

Моделирование радиационной стойкости фотоэлектрического преобразователя на основе кремния

© 2025 г. А. А. Феклистова^{1,2,✉}, М. В. Рябцева¹, Е. С. Чуянова^{1,2}, Н. Т. Вагапова²

¹ АО «Научно–производственное предприятие «Квант»,
3–я Мытищинская ул., д. 16, Москва, 129626, Российская Федерация

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

✉ Автор для переписки: feklisova.sashaa@mail.ru

Аннотация. Представлена модель вольт–амперной характеристики фотоэлектрического преобразователя p –типа проводимости на основе c –Si с пассивированным эмиттером на тыльном контакте после облучения электронами с энергией 1 МэВ. Ионизирующее излучение вызывает дефекты в кристаллической решетке, увеличивая внутреннее сопротивление фотоэлектрического преобразователя. Установлено, что увеличение концентрации ловушек (энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводникового материала) приводит к уменьшению диффузионной длины неосновных носителей заряда, что, в свою очередь, снижает ток короткого замыкания и напряжение холостого хода, существенно влияя на эффективность и мощность фотоэлектрического преобразователя. Моделирование кривых деградации основывалось на предположении, что на диффузионную длину неосновных носителей заряда в базе и эмиттере фотоэлектрического преобразователя наибольшее влияние оказывает ионизирующее излучение при облучении электронами с энергией 1 МэВ в диапазоне флюенсов до 10^{15} см^{–2}, что по величине эквивалентно радиационным условиям эксплуатации солнечной батареи. Получены деградационные кривые основных электрических параметров фотоэлектрического преобразователя, включая напряжение холостого хода, тока короткого замыкания, последовательное и шунтирующее сопротивление. На основании рассчитанных кривых деградации тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, а также физических основ работы фотоэлектрического преобразователя выявлено, что напряжение холостого хода изменялось более значительно, в то время как ток короткого замыкания практически оставался постоянным. Анализ экспериментально полученных вольт–амперных характеристик показал, что на снижение максимальной мощности (24,8 %) влияет уменьшение шунтирующего и увеличение последовательного сопротивления. Сравнение модели и экспериментальных результатов показало погрешность не более 5,3 %. Таким образом, при оценке радиационной стойкости солнечных батарей частичная замена натурных радиационных испытаний фотоэлектрического преобразователя на моделирование позволит ускорить и удешевить работы.

Ключевые слова: малый космический аппарат, солнечная батарея, кремний, ионизирующее излучение, диффузионная длина, вольт–амперная характеристика

Для цитирования: Феклистова А.А., Рябцева М.В., Чуянова Е.С., Вагапова Н.Т. Моделирование радиационной стойкости фотоэлектрического преобразователя на основе кремния. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2025; 28(1): 5—14. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202412.628>

Simulation of Si-based solar cell radiation resistance

A. A. Feklistova^{1,2,✉}, M. V. Ryabceva¹, E. S. Chuyanov^{1,2}, N. T. Vagapova²

¹ JSC “Research–Production Enterprise “KVANT”,
16 3rd Mytishinskaya Str., Moscow 129626, Russian Federation

² National University of Science and Technology “MISIS”,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

✉ Corresponding author: feclistova.sashaa@mail.ru

Abstract. In this work, we developed an I–V curve model of *p*–type c–Si–based solar cell (SC) with a passivated emitter at the rear contact after irradiation with 1 MeV electrons. The I–V curve is one of the key output characteristics of SCs and solar panels (SPs), from which all the main electrical parameters can be obtained and the performance of the developed design can be evaluated. Radiation is high–energy particles, which, as a rule, cause defects in the crystal lattice, increasing the internal resistance of the SCs design. The resulting defects create energy levels in the forbidden zone of the semiconductor material that act as capture (traps) or recombination centers. An increase in the concentration of traps leads to a decrease in the minority carriers’ diffusion length, which in turn reduces short–circuit current (I_{sc}) and open–circuit voltage (U_{oc}), significantly affecting the efficiency and power of the SC. Modeling of the degradation curves was based on the assumption that the value of minority carriers’ diffusion lengths in the base and emitter of the SC are most affected by ionizing radiation, when exposed to electrons with energy of 1 MeV in the fluence range up to 10^{15} cm^{-2} , which is equivalent in magnitude to the radiation operating conditions of a solar panel (SP). The degradation curves of the main electrical parameters of the SC, including U_{oc} , series (R_{series}) and shunt resistances (R_{shunt}), were obtained. On the basis of the calculated degradation curves of I_{sc} and U_{oc} , as well as the physical basis of the SCs operation, it is revealed that U_{oc} changes more significantly, while I_{sc} practically does not change due to the small degradation of the minority carriers’ diffusion length in the emitter. The analysis of experimentally obtained I–V curves has shown that the degradation of its maximum power point (24.8%) is affected by the decrease of R_{shunt} and increase of R_{series} . Approbation of the I–V curve model based on experimental irradiation of Si–based SCs by electrons with the energy of 1 MeV showed an inaccuracy of no more than 5.3%. Thus, when assessing the radiation resistance of SP, partial replacement of full–scale radiation tests of SCs by modeling will allow to speed up and reduce the cost of work.

Keywords: smallsat, solar battery, silicon, ionizing radiation, diffusion length, I–V curve

For citation: Feklistova A.A., Ryabceva M.V., Chuyanov E.S., Vagapova N.T. Simulation of Si–based solar cell radiation resistance. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2025; 28(1): 5–14. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202412.628>

Введение

Современная космическая отрасль имеет тенденцию к созданию более компактных спутников — малых космических аппаратов (МКА), основным преимуществом которых является относительно небольшая стоимость и возможность легко их модифицировать для решения конкретных задач: мониторинг околоземного космического пространства, дистанционное зондирование Земли, интернет вещей широкополосной линии свя-

зи и др. [1]. Использование такого типа спутников (до 500 кг) позволяет облегчить запуск, обеспечить более плотную группировку для обеспечения непрерывного потока данных, а также снизить финансовые убытки космической миссии в случае частичного или полного отказа МКА [2, 3].

Первичным источником питания служебных систем и целевой аппаратуры МКА, как и большего космического аппарата, является солнечная батарея (СБ), которая для успешной реализации миссии должна генерировать требуемый уровень

электроэнергии на протяжении всего срока активного существования (САС) МКА. Характерной орбитой для эксплуатации МКА является низкая околоземная орбита [4]. Следовательно, СБ должна быть разработана таким образом, чтобы быть устойчивой к негативному воздействию факторов космического пространства данной орбиты.

Так как отличительной особенностью МКА является их низкая стоимость, малый САС (до 5—7 лет) и относительно небольшая мощность, то в качестве фотовосприимчивой электрогенерирующей части СБ целесообразно используются фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) на основе Si [5, 6].

Одним из факторов, ограничивающих функционирование СБ, является воздействие ионизирующего излучения. Поэтому важной задачей разработчиков МКА является прогнозирование радиационной стойкости СБ, в первую очередь ФЭП, являющихся наиболее критическими элементами конструкции СБ в условиях воздействия ионизирующего излучения. Сегодня для этой задачи применяются разные экспериментально-расчетные методы [7, 8], позволяющие получить изменение основных электрических параметров ФЭП в конце САС. Однако ни один из методов не позволяет построить полноценную вольт-амперную характеристику (ВАХ) ФЭП, необходимую для прогнозирования работы СБ в конце САС при разных режимах.

Цель работы анализ изменения шунтирующего $R_{\text{шунт}}$ и последовательного $R_{\text{послед}}$ сопротивления ФЭП в результате воздействия ионизирующего излучения и моделирование ВАХ ФЭП в конце САС МКА на базе проведенного анализа.

Методика моделирования

В качестве объекта исследования мы рассматривали промышленные образцы ФЭП на ба-

зе c-Si p-типа проводимости с пассивированным эмиттером на тыльном контакте. Конструкция и электрические параметры таких ФЭП рассмотрены в работах [9, 10].

Одной из ключевых выходных характеристик ФЭП и СБ, на базе которой можно получить все основные электрические параметры и оценить производительность разработанной конструкции, является ВАХ.

В настоящее время для моделирования ВАХ известно два основных подхода: однодиодная и двухдиодная модели. Обе модели построения ВАХ имеют допущение, что ток, протекающий через ФЭП, представляет собой суперпозицию двух токов, один из которых обусловлен смещением p—n-перехода, а другой — освещением. Однодиодная модель с высокой точностью воспроизводит выходные характеристики различных видов ФЭП в любых климатических условиях. При анализе эта модель предпочтительнее других, так как имеет меньше параметров и низкую вычислительную сложность [11].

Двухдиодная модель построения ВАХ учитывает больше компонентов и точнее отображает поведение ФЭП в условиях низкой освещенности. В целом эти модели достаточно точно коррелируют с экспериментальной ВАХ и для условий высокой освещенности допустимо применение однодиодной модели [12].

Основными компонентами эквивалентной схемы (рис. 1) модели построения ВАХ ФЭП являются источник тока, диод (p—n-переход), $R_{\text{шунт}}$ и $R_{\text{послед}}$. Под воздействием солнечного света ФЭП генерирует фототок, что моделирует источник тока. Шунтирующее сопротивление ФЭП обусловлено обратным сопротивлением p—n-перехода, а также наличием примесно-дефектных комплексов в полупроводниковой структуре ФЭП, шунтирующих p—n-переход. Последовательное сопротивление ФЭП характеризуется суммой сопротивлений всех

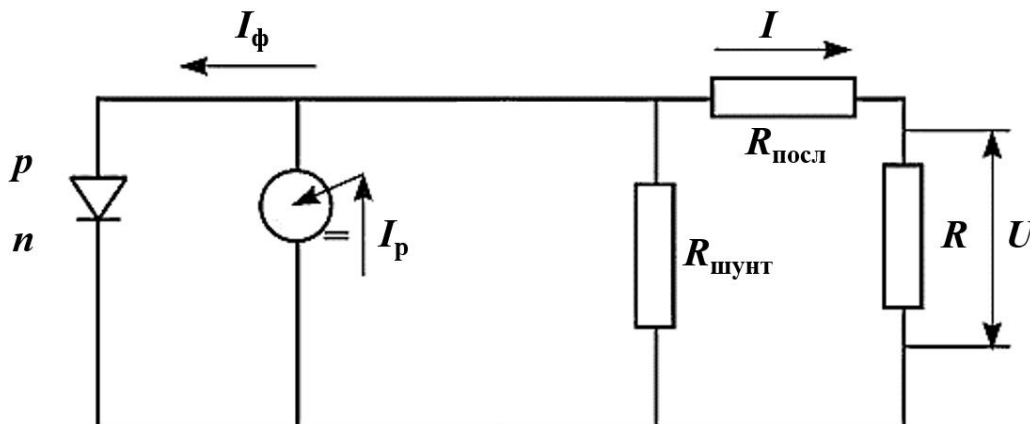


Рис. 1. Схематическое изображение однодиодной модели построения ВАХ: I_{ϕ} — фототок; I_p — рекомбинационный ток; I — ток нагрузки; R — сопротивление нагрузки; U — напряжение на нагрузке

Fig. 1. Schematic representation of a single-diode model for constructing a I-V curve: I_{ϕ} is photocurrent; I_p is recombination current; I is load current; R is load resistance; U is voltage across the load

последовательно соединенных элементов конструкции ФЭП:

- контакта металл—полупроводник на фронтальной поверхности;
- растекания в легированном слое базового слоя;
- контакта металл—полупроводник на тыльной поверхности.

На этом сопротивлении будет теряться часть электродвижущей силы [13].

Согласно однодиодной модели, ВАХ задается уравнением, которое определяет ток, протекающий через нагрузку следующим образом [13]:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_{\text{посл}})}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_{\text{посл}}}{R_{\text{шунт}}}, \quad (1)$$

где I_{ϕ} — фототок, мкА; I_0 — обратный ток насыщения, мкА; q — элементарный заряд электрона, Кл; U — напряжение на нагрузке, В; A — параметр кривизны ВАХ, отн. ед.; k — константа Больцмана, эВ/К; T — рабочая температура, К.

Традиционно $R_{\text{посл}}$ получают косвенно из ВАХ путем определения тангенса наклона линейной части прямой ветви ВАХ к оси токов, а $R_{\text{шунт}}$ — обратной ветви ВАХ к оси напряжений [13].

Для снижения погрешности косвенного метода определения $R_{\text{посл}}$ ФЭП существует несколько расчетных методов. В этих случаях используется три характерные точки, а именно: ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$, напряжение холостого хода $U_{\text{хх}}$ и в точке максимальной мощности ($P_{\text{макс}}$) оптимальные ток $I_{\text{опт}}$ и напряжение $U_{\text{опт}}$, полученные из экспериментальной ВАХ.

Уравнение ВАХ одного из таких расчетных методов выглядит следующим образом:

$$I = I_{\text{кз}} \left[1 - C_1 \exp \left(\frac{U}{C_2 U_{\text{хх}}} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

где

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{кз}}} \right) \exp \left(-\frac{U_{\text{опт}}}{C_2 U_{\text{хх}}} + 1 \right); \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{\left[\frac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{хх}}} - 1 \right]}{\log \left[1 - \frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{кз}}} \right]}. \quad (4)$$

Второй метод основан на моделях *Sandia National Laboratories* [14] и *Agilent Technology* [15], в которых для определения $R_{\text{посл}}$ используется графический метод (рис. 2) и следующие уравнения:

$$I = \frac{U_{\text{хх}} \ln \left[2 - \left(\frac{I}{I_{\text{кз}}} \right)^N \right]}{\ln(2)} - R_{\text{посл}} (I - I_{\text{кз}}); \quad (5)$$

$$1 + \frac{R_{\text{посл}} I_{\text{кз}}}{U_{\text{хх}}}$$

$$R_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{хх}} - U_{\text{опт}}}{I_{\text{опт}}}; \quad (6)$$

$$N = \frac{\ln \left[2 - 2^a \right]}{\ln \left(\frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{кз}}} \right)}; \quad (7)$$

$$a = \frac{U_{\text{опт}} \left(1 + R_{\text{посл}} \frac{I_{\text{кз}}}{U_{\text{хх}}} \right) + R_{\text{посл}} (I_{\text{опт}} - I_{\text{кз}})}{U_{\text{хх}}}, \quad (8)$$

где a , N — аппроксимационные параметры, здесь N соотносится с $R_{\text{шунт}}$ [16].

Затем для моделирования ВАХ после воздействия ионизирующего излучения необходимо получить электрические параметры ФЭП. Такое излучение представляет собой высокоэнергетические частицы, которые, как правило, вызывают дефекты кристаллической решетки, повышая внутреннее сопротивление конструкции ФЭП. Возникшие дефекты создают в запрещенной зоне полупроводникового материала энергетические уровни, которые действуют как центры захвата (ловушки) или рекомбинации. Увеличение концентрации ловушек приводит к уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда (**ННЗ**) в кремнии (далее будем оперировать более удобным и легко определяемым параметром — диффузионной длиной ННЗ, которая изменяется по такому же закону), что, в свою очередь, снижает $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{хх}}$, значительно влияя на коэффициент полезного действия и максимальную мощность $P_{\text{макс}}$ ФЭП [17–19].

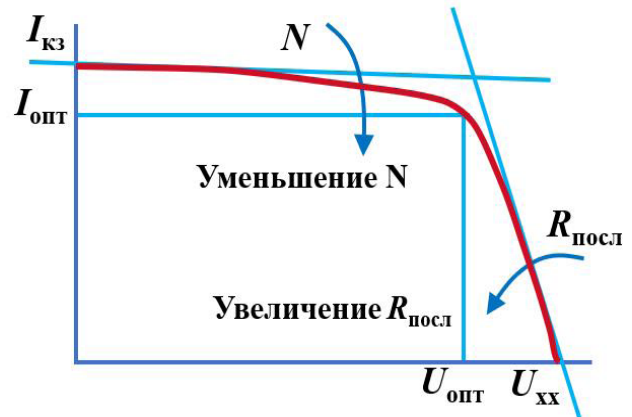


Рис. 2. Графический метод определения последовательного сопротивления $R_{\text{посл}}$ и аппроксимационного параметра фотоэлектрического преобразователя [16]

Fig. 2. Graphical method for determining the series resistance $R_{\text{посл}}$ and the approximation parameter of the photoelectric converter [16]

При этом деградация $P_{\text{макс}}$ ФЭП в результате воздействия на него ионизирующего излучения будет определять рабочую точку ФЭП, а в последующем и СБ в конце САС.

Как известно [20], уровень воздействия ионизирующего излучения на ФЭП на основе $c\text{-Si } p\text{-типа}$ для низких околоземных орбит (до 2000 км) соответствует эквивалентному флюенсу электронов с энергией 1 МэВ в диапазоне от 10^{13} до 10^{15} см $^{-2}$. Деградация электрических параметров в этом случае будет вызвана внедрением радиационно-индуцированных центров рекомбинации, которые уменьшают диффузионную длину ННЗ в базе [21, 22]:

$$\frac{1}{L_{\Phi}^2} - \frac{1}{L_0^2} = K_L \Phi, \quad (9)$$

где L_0, L_{Φ} — диффузионная длина ННЗ в базе до и после облучения соответственно, см; K_L — коэффициент повреждения, отн. ед. [23]; Φ — накопленный флюенс электронов, см $^{-2}$.

Определить диффузионную длину ННЗ в базе $L_{n,0}$ возможно из спектра внешнего квантового выхода фотоотклика (**ВКВФ**) до облучения в длинноволновой области спектра солнечного излучения, в которой вклад от уровня легирования эмиттера пренебрежимо мал [24, 25]:

$$\frac{1}{L_{n,0}} = \alpha \frac{1 - Q_1}{Q_1}, \quad (10)$$

где α — коэффициент поглощения, см $^{-1}$; Q_1 — значение квантовой эффективности, отн. ед.

Диффузионную длину ННЗ в эмиттере $L_{p,0}$ можно определить из спектра ВКВФ в коротковолновой области, для которой

$$\exp(-\alpha w) \ll 1; \quad (11)$$

$$(\alpha L_{p,0})^2 \gg 1, \quad (12)$$

где w — глубина залегания границы раздела $p\text{—}n\text{—}$ перехода, см.

Для этого в среде *MathCad* было получено решение трансцендентного уравнения [26]:

$$\frac{s_w L_{p,0}}{D_p} \operatorname{sh} \frac{w}{L_{p,0}} + \operatorname{ch} \frac{w}{L_{p,0}} = \frac{1}{Q_2}, \quad (13)$$

где s_w — скорость поверхностной рекомбинации, см/с; D_p — коэффициент диффузии, см 2 /с; Q_2 — значение квантовой эффективности при $\alpha \rightarrow \infty$, отн. ед.

При этом для упрощения методики было применено допущение, что

$$\frac{s_w}{D_p} \approx \frac{\operatorname{tg} \varphi}{Q_1}, \quad (14)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ — тангенс угла наклона зависимости ВКВФ от $1/\alpha$.

Изменение диффузионных длин влечет за собой изменение рекомбинационного тока после облучения $I_{p,\Phi}$ [18]:

$$I_{p,\Phi} = I_{p,0} \frac{L_{n,0} L_{p,0}}{L_{n,\Phi} L_{p,\Phi}}, \quad (15)$$

где $I_{p,0}$ — рекомбинационный ток до облучения, А.

Рекомбинационный ток до облучения $I_{p,0}$ можно найти, преобразовав уравнение (1) с учетом того, что $R_{\text{шунт}}$ ФЭП обычно велико и токи утечки в нем малы:

$$I_{p,0} = \frac{I_{kз,0}}{\exp\left(\frac{U_{xx,0} q}{kT}\right)}. \quad (16)$$

Изменение значений $I_{kз}$ и U_{xx} в результате облучения можно оценить из выражений, представленных ниже [18]:

$$U_{xx,\Phi} = U_{xx,0} - \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{L_{n,0} L_{p,0}}{L_{n,\Phi} L_{p,\Phi}}\right); \quad (17)$$

$$I_{kз,\Phi} = I_{p,\Phi} \exp\left(\frac{U_{xx,\Phi} q}{kT}\right). \quad (18)$$

Для построения итоговой ВАХ ФЭП после облучения по аналитическим моделям определения $I_{\text{опт}}$ и $U_{\text{опт}}$ необходимо установить изменения $R_{\text{полс}}$ и N в зависимости от дозы облучения, полученные из экспериментальных ВАХ.

Результаты и их обсуждение

Первый метод моделирования ВАХ, основанный на уравнениях (2)—(4), дает расхождение между расчетными и экспериментальными значениями порядка 1,3 %. Расхождение результатов расчета по второй модели, основанной на уравнении

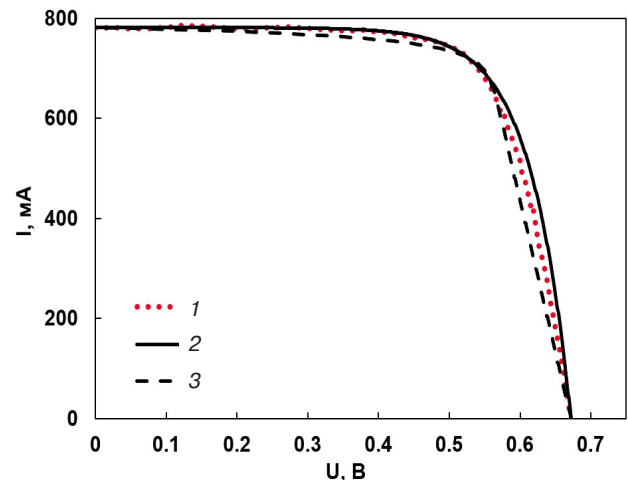


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики фотоэлектрических преобразователей на основе Si до облучения: 1 — эксперимент; 2, 3 — расчет по первой и второй модели соответственно

Fig. 3. I-V curve of Si-based photoelectric converters before irradiation: (1) experiment; (2, 3) calculation according to the first and second models, respectively

Таблица 1

Значения физических параметров ФЭП до и после облучения ($\Phi = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$)* электронами с энергией 1 МэВ

Values of physical parameters of the photovoltaic converter before and after irradiation ($\Phi = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$)* with electrons with an energy of 1 MeV

Область ФЭП	Толщина, мкм	Концентрация, см^{-3}	L , мкм	$I_{\text{кз}}$, мА/см^2	$U_{\text{хх}}$, В	$P_{\text{макс}}$, Вт	L , мкм	$I_{\text{кз}}$, мА/см^2	$U_{\text{хх}}$, В	$P_{\text{макс}}$, Вт
			До облучения				После облучения			
<i>n</i> -Si	0,4	$1,1 \cdot 10^{18}$	0,80	51,49	0,67	371	0,79	51,48	0,58	279
<i>p</i> -Si	170	$7,8 \cdot 10^{16}$	419				88			

* Эквивалентный флюенс для уровня воздействия электронов естественных радиационных поясов Земли на высоте орбиты 833 км за САС 5 лет.

ях (5)—(8), с экспериментально полученными данными составляет 2,1 %. Графические результаты моделирования отображены на рис. 3. Сравнивая полученные расхождения рассмотренных моделей, можно сделать вывод, что для построения ВАХ ФЭП после облучения целесообразно будет применение первой модели.

Для апробации методики были смоделированы выходные параметры конструкции кремниевого ФЭП [10], глубина залегания *p*—*n*-перехода которого составила 0,4 мкм. Отличительной особенностью по сравнению со стандартной планарной структурой ФЭП *n*⁺—*p*—*p*⁺ является наличие на тыльной стороне диэлектрического слоя с микроотверстиями, обеспечивающего функцию отражателя между *c*-Si подложкой *p*-типа и металлическим контактом, через которые проходит контакт, а также текстурирование фронтальной поверхности ФЭП [9].

Полученные в результате решения трансцендентного уравнения (13) значения диффузионных длин дырок в эмиттере и электронов в базе ФЭП до облучения представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что $U_{\text{хх}}$ изменяется более значительно, что связано с изменением тока утечки при образовании дефектов, в то время как $I_{\text{кз}}$ практически остается постоянным из-за небольшой деградации диффузионной длины ННЗ в эмиттере. Изменения в базе также не существенны из-за особенностей конструкции ФЭП, указанных выше, которые фактически увеличивают эффективную диффузионную длину носителей заряда, что не нивелирует значительное уменьшение рассчитанного значения диффузионной длины *p*-Si области. Также важно обратить внимание на то, что изначально запас диффузионной длины ННЗ в базе относительно ее толщины велик.

Определив изменение диффузионных длин дырок в эмиттере и электронов в базе ФЭП после облучения по спектрам ВКВФ и уравнению (9), были получены деградационные кривые $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{хх}}$

(рис. 4). Из рис. 4 видно, что при увеличении флюенса электронов с энергией 1 МэВ $I_{\text{кз}}$ ФЭП существенно не изменяется [27].

Поскольку деградация диффузионной длины ННЗ в эмиттере незначительна, то вероятность их рекомбинации будет минимальной (см. табл. 1). Обратная ситуация будет наблюдаться для базы ФЭП, где деградация диффузионной длины ННЗ составит примерно 79 % (см. табл. 1), что значительно снизит концентрацию избыточных носителей заряда (возникших при освещении *p*—*n*-перехода и дошедших до области пространственного заряда) в рассматриваемой области ФЭП.

Известно, что в режиме холостого хода избыточные электроны накапливаются в эмиттере *n*-типа, заряжая его отрицательно, тогда как избыточные дырки — в базе *p*-типа, заряжая поло-

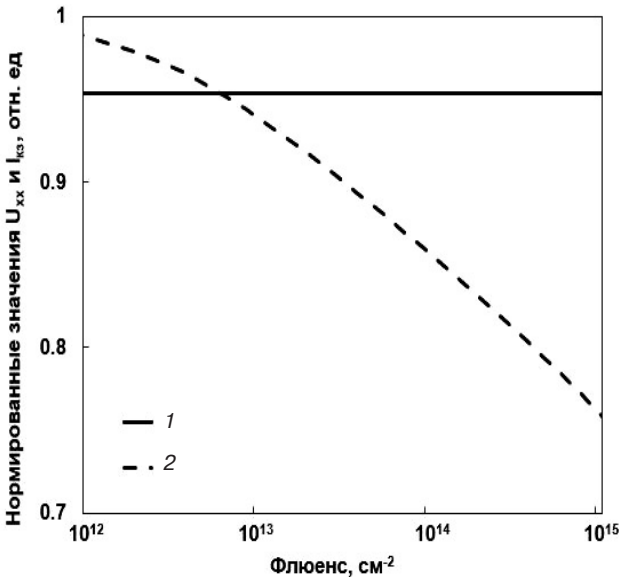


Рис. 4. Деградационные кривые для напряжения холостого хода $U_{\text{хх}}$ (1) и тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ (2) фотоэлектронного преобразователя на основе Si при облучении электронами с энергией 1 МэВ

Fig. 4. Degradation curves for the open-circuit voltage $U_{\text{хх}}$ (1) and short-circuit current $I_{\text{кз}}$ (2) of a Si-based photoelectric converter irradiated with 1 MeV electrons

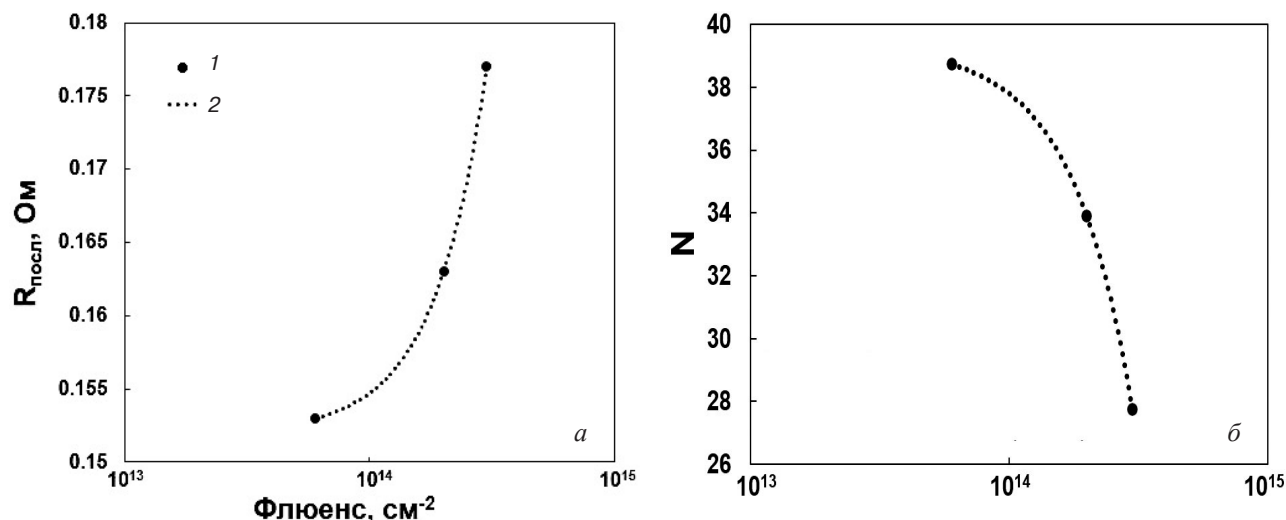


Рис. 5. Деграционные кривые для последовательного сопротивления $R_{\text{посл}}$ (а) и аппроксимационного параметра N (б) при облучении ФЭП на основе Si электронами с энергией 1 МэВ: 1 — расчетные значения, полученные из экспериментальных ВАХ; 2 — аппроксимационная кривая

Fig. 5. Degradation curves for the series resistance R_{ser} (a) and the approximation parameter N (b) when a Si-based photoelectric converter is irradiated with 1 MeV electrons: (1) calculated values obtained from experimental I-V characteristics; (2) approximation curve

жительно. Уменьшение концентрации накапливаемых избыточных зарядов в базе с ростом флюенса снизит разность потенциалов, а значит, и $U_{\text{хх}}$ ФЭП (см. рис. 4).

В режиме короткого замыкания через $p-n$ -переход ФЭП и внешний проводник течет ток, вызванный фотогенерацией избыточных носителей заряда в эмиттере. Поскольку диффузионная длина HN_3 в эмиттере при облучении ФЭП незначительна, то деградация $I_{\text{кз}}$ в этом случае будет минимальна (см. рис. 4). Аналогичный эффект наблюдали при исследовании полупроводниковых структур на основе Si [27].

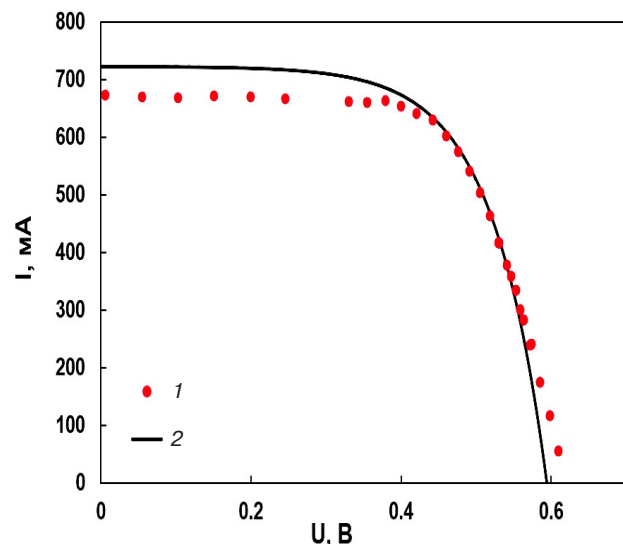


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя на основе Si после облучения электронами с энергией 1 МэВ и флюенсом $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$: 1 — расчет; 2 — эксперимент

Fig. 6. Volt-ampere characteristic of a Si-based photoelectric converter after irradiation with electrons with an energy of 1 MeV and a fluence of $6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$: (1) calculation; (2) experiment

На рис. 5 представлены деграционные кривые $R_{\text{посл}}$ и N , полученные из расчета на основе уравнений (2)—(8) и электрических параметров экспериментальных ВАХ ФЭП в зависимости от флюенса облучения электронами с энергией 1 МэВ, что необходимо для построения ВАХ и дальнейшей оценки деградации $P_{\text{макс}}$, которая составила 24,8 % (см. табл. 1).

Из рис. 6, б видно, что при увеличении флюенса электронов N ФЭП уменьшается. Это связано с тем, что при облучении ФЭП образуются ловушки захвата и растет рекомбинационный ток $p-n$ -перехода.

Напротив, $R_{\text{посл}}$, связанное с сопротивлением материалов элементов конструкции ФЭП, растет с увеличением уровня флюенса. Повреждение кристаллической решетки полупроводниковой структуры ФЭП заряженными частицами способствует росту его сопротивления, что согласуется с данными работы [27].

Аппроксимирующие функции для $R_{\text{посл}}$ и N ФЭП на основе Si при облучении электронами с энергией 1 МэВ имеют следующий вид:

$$R_{\text{посл}}(\Phi) = 3 \cdot 10^{-31} \Phi^2 - 3 \cdot 10^{-18} \Phi + 0,15; \quad (19)$$

$$N(\Phi) = -1 \cdot 10^{-28} \Phi^2 - 5 \cdot 10^{-15} \Phi + 39,43. \quad (20)$$

С учетом всех рассчитанных электрических параметров ФЭП была построена ВАХ ФЭП после облучения электронами с энергией 1 МэВ и флюенсом $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (рис. 6). Для апробации методики было проведено экспериментальное облучение ФЭП и замерена ВАХ. Сравнение расчетной и экспериментальной ВАХ ФЭП после облучения показало расхождение модели не более чем на 5,3 %.

Заключение

Предложена методика моделирования ВАХ ФЭП на основе Si после облучения электронами с энергией 1 МэВ. Наиболее полно ВАХ ФЭП описывает комплексная модель с расчетом аппроксимационных параметров C_1 , C_2 , $R_{\text{посл}}$ и N , которая дает представление о физических параметрах, а также уменьшает расхождение между результатами моделирования ВАХ и экспериментально полученными данными.

На основе рассчитанных деградационных кривых $I_{\text{кз}}$ и $U_{\text{хх}}$, а также физических основ работы ФЭП выявлено, что $U_{\text{хх}}$ изменяется значительно, что вызвано разной степенью деградации эмитте-

ра и базы, тогда как $I_{\text{кз}}$ практически не меняется за счет особенностей конструкции ФЭП. Анализ экспериментально полученных зависимостей внутренних сопротивлений ФЭП от флюенса электронов показал, что на деградацию его $R_{\text{макс}}$ (24,8 %) влияет снижение $R_{\text{шунт}}$ и увеличение $R_{\text{посл}}$.

Апробация модели построения ВАХ для ФЭП на основе Si, облученного электронами с энергией 1 МэВ, показала расхождение между смоделированной и экспериментальной ВАХ ФЭП после облучения не более чем на 5,3 %. Таким образом, при оценке радиационной стойкости СБ МКА частичная замена натуральных радиационных испытаний ФЭП на моделирование позволит ускорить проведение работ и снизить их стоимость.

Библиографический список

1. Flood D., Brandhorst H. Current topics in photovoltaics. London: Academic Press; 1987. Vol. 2. 143 p.
2. Гансвинд И. Н. Малые космические аппараты — новое направление космической деятельности. Международный научно-исследовательский журнал. 2018; (12-2(78)): 84—91. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>
3. Дорошин А.В. Анализ потребностей рынка, интересов частных коммерческих организаций, занимающихся разработкой изделий и предоставлением услуг в области космонавтики и сопряженных технологий. Режим доступа: https://kosmos.ssau.ru/files/Kosmos_SSAU_marketrepot_2022.pdf (дата обращения: 25.11.2024).
4. Асташкин А.А., Карелин А.В., Комиссарова И.Н., Кузьмин Ю.А., Шувалов В.А., Яковлев А.А. Обзор орбитальных группировок космических аппаратов оперативного метеонаблюдения. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2021; 181(2): 24—55.
5. Luque A., Hegedus S. (eds.). Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons; 2011. 1168 p.
6. Yamaguchi M. Radiation-resistant solar cells for space use. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001; 68(1): 31—53. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00344-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00344-5)
7. Tada H.Y., Carter J.R., Anspaugh B.E., Downing R.G. Solar cell radiation handbook. Pasadena, California: National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, Institute of Technology; 1982. 403 p.
8. Messenger S.R., Jackson E.M., Warner J.H., Walters R.J. SCREAM: A new code for solar cell degradation prediction using the displacement damage dose approach. In: *2010 35th IEEE Photovoltaic special. conf.* Honolulu, HI, USA; 2010. P. 001106—001111. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2010.5614713>
9. Рябцева М.В., Чуянова Е.С., Бадурин И.В., Логинова Е.С., Вагапова Н.Т., Петров А.С., Сергеев О.С., Таперо К.И., Арзамасцева Д.М. Исследование радиационной стойкости современных фотоэлектрических преобразователей на основе Si. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. 2023; (4): 24—30.
10. Клиновицкая И.А., Плотников С.В., Лау Р.М.Л. Модификация стандартной производственной линии Al-BSF фотоэлектрических преобразователей до PERC с использованием PECVD. *Журнал технической физики*. 2022; 92(4): 588—595. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.04.52246.224-21>
11. Mehta H.K., Warke H., Kukadiya K., Panchal A.K. Accurate expressions for single-diode-model solar cell parameterization. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2019; 9(3): 803—810. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2896264>
12. Shannan N.M.A.A., Yahaya N.Z., Singh B. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. In: *2013 IEEE inter.conf.control system, computing and engineering*. Penang, Malaysia; 2013. P. 210—214. <https://doi.org/10.1109/ICCSC.2013.6719960>
13. Пархоменко Ю.Н., Полисан А.А. Физика и технология приборов фотоники. М.: Издательский дом «МИСиС»; 2013. 142 с.
14. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic array performance model. Draft Sandia National Laboratories; 2003. 39 p.
15. Koffi A.H., Armah E.A., Ampomah-Benefo K., Doodoo-Arhin D. A step by step analytical solution to the single diode model of a solar cell. *NUST Journal of Engineering Sciences*. 2022; 15(2): 60—64. <https://doi.org/10.24949/njes.v15i2.728>
16. Koffi H.A., Yankson A.A., Hughes A.F., Ampomah-Benefo K., Amuzu J.K.A. Determination of the series resistance of a solar cell through its maximum power point. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. 2020; 12(6): 699—702. <https://doi.org/10.1080/20421338.2020.1731073>
17. Tada H., Carter J.R. Solar cell radiation handbook. Springfield; 1982 300 p.
18. Емельянов В.М., Калужный Н.А., Минтаиров С.А., Шварц М.З., Лантратов В.М. Многопереходные солнечные элементы с брэгговскими отражателями на основе структур GaInP/GaInAs/Ge. *Физика и техника полупроводников*. 2010; 44(12): 1649—1654.
19. Tajima M., Warashina M., Hisamatsu T., Matsuda S. Photoluminescence due to boron-related defect in solar cell silicon irradiated with 1 MeV electrons. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2001; 48(6): 2127—2130. <https://doi.org/10.1109/23.983183>
20. Yamaguchi M., Khan A., Taylor S.J., Imaizumi M., Hisamatsu T., Matsuda S. A detailed model to improve the radiation-resistance of Si space solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1999; 46(10): 2133—2138. <https://doi.org/10.1109/16.792008>
21. Rehman A., Lee S.H., Lee S. H. Silicon space solar cells: progression and radiation-resistance analysis. *Journal*

– *Korean Physical Society*. 2016; 68(4): 593—598. <https://doi.org/10.3938/jkps.68.593>

22. Ладыгин Е.А. Радиационная технология твердотельных электронных приборов. М.: ЦНИИ «Электроника»; 1976. 112 с.

23. Cappelletti M.A., Casas G.A., Cedola A.P., Blancá E.P. Theoretical study of the maximum power point of *n*-type and *p*-type crystalline silicon space solar cells. *Semiconductor Science and Technology*. 2013; 28(4): 045010. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/4/045010>

24. Евдокимов В.М. Определение параметров неосновных носителей в полупроводниковых

фотоэлементах по кривой спектральной чувствительности. *Гелиотехника*. 1972; (3): 32—38.

25. Емельянов В.М., Минтаиров С.А., Калужный Н.А., Лантратов В.М. Внешний квантовый выход фотоответа каскадных солнечных элементов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2009; 2(77): 14—23.

26. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Советское радио; 1971. 248 с.

27. Li S., Huang L., Ye J., Hong Y., Wang Y., Gao H., Cui Q. Study on radiation damage of silicon solar cell electrical parameters by nanosecond pulse laser. *Electronics*. 2024; 13(9): 1795. <https://doi.org/10.3390/electronics13091795>

References

1. Flood D., Brandhorst H. Current topics in photovoltaics. London: Academic Press; 1987. Vol. 2. 143 p.

2. Gansvind I.N. Small spacecraft — new direction in space activities. *International Research Journal*. 2018; (12–2(78)): 84—91. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>

3. Doroshin A.V. Analysis of market needs and interests of private commercial organizations engaged in product development and provision of services in the field of space exploration and related technologies. (In Russ.). Available at: https://kosmos.ssa.ru/files/Kosmos_SSAU_market-repot_2022.pdf. (accessed on 25.11.2024).

4. Astashkin A.A., Karelin A.V., Komissarova I.N., Kuzmin Yu.A., Shuvalov V.A., Yakovlev A.A. Satellites of operational meteorology constellations overview. *Electromechanical matters. VNIIE studies*. 2021; 181(2): 24—55. (In Russ.)

5. Luque A., Hegedus S. (eds.). Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons; 2011. 1168 p.

6. Yamaguchi M. Radiation-resistant solar cells for space use. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001; 68(1): 31—53. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00344-5](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00344-5)

7. Tada H.Y., Carter J.R., Anspaugh B.E., Downing R.G. Solar cell radiation handbook. Pasadena, California: National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, Institute of Technology; 1982. 403 p.

8. Messenger S.R., Jackson E.M., Warner J.H., Walters R.J. SCREAM: A new code for solar cell degradation prediction using the displacement damage dose approach. In: *2010 35th IEEE Photovoltaic special. conf.* Honolulu, HI, USA; 2010. P. 001106—001111. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2010.5614713>

9. Ryabtseva M.V., Chuyanov E.S., Badurin I.V., Loginova E.S., Vagapova N.T., Petrov A.S., Sergeev O.S., Tapero K.I., Arzamastseva D.M. The radiation resistance study of modern Si photoelectric converters. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnuyu apparaturu*. 2023; (4): 24—30. (In Russ.)

10. Klinovitskaya I.A., Plotnikov S.V., Lay P.M.L. Modification of a standard Al–BSF solar cell line into PERC using PECVD. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Technical Physics*. 2022; 92(4): 588—595. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.04.53606.224-21>

11. Mehta H.K., Warke H., Kukadiya K., Panchal A.K. Accurate expressions for single-diode-model solar cell parameterization. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2019; 9(3): 803—810. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2896264>

12. Shannan N.M.A.A., Yahaya N.Z., Singh B. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison. In: *2013 IEEE inter. conf. control system, computing and engineering*. Penang, Malaysia; 2013. P. 210—214. <https://doi.org/10.1109/ICCSC.2013.6719960>

13. Parkhomenko Yu. N., Polisan A.A. Physics and technology of photonics devices. Moscow: Izdatel'skii dom «MISiS»; 2013. 142 p. (In Russ.)

14. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic array performance model. Draft Sandia National Laboratories; 2003. 39 p.

15. Koffi A.H., Armah E.A., Ampomah–Benefo K., Doodoo–Arhin D. A step by step analytical solution to the single diode model of a solar cell. *NUST Journal of Engineering Sciences*. 2022; 15(2): 60—64. <https://doi.org/10.24949/njes.v15i2.728>

16. Koffi H.A., Yankson A.A., Hughes A.F., Ampomah–Benefo K., Amuzu J.K.A. Determination of the series resistance of a solar cell through its maximum power point. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. 2020; 12(6): 699—702. <https://doi.org/10.1080/20421338.2020.1731073>

17. Tada H., Carter J.R. Solar cell radiation handbook. Springfield; 1982. 300 p.

18. Emelyanov V.M., Kalyuzhnyi N.A., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Lantratov V.M. GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells with Bragg reflectors. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*. 2010; 44(12): 1649—1654. (In Russ.)

19. Tajima M., Warashina M., Hisamatsu T., Matsuda S. Photoluminescence due to boron-related defect in solar cell silicon irradiated with 1 MeV electrons. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2001; 48(6): 2127—2130. <https://doi.org/10.1109/23.983183>

20. Yamaguchi M., Khan A., Taylor S.J., Imaizumi M., Hisamatsu T., Matsuda S. A detailed model to improve the radiation-resistance of Si space solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1999; 46(10): 2133—2138. <https://doi.org/10.1109/16.792008>

21. Rehman A., Lee S.H., Lee S.H. Silicon space solar cells: progression and radiation-resistance analysis. *Journal – Korean Physical Society*. 2016; 68(4): 593—598. <https://doi.org/10.3938/jkps.68.593>

22. Ladygin E.A. Radiation technology of solid-state electronic devices. Moscow: TsNII “Elektronika”; 1976. 112 p. (In Russ.)

23. Cappelletti M.A., Casas G.A., Cedola A.P., Blanc E.P. Theoretical study of the maximum power point of

n-type and *p*-type crystalline silicon space solar cells. *Semiconductor Science and Technology*. 2013; 28(4): 045010. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/4/045010>

24. Evdokimov V.M. Determination of parameters of minority carriers in semiconductor photocells using the spectral sensitivity curve. *Geliotekhnika*. 1972; (3): 32—38. (In Russ.)

25. Emelyanov V.M., Mintairov S.A., Kalyuzhnyi N.A., Lantratov V.M. The external quantum yield of photore-

sponse of tandem solar cells. *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*. 2009; 2(77): 14—23. (In Russ.)

26. Vasil'ev A.M., Landsman A.P. Semiconductor photo converters. Moscow: Sovetskoe radio; 1971. 248 p. (In Russ.)

27. Li S., Huang L., Ye J., Hong Y., Wang Y., Gao H., Cui Q. Study on radiation damage of silicon solar cell electrical parameters by nanosecond pulse laser. *Electronics*. 2024; 13(9): 1795. <https://doi.org/10.3390/electronics13091795>

Информация об авторах / Information about the authors

Феклистова Александра Аркадьевна — инженер–технолог, АО «Научно–производственное предприятие «Квант», 3–я Мытищинская ул., д. 16, Москва, 129626, Российская Федерация; студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9654-6603>; e-mail: feklitova.sashaa@mail.ru

Рябцева Мария Владимировна — канд. физ.–мат. наук, ведущий научный сотрудник, АО «Научно–производственное предприятие «Квант», 3–я Мытищинская ул., д. 16, Москва, 129626, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6187-4447>; e-mail: ryabtsevamv@yandex.ru

Чуянова Елена Сергеевна — научный сотрудник, АО «Научно–производственное предприятие «Квант», 3–я Мытищинская ул., д. 16, Москва, 129626, Российская Федерация; аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9709-4536>; e-mail: chuyanovaelena@mail.ru

Вагапова Наргиза Тухтамышевна — канд. хим. наук, доцент кафедры, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5368-4159>; e-mail: nargizavnt@gmail.com

Aleksandra A. Feklistova — Engineer–Technologist, JSC “Research–Production Enterprise “KVANT”, 16 3rd Mytishinskaya Str., Moscow 129626, Russian Federation; Student, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9654-6603>; e-mail: feklitova.sashaa@mail.ru

Mariya V. Ryabceva — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Researcher, JSC “Research–Production Enterprise “KVANT”, 16 3rd Mytishinskaya Str., Moscow 129626, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6187-4447>; e-mail: ryabtsevamv@yandex.ru

Elena S. Chuyanov — Researcher, JSC “Research–Production Enterprise “KVANT”, 16 3rd Mytishinskaya Str., Moscow 129626, Russian Federation; Postgraduate Student, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9709-4536>; e-mail: chuyanovaelena@mail.ru

Nargiza T. Vagapova — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, National University of Science and Technology “MISIS”, 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5368-4159>; e-mail: nargizavnt@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2024; поступила после доработки 29.03.2025; принята к публикации 04.04.2025
Received 3 December 2024; Revised 29 March 2025; Accepted 4 April 2025

* * *