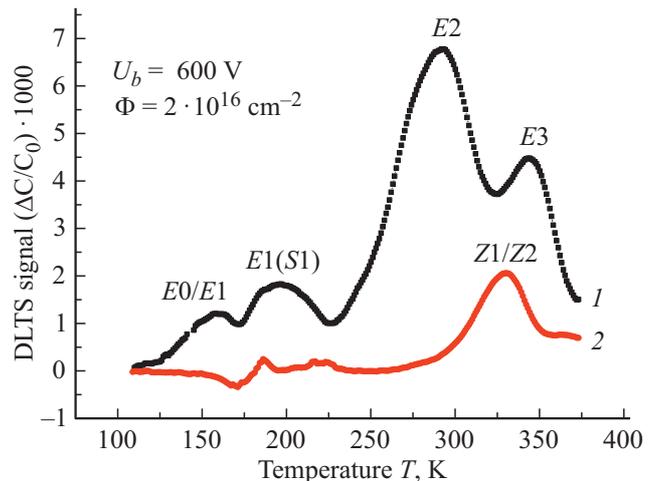


Рис. 2. DLTS-спектры образца с блокирующим напряжением $U_b = 600$ В, облученного дозой $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. 1 — температура облучения $T_i = 23^\circ\text{C}$, 2 — $T_i = 175^\circ\text{C}$. Окно скоростей (rate window) — 51 с^{-1} . Амплитуды максимумов в необлученном образце ($\Phi = 0$) во всем диапазоне температур значительно меньше амплитуды максимумов после облучения.

облучения, η_e , составляет для обоих значений флюенса $\eta_e = (n_0 - n)/\Phi \approx 0.4 \text{ см}^{-1}$. Здесь n — концентрация после облучения соответствующей дозой. Это значение несколько больше, чем величина $\eta_e = 0.25 \text{ см}^{-1}$, установленное в работах [18,19], но заметно меньше, чем величина $\eta_e = 1.67 \text{ см}^{-1}$, измеренная в работе [9].

Следует заметить, что при $\eta_e = 0.4 \text{ см}^{-1}$ концентрация электронов в базе n при флюенсе $\Phi = 2.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ формально становится равной нулю. Такая ситуация соответствует условию, когда облучение создает в запрещенной зоне полупроводника акцепторные центры, суммарная концентрация которых равняется исходной концентрации электронов в базе n_0 . При таком и больших значениях Φ малая остаточная концентрация электронов в базе определяется тепловой генерацией с достаточно глубоких уровней [7,8,20]. Действительно, при облучении образцов при 23°C флюенсом $\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ сопротивление базы R_d составило $\approx 2 \cdot 10^4$ Ом (см. вставку к рис. 1).

Кривая 4 представляет I - V -характеристику диода после облучения флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при температуре $T_i = 175^\circ\text{C}$. Дифференциальное сопротивление базы R_d составило в этом случае 0.084 Ом. Таким образом, сопротивление возросло по сравнению с сопротивлением необлученного диода на $\approx 10\%$. Вполне очевидно, что увеличение температуры T_i , при которой производится облучение, радикально увеличивает радиационную стойкость диодов даже при температуре облучения в пределах допустимой рабочей температуры.

На рис. 2 показаны DLTS-спектры, регистрирующие уровни в верхней половине запрещенной зоны.

Обозначения максимумов на DLTS-спектрах соответствует классификации, принятой в работе [10]. За-

метим, что в [10] исследовались DLTS-спектры после облучения при комнатной температуре электронами с близким значением энергии (1.05 МэВ) 4H-SiC JBS диодов с блокирующим напряжением 1700 В. Тем не менее температурное положение наблюдающихся после облучения при комнатной температуре DLTS-пиков (рис. 2) вполне удовлетворительно согласуется с положением соответствующих пиков, наблюдавшихся в работе [10]. Определенные из DLTS-измерений концентрации акцепторных уровней составляют $N_t^{E2} = 1.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_t^{E3} = 1.02 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $N_t^{E1/S1} = 3.7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $N_t^{E0/E1} = 2.35 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ для пиков E2, E3, E1/S1 и E0/E1 соответственно. „Двойные“ обозначения пиков E1/S1 и E0/E1 обусловлены тем, что при относительно большом значении флюенса $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ неизбежное уширение линий приводит к частичному перекрытию и слиянию близко расположенных пиков. Кроме того, как отмечается в [10], при облучении наблюдается некоторый сдвиг положения пиков относительно зоны проводимости вследствие образования в небольшой концентрации политипа 3C, имеющего меньшую ширину запрещенной зоны.

При оценке полной концентрации акцепторных уровней, созданных облучением, необходимо принять во внимание существование уровня EH6/7, наблюдающегося в DLTS спектрах при характерной температуре $\sim 570 \text{ К}$ [7,10]. Для исследуемых образцов во избежание спонтанного отжига [8] максимальная температура при измерении DLTS-спектров составляла 400 К. На контрольных образцах DLTS-спектры исследовались вплоть до температуры $\sim 630 \text{ К}$. Концентрация уровня EH6/7 была найдена равной $\approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, суммарная концентрация акцепторных центров, наблюдающихся в верхней половине запрещенной зоны при облучении при комнатной температуре флюенсом $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, составила $N_t^\Sigma \approx 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Исходя из этого можно было бы ожидать, что сопротивление базы диода возрастет в результате облучения только на $\sim 4\%$. Между тем сопротивление базы R_d возрастает при том же флюенсе в ~ 4.6 раза. Следует, по-видимому, предположить, что, помимо уровней в верхней половине запрещенной зоны, электронное облучение создает акцепторные уровни и в нижней половине запрещенной зоны.

При облучении при температуре $T_i = 175^\circ \text{C}$ (кривая 2 на рис. 2) пик с максимальной амплитудой, наблюдающийся при $T \approx 330 \text{ К}$, идентифицируется как уровень Z1/Z2. Концентрация уровня $N_t^{Z2/Z2}$ составляет $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Концентрации уровней, соответствующих максимумам при температурах $T = 220, 185$ и 171 К , составляют $N_{t220} \approx 5 \cdot 10^{12}$, $N_{t185} \approx 4.2 \cdot 10^{12}$, $N_{t171} \approx 9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Принимая концентрацию уровня EH6/7 равной концентрации Z1/Z2 [7,21], суммарную концентрацию N_t^Σ акцепторных уровней, созданных облучением в верхней половине запрещенной зоны при $T_i = 175^\circ \text{C}$, можно

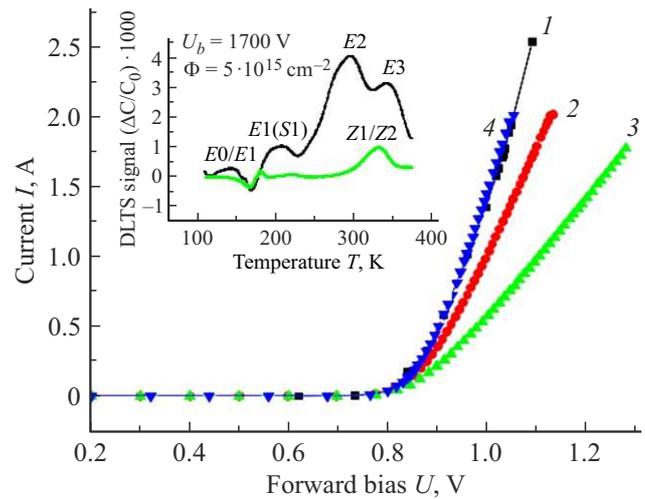


Рис. 3. Прямые вольт-амперные характеристики диода с блокирующим напряжением 1700 В. 1 — исходная I - V -характеристика, 2 — после облучения электронами флюенсом $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре, 3 — после облучения при комнатной температуре электронами флюенсом $\Phi = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 4 — после облучения электронами флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при температуре 175°C . На вставке показаны DLTS-спектры образца с блокирующим напряжением $U_b = 1700 \text{ В}$, облученного дозой $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. 1 — температура облучения $T_i = 23^\circ \text{C}$, 2 — $T_i = 175^\circ \text{C}$. Окно скоростей — 51 с^{-1} . Амплитуды максимумов в необлученном образце ($\Phi = 0$) во всем диапазоне температур значительно меньше амплитуды максимумов после облучения.

оценить, как $N_t^\Sigma \approx 1.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. При такой величине следовало бы ожидать возрастания сопротивления R_d на $\sim 1.2\%$. Между тем, как видно из рис. 1, R_d возрастает в этом случае на $\sim 10\%$, т. е. в 7 раз сильнее.

Качественно сходные результаты получены при исследовании влияния облучения на диоды с блокирующим напряжением $U_b = 1700 \text{ В}$ (рис. 3).

Измеренное значение дифференциального сопротивления базы R_d в необлученном диоде составляет 0.08 Ом . После облучения флюенсом $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре величина R_d составила 0.145 Ом (возрастание в ~ 1.8 раза). После облучения флюенсом $\Phi = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ величина R_d составила $\approx 0.23 \text{ Ом}$ (возрастание в ~ 2.9 раза). Исходное значение концентрации n_0 в исследуемых структурах равняется $3.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [10,13]. Таким образом, для дозы $\Phi = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ скорость удаления электронов η_e составляет $\eta_e \approx 0.15 \text{ см}^{-1}$. Это значение совпадает с величиной η_e , полученной для диодов того же типа в работе [10] при облучении электронами с близкой величиной энергии 1.05 МэВ.

После облучения флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при температуре 175°C (кривая 4 на рис. 3) вольт-амперная характеристика с экспериментальной точностью совпадает с I - V -характеристикой исходного необлученного образца. Тем не менее DLTS-спектры, регистрирующие уровни

в верхней половине запрещенной зоны (см. вставку к рис. 3), демонстрируют существенные изменения в амплитуде соответствующих пиков не только после облучения при комнатной температуре, но и в результате облучения при температуре 175°C (см. вставку к рис. 3).

Как можно видеть из сравнения вставки к рис. 3 с данными, приведенными на рис. 2, DLTS-спектры в обоих случаях весьма похожи. Как отмечалось выше, положения пиков вполне удовлетворительно согласуются также с данными, приведенными в работе [10] для тех же диодов CPW3-1700-S010B, облученных электронами с энергией 1.05 МэВ флюенсом $\Phi = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при комнатной температуре. Так, температурное положение пиков E_2 , E_3 и E_0/E_1 на вставке к рис. 3 (кривая 1) соответствует значениям 290, 345 и 160 К соответственно. В работе [10] соответствующие значения температур для этих пиков составляют 260, 310 и 160 К соответственно. Некоторая разница в положении максимумов объясняется, как указывалось выше, неизбежным уширением и частичным перекрытием линий при значительном увеличении флюенса.

При облучении при $T_i = 175^\circ\text{C}$ (кривая 2) пик с максимальной амплитудой при $T = 317\text{K}$ соответствует уровню Z1/Z2 с концентрацией $N_{i317} \approx 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Концентрации двух других уровней со значительно меньшей амплитудой, наблюдающихся при температурах $T = 180$ и 212K , составляют $N_{i180} \approx 8 \cdot 10^{11}$ и $N_{i212} \approx 7.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Считая концентрацию на уровне $EH6/7$ приблизительно равной $N_{Z1/Z2} \approx 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, найдем, что суммарная концентрация акцепторных центров, N_t^Σ , наблюдающихся в верхней половине запрещенной зоны при облучении при $T_i = 175^\circ\text{C}$ флюенсом $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, составила $N_t^\Sigma \approx 2.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, т.е. < 1% от исходной концентрации электронов в необлученном образце $n_0 = 3.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности радикального улучшения радиационной стойкости высоковольтных карбид-кремниевых диодов Шоттки по отношению к электронному облучению при поддержании повышенной температуры облучаемых диодов в пределах рабочего диапазона температур.

4. Заключение

Впервые исследовано влияние облучения электронами с энергией 0.9 МэВ, проведенного в рабочем диапазоне температур, на параметры высоковольтных 4H-SiC диодов Шоттки. Продемонстрировано, что облучение флюенсом, приводящим к изменению сопротивления базы в несколько раз при облучении при комнатной температуре, практически не сказывается на сопротивлении базы при облучении тем же флюенсом при предельной рабочей температуре (175°C). Тем не менее DLTS-измерения демонстрируют весьма заметный рост амплитуды пиков, соответствующих вводимым облучением акцепторным центрам. Установлено, что в случаях,

когда критическим параметром является радиационная стойкость, нагрев во время облучения до относительно невысокой температуры может кардинально повысить радиационную стойкость приборов.

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] R. Singh. *Microelectronics Reliability*, **46** (5–6), 713 (2006).
- [2] T. Nakamura, M. Sasagawa, Y. Nakano, T. Otsuka, M. Miura. *Int. Power Electronics Conf. (IPEC 2010)*, (Sapporo, Japan, June 21–24, 2010).
- [3] Q. Zhang, R. Callanan, M.K. Das, S. Ryu, A.K. Agarwal, J.W. Palmour. *IEEE Trans. Power Electron.*, **25** (12), 2889 (2010).
- [4] B.J. Baliga. *76th Device Research Conf. (DRC 2018)*, (Santa Barbara, California, USA, June 24–27, 2018) p. 31. doi: 10.1109/drc.2018.8442172
- [5] А.А. Лебедев, П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн, Е.Н. Мохов, С.С. Нагалок, А.Н. Анисимов, П.Г. Баранов. *УФН*, **189** (8), 803 (2019).
- [6] T. Dalibor, G. Pensl, H. Matsunami, T. Kimoto, W.J. Choyke, A. Schoner, N. Nordell. *Phys. Status Solidi A*, **162**, 199 (1997).
- [7] H. Kaneko, T. Kimoto. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 262106 (2011).
- [8] A. Castaldini, A. Cavallini, L. Rigutti, F. Nava. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 3780 (2004).
- [9] E. Omotoso, W.E. Meyer, F.D. Auret, A.T. Paradzah, M. Diale, S.M.M. Coelho, P.J. Janse van Rensburg. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **39**, 112 (2015).
- [10] P. Hazdra, Jan Vobecký. *Phys. Status Solidi A*, **216**, 1900312 (2019).
- [11] А.А. Лебедев, В.В. Козловский, М.Е. Левинштейн, А.Е. Иванов, К.С. Давыдовская, В.С. Юфев, А.В. Zubov. *Radiation Phys. Chem.*, **185**, 109514 (2021).
- [12] А. А. Лебедев, В.В. Козловский, К.С. Давыдовская, М.Е. Левинштейн. *Materials*, **14**, 4976 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14174976>
- [13] А.А. Лебедев, В.В. Козловский, М.Е. Левинштейн, Д.А. Малевский, Г.А. Оганесян, А.М. Стрельчук, К.С. Давыдовская. *ФТП*, **56** (4), 441 (2022).
- [14] <https://datasheetspdf.com/datasheet/CPW3-0600S002.html>
- [15] <https://datasheetspdf.com/datasheet/CPW3-1700S010.html>
- [16] Р.А. Иванов, М.Е. Левинштейн. *Microelectron. Reliab.*, **122**, 114159 (2021).
- [17] М.Е. Левинштейн, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur (eds). *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* (John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 2001).
- [18] В.В. Козловский, А.А. Лебедев, В.Н. Ломасов, Е.В. Богданова, Н.В. Середова. *ФТП*, **48** (8), 1033 (2014).
- [19] В.В. Козловский, А.А. Лебедев, Е.В. Богданова. *J. Appl. Phys.*, **117**, 155702 (2015).

- [20] J. Vobecký, P. Hazdra, S. Popelka, R.K. Sharma. IEEE Trans. Electron Dev., **62** (6), 1964 (2015).
[21] K. Danno, T. Kimoto. J. Appl. Phys., **100**, 113728 (2006).

Редактор Г.А. Оганесян

Electron irradiation hardness of high-voltage 4H-SiC Schottky diodes in the operating temperature range

A.A. Lebedev¹, V.V. Kozlovski², M.E. Levinshtein¹,
D.A. Malevsky¹, R.A. Kuzmin¹

¹ Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract Effect of irradiation with 0.9 MeV electrons on the parameters of 4H-SiC Schottky diodes with a limiting blocking voltage U_b of 600 and 1700 V was studied for the first time in the range of operating temperatures T_i (23 and 1750°C). The range of fluences Φ was $1 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ for devices with $U_b = 600 \text{ V}$ and $5 \cdot 10^{15} - 1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ for devices with $U_b = 1700 \text{ V}$. Irradiation at room temperature increases significantly the differential resistance of the base of the diodes. Irradiation with the same doses at $T_i = 175^\circ\text{C}$ i.e. at limiting operating temperature of devices, does not affect practically the parameters of current-voltage characteristics. Nevertheless, the DLTS spectra demonstrate a significant increase in the concentration of deep levels in the upper half of the band gap not only after irradiation at room temperature, but also after irradiation at $T_i = 175^\circ\text{C}$.