

05.6;07.2

Исследования радиационной стойкости гетероструктурных кремниевых солнечных элементов

© В.С. Калиновский¹, Е.И. Теруков^{1,2}, К.К. Прудченко¹, А.А. Базелей², Е.В. Контрош¹,
И.А. Толкачев¹, А.А. Титов²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: prudchenkokk@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2023 г.

В окончательной редакции 7 июня 2023 г.

Принято к публикации 8 июня 2023 г.

Исследована радиационная стойкость разных типов гетероструктурных кремниевых солнечных элементов при облучении электронами с энергией 1 MeV в диапазоне флюенсов $2.5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Исследования показали, что наименьшую деградацию токов „насыщения“ диффузионного механизма токопрохождения с $J_{0d} \leq 5 \cdot 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ до $J_{0d} \leq 3 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ и КПД с 19.2 до 13.6% (AM0, 1367 W/m²) имели образцы структур $n\text{-}\alpha\text{-Si:H/c-p(Ga)/p}\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ и $n\text{-}\mu\text{-c-Si:H/c-p(Ga)/p}\text{-}\alpha\text{-Si:H}$. Полученные результаты позволяют оценить перспективы применения гетероструктурных кремниевых солнечных элементов для низкоорбитальных космических аппаратов.

Ключевые слова: гетероструктурные кремниевые солнечные элементы, токи „насыщения“, КПД, радиационная стойкость, электроны с энергией 1 MeV, низкоорбитальная спутниковая связь.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.16.55962.19573

Обеспечение надежного доступа к высокоскоростному широкополосному интернету из любой точки страны, в особенности там, где на данный момент отсутствует надежная связь, можно осуществить за счет перехода к глобальной низкоорбитальной спутниковой связи (НСС). Космические аппараты НСС обеспечиваются электрической энергией солнечными батареями. Разработка космических солнечных элементов (СЭ) на кремнии была прекращена в 1990-х годах, и все внимание переключилось на СЭ A_3B_5 . Тем не менее в настоящее время кремниевые СЭ, особенно для НСС, снова становятся привлекательными благодаря их материально-технической доступности и относительно низкой стоимости при достаточной производительности. Теоретические оценки предсказывают эффективность кристаллических кремниевых солнечных элементов $\leq 26\%$ (AM0) [1]. Существенным потенциалом обладают кремниевые СЭ с гетеропереходом (heterojunction technology solar cells) — НТ СЭ. В лучших образцах НТ СЭ достигнут КПД более 26% (AM1.5, 1000 W/m²) [2–4]. За счет использования низких температур роста пассивирующих слоев аморфного кремния НТ СЭ достигают более высоких значений напряжения холостого хода (до 750 mV) и меньших значений температурных коэффициентов ($< 0.3\% / ^\circ\text{C}$), что является большим преимуществом перед PERC (passivated emitter rear cell) и IBC (interdigitated back contact cells) технологиями кремниевых СЭ [5–7].

Радиационные дефекты — смещения атомов, вызванные облучением, являются основной причиной деградации космических СЭ. В результате ухудшаются фото-

электрические параметры: ток короткого замыкания I_{sc} , напряжение холостого хода U_{oc} , фактор заполнения (fill factor) FF , снижаются вырабатываемая электрическая мощность P_{max} , КПД и срок активного существования СЭ на орбите. Вопросы резистивности НТ СЭ к радиационному облучению еще недостаточно изучены. В работах [1,8] дана оценка радиационной стойкости НТ СЭ n -типа, а путем к увеличению их резистивности является использование кремния p -типа из-за меньшего значения коэффициента повреждения [9]. С целью определения наиболее эффективной и радиационно-стойкой структуры проведена оценка устойчивости шести различных типов НТ СЭ к радиационному облучению электронами с энергией 1 MeV в диапазоне флюенсов $2.5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, что эквивалентно нахождению СЭ на околоземных орбитах [10].

Образцы НТ СЭ (рис. 1) создавались на подложках кристаллического кремния ($c\text{-Si}$) n - или p -типа толщиной $\sim 125 \mu\text{m}$, полученных методом Чохральского, с легированием фосфором, галлием или бором с концентрацией носителей заряда $\leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. На подложки с двух сторон осаждались слои нелегированного аморфного кремния ($i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$) толщиной до 10 nm, затем $n\text{-}\alpha\text{-}$ (или $n\text{-}\mu\text{-c-}$) и $p\text{-}\alpha\text{-}$ слои толщиной 10–20 nm и слои оксида индия-олова (ИТО) толщиной 100 nm. На $c\text{-Si}$ p -типа $p\text{-}n$ -переход формировался с фронтальной стороны, а на $c\text{-Si}$ n -типа — с тыльной стороны (конфигурация „заднего эмиттера“) [5]. Серебряные контактные шины шириной $40 \mu\text{m}$ с шагом 1.2 mm наносились методом трафаретной печати. Исследуемые структуры НТ СЭ различались лигатурой $c\text{-Si}$ и аморфным либо микрокри-

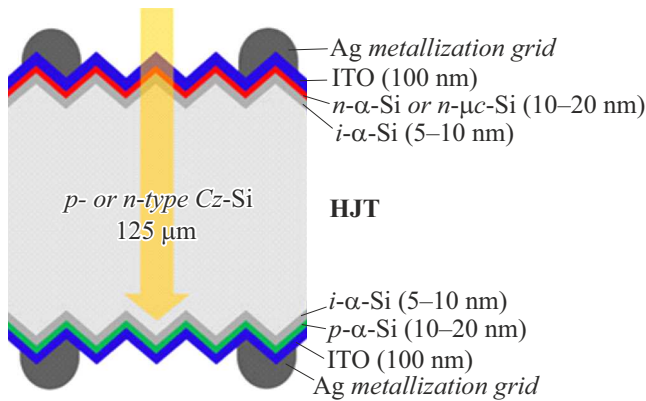


Рис. 1. Структура образцов НТ СЭ с базой *n*- или *p*-типа.

сталлическим *n*-фронтальными слоями. Исследовались образцы площадью 1 cm^2 , вырезанные из НТ СЭ размером $15.6 \text{ cm} \times 15.6 \text{ cm}$, без последующей пассивации боковых поверхностей.

Радиационное облучение осуществлялось на воздухе при комнатной температуре с фронтальной стороны при двухкоординатном сканировании СЭ пучком электронов ($J_e = 12.5 \mu\text{A/cm}^2$, $E_e = 1.0 \pm 0.1 \text{ MeV}$) флюенсами $F_e = 2.5 \cdot 10^{14}$, $5 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ на установке РТЭ-1В. Ток электронного пучка ускорителя в процессе облучения образцов был постоянным и контролировался прибором GDM-8246. Поток электронов, интенсивность и время экспозиции выбирались такими, чтобы отсутствовал температурный отжиг образцов в процессе облучения. Для идентификации НТ СЭ с лучшими параметрами и радиационной стойкостью были выполнены измерения и анализ темновых, световых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектральных характеристик до и после электронного облучения. Темновые ВАХ были измерены с использованием высокоточного источника-измерителя в диапазоне токов $1 \text{ pA} - 1 \text{ A}$ и напряжений $0 - 2 \text{ V}$. Световые ВАХ измерялись при засветке коллимированным световым потоком на импульсном имитаторе со спектром излучения АМ0 и плотностью энергии 1367 W/m^2 . Спектральные характеристики измерялись на установке, созданной на базе монохроматора (М266) с галогеновой лампой ($300 - 2000 \text{ nm}$) и кремниевым контрольным элементом.

Анализ экспериментальных прямых темновых ВАХ всех типов НТ-структур до и после облучения выполнялся по методике, изложенной в работе [11]. Метод заключается в представлении темновой ВАХ совокупностью экспоненциальных участков, соответствующих механизмам токопрохождения: туннельно-ловушечному, „избыточному“ с диодным коэффициентом идеальности $A_i > 2$ (Esaki), рекомбинационному с $A_r = 2$ (Sah–Noyce–Shockley), диффузионному с $A_d = 1$ (Shockley). Наименьшие значения токов „насыщения“ были получены на образцах *n*-типа структуры *E* (исследуемые структуры представлены в

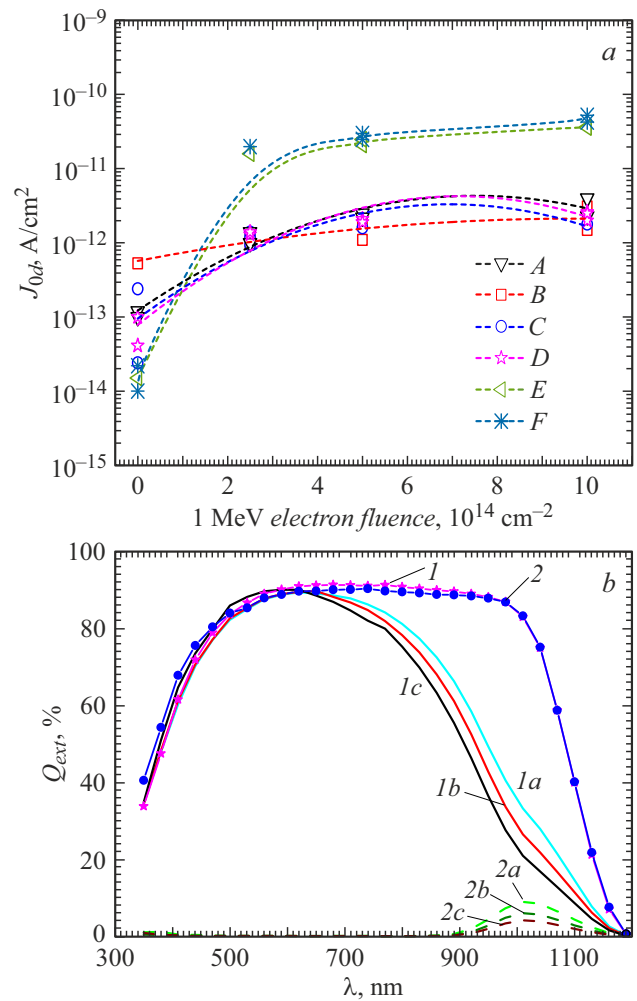


Рис. 2. *a* — зависимости тока насыщения J_{0d} диффузионного механизма токопрохождения от флюенса электронов с энергией 1 MeV , рассчитанного из экспериментальных темновых ВАХ, для НТ СЭ структур *A–F* (см. таблицу); *b* — спектральные характеристики НТ СЭ структур *D* (кривые *1*, *1a*, *1b*, *1c*) и *E* (кривые *2*, *2a*, *2b*, *2c*) при облучении флюенсами 0 (*1*, *2*), $2.5 \cdot 10^{14}$ (*1a*, *2a*), $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (*1b*, *2b*) и $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (*1c*, *2c*).

таблице). После облучения электронами с энергией 1 MeV флюенсами $2.5 \cdot 10^{14}$, $5 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ образцы исследуемых структур деградируют с ростом токов насыщения (см. рис. 2, *a* и таблицу). Аналогичная деградация НТ СЭ *n*-типа с преимущественным изменением диффузионной составляющей тока ранее была показана при облучении электронами с энергией 3.8 MeV в работе [8]. Диффузионный ток насыщения для образцов *n*-Si после облучения в среднем более чем на порядок выше, чем для образцов *p*-Si (рис. 2, *a*).

Влияние облучения электронами с энергией 1 MeV на деградацию спектральных характеристик НТ СЭ структур *D* и *E* показано на рис. 2, *b*. Деградация длинноволнового края внешней квантовой эффективности СЭ структуры *D* с ростом флюенса объясняется уменьшени-

ем диффузионной длины неосновных носителей заряда. В случае образцов структуры *E* мы наблюдаем практически полную деградацию, что объясняется прежде всего тыльным расположением *p-n*-перехода.

В результате измерений световых ВАХ наблюдалось снижение значений фотоэлектрических параметров с ростом флюенса электронов для всех рассматриваемых НТ СЭ. Наименьшей деградацией КПД в абсолютных значениях при максимальном флюенсе $F_e = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ обладали образцы структур *C* и *D* (см. рис. 3 и таблицу).

Структуры *A* и *B* имели более низкие значения КПД, чем структуры *C* и *D*, что, вероятнее всего, связано с возникновением и активацией под воздействием света объемных дефектов, кислородных комплексов бора [12].

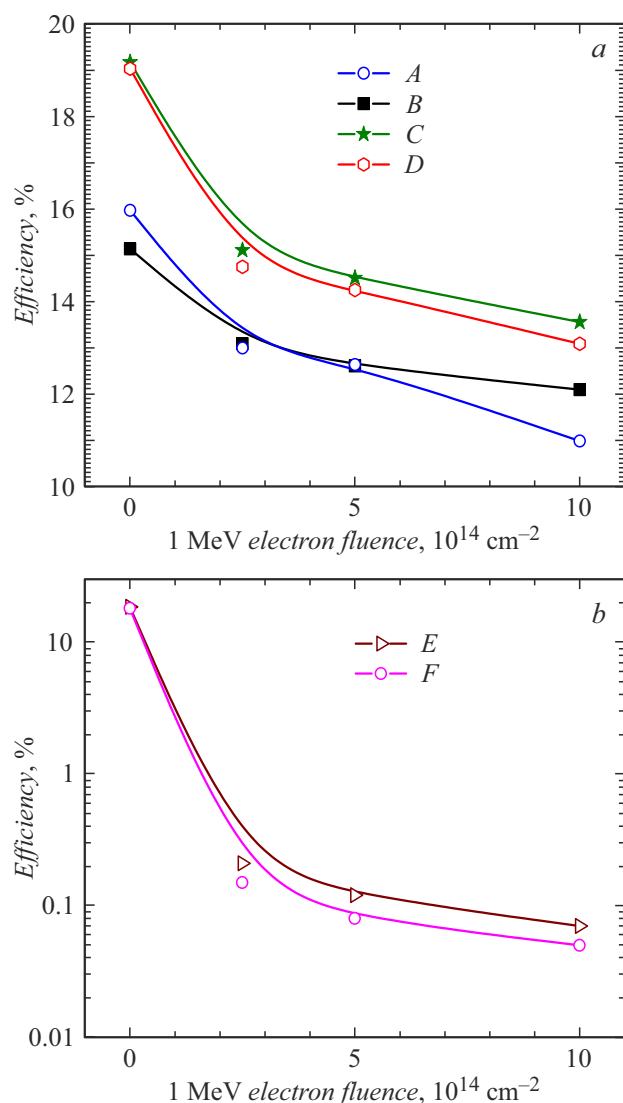


Рис. 3. Зависимости КПД структур НТ СЭ (см. таблицу) от флюенса облучения электронами с энергией 1 MeV (AM_0 , 136 mW/cm^2 , 300 K). *a* — структуры *A–D*, *b* — структуры *E, F*.

Исследуемые структуры *A–F* (рис. 1)

Обозначение	Структура
<i>A</i>	<i>n</i> - α -Si:H/ <i>c-p</i> (B)/ <i>p</i> - α -Si:H
<i>B</i>	<i>n</i> - μ c-Si:H/ <i>c-p</i> (B)/ <i>p</i> - α -Si:H
<i>C</i>	<i>n</i> - α -Si:H/ <i>c-p</i> (Ga)/ <i>p</i> - α -Si:H
<i>D</i>	<i>n</i> - μ c-Si:H/ <i>c-p</i> (Ga)/ <i>p</i> - α -Si:H
<i>E</i>	<i>n</i> - α -Si:H/ <i>c-n</i> (P)/ <i>p</i> - α -Si:H
<i>F</i>	<i>n</i> - μ c-Si:H/ <i>c-n</i> (P)/ <i>p</i> - α -Si:H

Анализ проведенных исследований темновых, световых ВАХ и спектральных характеристик НТ СЭ структур *A–F* (см. таблицу) показал, что после облучения электронами с энергией 1 MeV в диапазоне флюенсов $2.5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ более радиационно-стойкими являются образцы СЭ структур, выращенные на подложках *p*-типа, причем наиболее стойкими и обладающими более высокими значениями КПД до и после облучения являются НТ СЭ структур *C* и *D*. После облучения электронами с энергией 1 MeV флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ они имели наименьший рост токов насыщения диффузионного механизма токопрохождения (с $J_{0d} < 5 \cdot 10^{-13} \text{ A/cm}^2$ до $J_{0d} < 3 \cdot 10^{-12} \text{ A/cm}^2$). Снижение внешней квантовой эффективности составило $< 25\%$ ($\lambda = 0.35 - 1.2 \mu\text{m}$), тока короткого замыкания $I_{sc} < 16\%$, напряжения холостого хода $U_{oc} < 19\%$ и КПД с ≤ 19.2 до $\leq 13.6\%$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Yamaguchi, K.-H. Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Okuno, M. Imaizumi, in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (IEEE, 2019), p. 2377. DOI: 10.1109/PVSC40753.2019.8981219
- [2] Y. Liu, Y. Li, Y. Wu, G. Yang, L. Mazzarella, P. Procel-Moya, A.C. Tamboli, K. Weber, M. Boccard, O. Isabella, X. Yang, B. Sun, Mater. Sci. Eng. R, **142** 100579 (2020). DOI: 10.1016/j.mser.2020.100579
- [3] W.M. Alkharasani, N. Amin, S.A. Shahahmadi, A.A. Alkahtani, I.S. Mohamad, P. Chelvanathan, T.S. Kiong, Materials, **15**, 3508 (2022). DOI: 10.3390/ma15103508
- [4] W. Long, S. Yin, F. Peng, M. Yang, L. Fang, X. Ru, M. Qu, H. Lin, X. Xu, Solar Energy Mater. Solar Cells, **231**, 111291 (2021). DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111291
- [5] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, in *High-efficient low-cost photovoltaics*. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Cham, 2020), vol. 140, p. 113–132. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4_7
- [6] M. Taguchi, ECS J. Solid State Sci. Technol., **10**, 025002 (2021). DOI: 10.1149/2162-8777/abdfb6
- [7] V. Kanneboina, Microelectron. Eng., **265**, 111884 (2022). DOI: 10.1016/j.mee.2022.111884

- [8] В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, Е.В. Контрош, В.Н. Вербицкий, А.С. Титов, Письма в ЖТФ, **44** (17), 95 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46576.17283 [V.S. Kalinovskii, E.I. Terukov, E.V. Kontrosh, V.N. Verbitskii, A.S. Titov, Tech. Phys. Lett., **44**, 801 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018090067].
- [9] M. Yamaguchi, S.J. Taylor, S. Matsuda, O. Kawaki, Appl. Phys. Lett., **68**, 3141 (1996). DOI: 10.1063/1.115804
- [10] A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering* (John Wiley & Sons, Ltd., 2003), p. 421.
- [11] А.А. Андреев, В.М. Андреев, В.С. Калиновский, П.В. Покровский, Е.И. Теруков, ФТП, **46** (7), 952 (2012). [A.A. Andreev, V.M. Andreev, V.S. Kalinovskiy, P.V. Pokrovskiy, E.I. Terukov, Semiconductors, **46**, 929 (2012). DOI: 10.1134/S1063782612070044].
- [12] B. Vicari Stefani, M. Kim, M. Wright, A. Soeriyadi, D. Andronikov, I. Nyapshaev, S. Abolmasov, K. Emtsev, A. Abramov, B. Hallam, Solar RRL, **5**, 2100406 (2021). DOI: 10.1002/solr.202100406