

Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре 83 К, на характеристики кремниевых фотоэлектрических структур

© Н.М. Богатов¹, Л.Р. Григорьян¹, А.И. Коваленко¹, М.С. Коваленко¹, Ф.А. Колоколов^{1,2}, Л.С. Лунин³

¹ Кубанский государственный университет,
350040 Краснодар, Россия

² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
125047 Москва, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
344006 Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru, bogatov.n@inbox.ru

Поступила в Редакцию 30 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 30 сентября 2019 г.

Принята к публикации 2 октября 2019 г.

Облучение низкоэнергетическими протонами приводит к изменению электрофизических, оптических и других свойств поверхностной области полупроводниковых структур, что создает дополнительные возможности модификации полупроводниковых приборов. Работа посвящена изучению влияния радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре образцов 83 К, на свойства двусторонних кремниевых фотоэлектрических структур с диффузионным $n^+ - p$ -переходом. Образцы $n^+ - p - p^+$ -типа облучались потоком протонов с дозой 10^{15} см^{-2} и энергией 40 либо 180 кэВ. Для объяснения наблюдаемых закономерностей изменения параметров вольт-амперных характеристик и коэффициентов пропускания рассчитано распределение среднего числа межузельного кремния, вакансий, дивакансий и областей разупорядочения, созданных при этих условиях на единице длины проективного пробега одним протоном в диффузионном слое и области пространственного заряда $n^+ - p$ -перехода. Показано, что протоны с начальной энергией 40 кэВ преимущественно изменяют физические свойства слоя с высокой концентрацией доноров, а протоны с начальной энергией 180 кэВ — свойства области пространственного заряда в слое, содержащем акцепторы. Количество радиационных дефектов в максимуме пространственного распределения в n -области много меньше, чем в p -области.

Ключевые слова: радиационные дефекты, протоны, кремний, $n - p$ -переход, вольт-амперная характеристика, спектр пропускания.

DOI: 10.21883/FTP.2020.02.48909.9255

1. Введение

Образование радиационных дефектов влияет на физические процессы в полупроводниках и изменяет параметры полупроводниковых приборов. Процессы деградации фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) при облучении протонами исследуются для энергии протонов $E_p \geq 1 \text{ МэВ}$ [1–3], что соответствует условиям космоса. Радиационные дефекты в кремнии обладают электрической и рекомбинационной активностью. Увеличение их концентрации изменяет концентрацию и время жизни электронов и дырок, поэтому изменяются электрические характеристики $n - p$ -переходов [4]. Облучение полупроводниковых структур низкоэнергетическими протонами изменяет свойства поверхностной области на глубине от 0.1 мкм до 1 мм [5]. Низкоэнергетическая составляющая в распределении энергии протонов, прошедших защитное покрытие ФЭП, присутствует в условиях космоса, кроме того, на определенных участках орбиты облучение происходит при низких температурах. Изучение процесса формирования радиационных дефектов при облучении низкоэнергетическими протонами обладает как научной, так и практической значимостью [6–8].

В работе [7] проанализировано образование радиационных дефектов в кремнии при бомбардировке протонами с энергией 1–10 МэВ. Показано, что в результате разделения пар Френкеля образуются точечные дефекты: вакансии и межузельные атомы, а в каскаде смещенных атомов Si появляются наноразмерные области с высокой плотностью вакансий — области разупорядочения. В работе [9] показано, что при бомбардировке электронами наноразмерные области разупорядочения образуются, если атом Si получает от налетающей частицы кинетическую энергию более 7 кэВ, что согласуется с данными по нейтронному облучению, приведенными в работе [7]. Области разупорядочения являются причиной изменения электрофизических свойств кремниевых кристаллов, облученных протонами и электронами с высокой энергией [10]. Существование наноразмерных областей разупорядочения в кремнии, облученном электронами с энергией 27 МэВ и нейтронами с энергией 1 МэВ зарегистрировано методом просвечивающей электронной микроскопии в работе [11]. Таким образом, области разупорядочения в кремнии образуются при облучении протонами, электронами, нейтронами, если

выбитый из узла решетки атом создает каскад смещений, содержащий большое число вакансий.

В работе [8] показано, что в максимуме распределения значение числа радиационных дефектов, созданных в слое n -типа проводимости протонами с энергией $E_p = 40$ кэВ, при температуре образцов $T_p = 83$ К значительно меньше, чем при $T_p = 300$ К. Протоны с энергией $E_p = 40$ кэВ не создают области разупорядочения. В данной работе для создания областей разупорядочения в поверхностном слое кремния n^+ -типа проводимости использована энергия протонов $E_p = 180$ кэВ, а для уменьшения вклада радиационных дефектов в этом слое облучение проводилось при температуре образцов $T_p = 83$ К.

Цель работы — изучение влияния радиационных дефектов на электрофизические и оптические свойства кремниевых фотоэлектрических структур $n^+ - p - p^+$ -типа с двусторонней чувствительностью, облученных низкоэнергетическими протонами при температуре образцов 83 К.

2. Эксперимент

Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) и коэффициенты пропускания в ИК-области спектра ФЭП $n^+ - p - p^+$ -типа из кремния, выращенного методом Чохральского, площадью 1 см^2 , толщиной 200 мкм , с удельным сопротивлением базы p -типа проводимости $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и концентрацией равновесных дырок $p_0 \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$, глубиной диффузионных $n^+ - p$ - и изотипного $p - p^+$ -переходов $d_n \approx d_p \approx 0.45 \text{ мкм}$. У поверхности концентрация фосфора была $N_p \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$, а бора — $N_B \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Облучение проводилось со стороны поверхности n^+ -типа потоком протонов с дозой $F_p = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и энергией $E_p = 180$ кэВ либо $E_p = 40$ кэВ и при температуре образцов $T_p = 83$ К на имплантере Extrion/Varian. После облучения образцы выдерживались в темноте при комнатной температуре длительное время для достижения стационарного распределения радиационных дефектов.

Темновые ВАХ исследуемых ФЭП получены с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1 при температуре $T = 300$ К (рис. 1). Анализировалось изменение параметров ВАХ в результате облучения потоком протонов.

Экспериментальные ВАХ аппроксимировались одноэкспоненциальной моделью

$$I(U) = I_0 \left(\exp \left\{ \frac{e(U - IR_s)}{akT} \right\} - 1 \right) + \frac{U - IR_s}{R_{sh}}. \quad (1)$$

В (1) параметры I_0 — обратный ток насыщения, a — коэффициент неидеальности $n - p$ -перехода, R_s — сосредоточенное последовательное сопротивление, R_{sh} — шунтирующее сопротивление определялись в результате аппроксимации измеренных зависимостей $I(U)$, k — постоянная Больцмана.

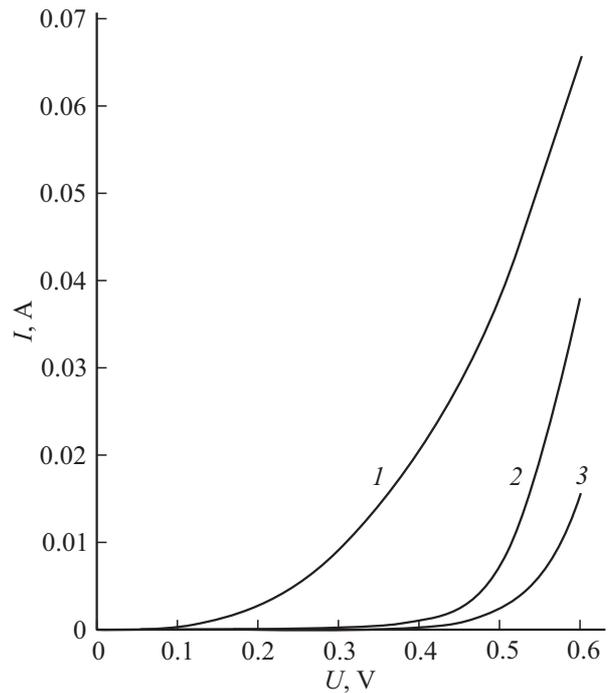


Рис. 1. ВАХ кремниевых ФЭП: 1 — $E_p = 180$ кэВ, 2 — $E_p = 40$ кэВ; 3 — необлученный ФЭП.

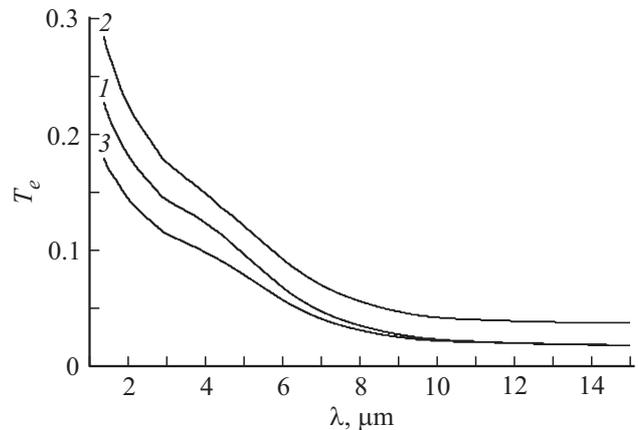


Рис. 2. Спектры пропускания кремниевых ФЭП: 1 — $E_p = 180$ кэВ, 2 — $E_p = 40$ кэВ; 3 — необлученный ФЭП.

Измерение ИК-спектров пропускания $T_e(\lambda)$ проводилось при температуре $T = 300$ К на спектрометре BRUKER VERTEX 70 в диапазоне длин волн λ от 1.3 до 27.1 мкм. Экспериментальные зависимости спектра пропускания $T_e(\lambda)$ исследуемых ФЭП показаны на рис. 2. Измеренные значения $T_e(\lambda)$ для $n^+ - p - p^+$ -структур существенно ниже, чем для нелегированного кремния, выращенного методом Чохральского, следовательно, основной вклад в поглощение ИК-излучения дают сильно легированные области.

Анализировалось изменение коэффициента поглощения α_c свободными носителями заряда в n -области вследствие облучения протонами. Для определения

вкладов основных механизмов рассеяния носителей заряда легированной области в α_c использовалась методика из работы [8]: экспериментальная зависимость

$$t_e(\lambda) = -\ln(T_e(\lambda))$$

аппроксимировалась теоретической

$$t(\lambda) = C_0 \frac{(C_{n,o}\lambda + C_a\lambda^{1/2} + C_i\lambda^{5/2})\lambda}{[1 + (C_{n,o}\lambda + C_a\lambda^{1/2} + C_i\lambda^{5/2})^2]} + \alpha_0. \quad (2)$$

В (2) параметры аппроксимации имеют следующий смысл: значение C_0 пропорционально концентрации носителей заряда n_c ; вклады механизмов рассеяния свободных носителей заряда характеризуют коэффициенты $C_{n,o}$ — на нейтральных примесях и оптических фонах, C_a — на акустических фонах, C_i — на ионизованных примесях; значение α_0 определяется процессами, не связанными с рассеянием свободных носителей заряда. Считаем, что $\alpha_0 \approx \text{const}$.

3. Результаты и их обсуждение

Низкоэнергетические протоны создают дефекты в поверхностной области. На рис. 3 показано рассчитанное с помощью моделей [12,13] распределение в диффузионном слое n^+ - p -перехода среднего числа первичных радиационных дефектов (ПРД), созданных на единице длины проективного пробега одним протоном при температуре облучения образцов $T_p = 83$ К: G_{Si} — межзельного кремния, G_V — вакансий, G_W — дивакансий, G_{do} — областей разупорядочения.

В работе [13] показано, что в высоколегированном кремнии n -типа проводимости значения G_{Si} , G_V , G_W возрастают с уменьшением концентрации доноров, поэтому в расчетах учитывалась неоднородность распределения концентрации доноров в диффузионном слое:

$$N_D(x) = N_p \operatorname{erfc}(x/d_{0n}).$$

При значении $d_{0n} = 0.32d_n$ глубина диффузионного n^+ - p -перехода равна 0.45 мкм.

Протоны с энергией $E_p = 180$ кэВ (рис. 3) создают области разупорядочения (ОР) на глубине менее 0.25 мкм в n^+ -области, а межзельный кремний Si_I , вакансии V , дивакансии W — на глубине 1.51 мкм во всей области пространственного заряда (ОПЗ) n^+ - p -перехода с максимумом распределения (пик Брэгга) при $x = 1.48$ мкм, попадающим на границу ОПЗ и области p -типа, в которой концентрация акцепторов $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Металлургическая граница n - p -перехода расположена при $x = 0.45$ мкм, поэтому при $x \geq 0.45$ мкм значения G_{Si} , G_V , G_W возрастают до своего максимального значения.

На поверхности $x = 0$ рассчитанное значение среднего радиуса ОР $R_{do} = 15$ нм [14]. В поверхностном слое толщиной $2R_{do}$ протоны с $E_p = 180$ кэВ и $F_p = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ создают ОР с поверхностной плотностью

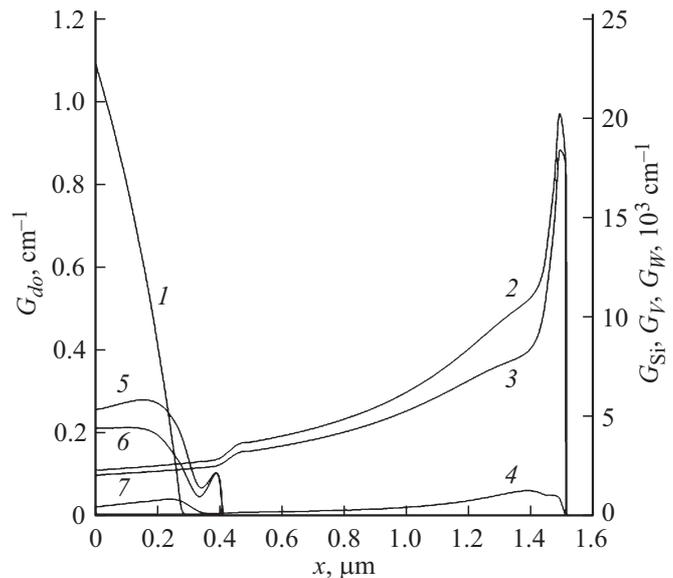


Рис. 3. Распределение среднего числа ПРД, созданных на единице длины проективного пробега одним протоном. $E_p = 180$ кэВ: 1 — G_{do} , 2 — G_{Si} , 3 — G_V , 4 — G_W ; $E_p = 40$ кэВ: 5 — G_{Si} , 6 — G_V , 7 — G_W .

$\sigma_{do} = 3.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Доля площади поверхности, занятая ОР, составляет 2.3%.

Протоны с энергией $E_p = 40$ кэВ (рис. 3) не создают области разупорядочения, а Si_I , V , W распределены в области n -типа проводимости, где их концентрация превышает более чем в 2 раза количество аналогичных дефектов, созданных протонами с энергией $E_p = 180$ кэВ. Пик Брэгга для протонов с $E_p = 40$ кэВ при температуре облучения образцов $T_p = 83$ К не является абсолютным максимумом, так как расположен в области с высокой концентрацией доноров $N_D = 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $x = 0.39$ мкм. В этом случае значения G_{Si} , G_V , G_W зависят от температуры облучения образцов [12,13]. Различное распределение радиационных дефектов, созданных протонами с $E_p = 180$ и 40 кэВ, проявляется в электрофизических и оптических свойствах исследуемых ФЭП.

Рассчитанные по модели (1) параметры ВАХ (рис. 1) приведены в табл. 1. Значение коэффициента неидеальности n - p -перехода $a = 1.6$ для необлученного ФЭП № 3 свидетельствует о том, что основной вклад в силу тока I в диапазоне напряжений $U < 0.6$ В дает ОПЗ n^+ - p -перехода [15].

Облучение протонами с $E_p = 40$ кэВ приводит к изменению параметров n -области: уменьшаются время жизни и диффузионная длина дырок. Вторичные радиационные дефекты (ВРД) акцепторного типа компенсируют основные донорные примеси, что приводит к уменьшению концентрации электронов проводимости. Следствием этого является увеличение вклада диффузионной n^+ -области в силу тока I , что подтверждается уменьшением результирующего коэффициента неидеальности n - p -перехода [15], поэтому для ФЭП № 2 $a = 1.2$.

Таблица 1. Параметры ВАХ

ФЭП	I_0 , А	a	R_s , Ом	R_{sh} , Ом
1	$1.6 \cdot 10^{-4}$	2.6	3.1	$1.2 \cdot 10^5$
2	$1.6 \cdot 10^{-9}$	1.2	2.3	$1.1 \cdot 10^5$
3	$1.6 \cdot 10^{-8}$	1.6	4.2	$3.4 \cdot 10^5$

Таблица 2. Параметры модели поглощения свободными носителями заряда

ФЭП	C_0 , мкм ⁻¹	$C_{n,o}$, мкм ⁻¹	C_a , мкм ^{-1/2}	C_i , мкм ^{-5/2}	α_0	λ_c , мкм
1	0.5	0.03	0.2	0.001	1.37	14.06
2	0.48	0.026	0.35	0.001	1.07	19.12
3	0.52	0.021	0.37	0.0008	1.47	21.37

ВРД, созданные протонами с $E_p = 180$ кэВ, нарушают структуру ОПЗ $n^+ - p$ -перехода и уменьшают время жизни носителей заряда, что приводит к существенному увеличению вклада ОПЗ в обратный ток насыщения I_0 и коэффициента неидеальности $n - p$ -перехода $a = 2.6$ у ФЭП № 1.

Протоны с энергией $E_p = 40$ кэВ в большей степени уменьшают значение R_s , чем протоны с $E_p = 180$ кэВ, так как поглощаются в поверхностной области и уменьшают поверхностное сопротивление. У облученных ФЭП № 1 и 2 значение R_{sh} меньше, чем у необлученного № 3, вследствие увеличения плотности поверхностных состояний на торцах под действием протонов.

Результаты анализа ИК-спектров пропускания (рис. 2) приведены в табл. 2. Коэффициент C_0 отражает уменьшение концентрации электронов в n^+ -области у облученных ФЭП, поэтому значение C_0 для ФЭП № 2 меньше, чем для ФЭП № 1.

Сравнение коэффициентов $C_{n,o}$, C_a , C_i показывает, что поглощение свободными носителями заряда с рассеянием на акустических фононах является преобладающим механизмом при $\lambda < \lambda_c$, так как $C_a \lambda^{1/2} > C_i \lambda^{5/2}$. Процесс поглощения с рассеянием на ионизованных центрах доминирует при $\lambda > \lambda_c$. У облученных ФЭП вклад рассеяния электронов на нейтральных и ионизованных дефектах в поглощение больше, чем у необлученного, вследствие образования ВРД. У ФЭП № 1 значение коэффициента $C_{n,o}$ больше, а C_a меньше, чем у ФЭП № 2, что может быть обусловлено влиянием областей разупорядочения.

Превышение коэффициента пропускания $T_e(\lambda)$ ФЭП № 2 во всем исследуемом спектральном диапазоне по отношению к ФЭП № 1 и 3 обусловлено не только уменьшением вклада в поглощение электронов n^+ -области, но и изменением оптических свойств поверхности, проявляющихся в уменьшении коэффициента α_0 .

Таким образом, электрофизические и оптические свойства исследованных ФЭП подтверждают закономерности радиационного дефектообразования, полученные

в результате моделирования процесса взаимодействия протонов с кремнием n - и p -типа проводимости.

4. Заключение

В кремниевом ФЭП с глубиной диффузионного $n^+ - p$ -перехода 0.45 мкм протоны с энергией 180 кэВ создают ОР в поверхностном слое толщиной 0.25 мкм с высокой концентрацией доноров, а атомы межузельного кремния, вакансии, дивакансии — в слое толщиной 1.51 мкм. Протоны с энергией 40 кэВ создают Si_I , V , W в слое толщиной 0.41 мкм. При температуре облучения образцов 83 К количество ПРД в пике распределения в конце проективного пробега протона с $E_p = 40$ кэВ оказывается много меньше, чем для протона с $E_p = 180$ кэВ, что обусловлено различием процессов разделения пар Si_I , V в кремнии n - и p -типа проводимости [13]. Облучение протонами с $E_p = 180$ кэВ изменяет физические свойства высоколегированного слоя n -типа и всей ОПЗ $n^+ - p$ -перехода. Протоны с $E_p = 40$ кэВ изменяют свойства слоя n -типа, не воздействуя на всю ОПЗ, если глубина залегания $n^+ - p$ -перехода превышает среднюю длину проективного пробега протона.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук Ю.А. Агафонова, В.И. Зиненко за облучение образцов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Южного научного центра Российской академии наук на 2020 г., № государственной регистрации проекта 01201354240, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-08-00108).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Paulescu, D. Vizman, M. Lascu, R. Negrila, M. Stef. AIP Conf. Proceedings, **1796**, 040010 (2017).
- [2] S. Park, J.C. Bourgoïn, H. Sim, C. Baur, V. Khorenko, O. Cavani, J. Bourcois, S. Picard, B. Boizot. Progr. Photovolt. Res. Appl., **26**, 778 (2018).
- [3] O.A. Oraby, M.F. El-Kordy, H.T. El-Madany, F.H. Fahmy. Int. J. Sci., Engin. Technol. Res. (IJSETR) **3**, 173 (2014).
- [4] P.A. Iles. Solar Energy Mater. Solar Cells, **68**, 1 (2001).
- [5] В.А. Козлов, В.В. Козловский. ФТП, **35**, 769 (2001).
- [6] V.V. Kozlovski, A.A. Lebedev, V.V. Emtsev, G.A. Oganessian. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **384**, 100 (2016).
- [7] V.V. Kozlovski, A.E. Vasil'ev, A.A. Lebedev. J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techn., **10**, 693 (2016).

- [8] Y.A. Agafonov, N.M. Bogatov, L.R. Grigorian, V.I. Zinenko, A.I. Kovalenko, M.S. Kovalenko, F.A. Kolokolov. *J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techn.*, **12**, 499 (2018).
- [9] H.N. Yeritsyan, A.A. Sahakyan, N.E. Grigoryan, V.V. Harutunyan, V.A. Sahakyan, A.A. Khachatryan. *J. Mod. Phys.*, **6**, 1270 (2015).
- [10] T. Pagava, L. Chkhartishvili. *Nano Res. Appl.*, **3**, 1 (2017).
- [11] I. Pintilie, L.C. Nistor, S.V. Nistor, A.C. Joita. *Proc. Science the 25th Int. Workshop on vertex detectors, September 26–30, Location La Biodola, Isola d'Elba, Italy*, **033**, 1 (2016).
- [12] Н.М. Богатов. *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.*, **8**, 66 (1999).
- [13] N.M. Bogatov, M.S. Kovalenko. *AASCIT J. Phys.*, **3**, 13 (2017).
- [14] Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, А.В. Кленевский, М.С. Коваленко. *Эколог. вестн. науч. центров Черноморского эконом. сотрудничества*, **16**, 59 (2019).
- [15] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. *Солнечные элементы: Теория и эксперимент* (М., Энергоатомиздат, 1987).

Редактор А.Н. Смирнов

Influence of radiation defects created by low-energy protons at 83 K temperature on the characteristics of silicon photoelectric structures

*N.M. Bogatov*¹, *L.R. Grigorian*¹, *A.I. Kovalenko*¹, *M.S. Kovalenko*¹, *F.A. Kolokolov*^{1,2}, *L.S. Lunin*³

¹ Kuban State University,
350040 Krasnodar, Russia

² D. Mendeleev University
of Chemical Technology of Russia,
125047 Moscow, Russia

³ Federal Research Center Southern Scientific Center
of Russian Academy of Sciences,
344006 Rostov-on-Don, Russia

Abstract Irradiation with low-energy protons leads to a change in the electrophysical, optical, and other properties of the surface region of semiconductor structures, which creates additional possibilities for modifying semiconductor devices. The work is devoted to the study of the effect of radiation defects created by low-energy protons at a sample temperature of 83 K on the properties of two-sided silicon photovoltaic structures with a diffusion $n^+ - p$ -junction. Samples of $n^+ - p - p^+$ -type were irradiated with a flux of protons with a dose of 10^{15} cm^{-2} an energy of 40 or 180 keV and. To explain the observed regularities in the variation of the parameters of the current-voltage characteristics and the transmission coefficients, the distribution of the average number of interstitial silicon, vacancies, divacancies, and disordering regions created under these conditions on the unit projective path length by one proton in the diffusion layer and the space charge region of the $n^+ - p$ -junction was calculated. It is shown that protons with an initial energy of 40 keV predominantly change the physical properties of a layer with a high concentration of donors, and protons with an initial energy of 180 keV are properties of the space-charge region in a layer containing acceptors. The number of radiation defects in the maximum spatial distribution in the n -region is much smaller than in the p -region.