

Исследование радиационной деградации многопереходных солнечных элементов, преобразующих концентрированное излучение

© С.А. Левина, В.М. Емельянов-Гирс, П.Д. Корниенко, М.В. Нахимович, М.З. Шварц

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

E-mail: levina@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 8 июля 2026 г.

Принята к публикации 14 июля 2026 г.

Исследуются деградационные характеристики трехпереходных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов, предназначенных для преобразования концентрированного солнечного излучения. Образцы облучались флюенсами электронов с энергиями 2 и 4.5 МэВ и протонов 10 МэВ. Измерения характеристик производились в диапазоне освещенностей 1–1000 крат. Поиск единой деградационной зависимости для 1 МэВ электронов производился с помощью метода Naval Research Laboratory.

Ключевые слова: радиационная деградация, солнечный элемент, концентрированное излучение, фотоэлектрические характеристики.

DOI: 10.61011/FTP.2026.07.63949.9651

1. Введение

Особенностью радиационного воздействия на солнечные элементы (СЭ) в космических условиях является многокомпонентность ионизирующего излучения (протоны, электроны, нейтроны и др.) и его сложный спектральный состав, что невозможно полностью смоделировать в наземных условиях. Поэтому широкое распространение получили расчетно-экспериментальные методики моделирования радиационного воздействия в орбитальных условиях, основанные на методе эквивалентных потоков (МЭП) [1]. Подобные методы позволяют на основе деградационных характеристик, полученных при испытании под действием моноэнергетических частиц, прогнозировать выходные параметры СЭ в ходе космических миссий. Основная суть МЭП сводится к поиску единой деградационной кривой для 1 МэВ электронов, а для конкретных орбит и условий функционирования определяется эквивалентный флюенс нормально падающих электронов с энергией 1 МэВ [2,3], который нанес бы СЭ такие же повреждения, как и выбранный космический спектр. Наиболее широкое распространение получили JPL-метод (NASA Jet Propulsion Laboratory [4]) и метод NRL (Naval Research Laboratory [5]). JPL-метод позволяет достаточно точно определять коэффициенты деградации и прогнозируемые ухудшения фотоэлектрических параметров СЭ, однако требует проведения обширных наземных испытаний с большим количеством образцов при множестве энергий облучающих частиц. Эффективной альтернативой JPL-метода, требующей меньших затрат на радиационные испытания, представляется NRL-метод, позволяющий получать универсальные для любого типа частиц деградационные зависимости от поглощенной дозы, вызыва-

ющей структурные повреждения со смещением атомов кристаллической решетки (Displacement Damage Dose). Поэтому в данной работе при исследовании радиационной деградации СЭ, преобразующих концентрированное излучение, был выбран NRL-метод.

2. NRL-метод

Основой метода является концепция неионизационных потерь энергии (NIEL), которые могут быть определены (в МэВ·см²/г) для данного материала с помощью следующего выражения:

$$\text{NIEL}(E) = \frac{N_A}{A} \int_{T_d}^{T_{\max}} L(T) T \left(\frac{d\sigma(T, E)}{dT} \right) dT, \quad (1)$$

где N_A — число Авогадро, A — относительная атомная масса, T_d — пороговая энергия, $T_{\max}$ — максимальное значение энергии, E — кинетическая энергия налетающей частицы, T — энергия, переданная частицей атомному ядру, $L(T)$ — статистическая функция, которая показывает долю неионизационных потерь энергии [6,7], $\frac{d\sigma(T, E)}{dT}$ — дифференциальное поперечное сечение рассеяния.

Коэффициент NIEL в явном виде не зависит от параметров полупроводниковых слоев (уровень легирования, времена жизни неосновных носителей заряда и т.д.), а обусловлен только составом облучаемого материала и энергией частиц. У многопереходных (МП) СЭ с количеством фотоактивных p – n -переходов больше двух, NIEL для всей структуры определяется по субэлементу, демонстрирующему максимальную скорость деградации

выбранного фотоэлектрического параметра. Так, например, для стандартных космических GaInP–GaAs–Ge СЭ коэффициент NIEL характеризуется именно GaAs-суб-элементом. Введение параметра NIEL при исследовании радиационной деградации СЭ позволяет связать флюенс высокоэнергетичных частиц (электроны, протоны) с ключевой величиной в модели — поглощенной дозой смещений (D_d , МэВ/г):

$$D_d = \Phi(E) \cdot \left[\frac{\text{NIEL}(E)}{\text{NIEL}(E_{\text{ref}})} \right]^{n-1}, \quad (2)$$

где $\Phi(E)$ — флюенс протонов при данных энергиях, параметр $\text{NIEL}(E_{\text{ref}})$ соответствует значениям для 1 МэВ электронов, n — полуэмпирический коэффициент нелинейности.

В расчетах коэффициент n подбирается так, чтобы обеспечивалось лучшее „схлопывание“ в единую деградационную кривую всех экспериментальных данных, полученных при разных типах и энергиях облучающих частиц. Как правило, для протонов эта зависимость оказывается линейной ($n = 1$), а для электронов находится в диапазоне 1.7–2.3 и определяется при соответствующих минимальных значениях среднеквадратичного отклонения.

Поиск деградационной зависимости фотоэлектрических параметров (например, мощности) СЭ осуществляется с помощью выражения

$$\frac{P}{P_0} = 1 - C \cdot \log \left(1 + \frac{D_d}{D_x} \right), \quad (3)$$

где P_0 и P — экспериментальные данные по мощности до облучения и после него соответственно; C — константа, описывающая уменьшение P на декаду плотности потока излучения в логарифмическом диапазоне; D_x соответствует точке перегиба функции $\frac{P}{P_0}$, при которой характеристика от логарифмической зависимости переходит к линейной.

Таким образом, для определения единой деградационной характеристики СЭ необходимо найти следующие полуэмпирические параметры: n , C , D_x . NRL-метод показал свою универсальность применительно к СЭ, преобразующим космическое (AM0) прямое (неконцентрированное) излучение [8]. Стоит отметить, что описанный выше подход (тоже относится и к JPL-методу) тестировался ранее только при кратности концентрирования солнечного излучения 1X.

3. Экспериментальные результаты

В данной работе NRL-метод был апробирован на трех переходных GaInP/GaAs/Ge СЭ, предназначенных для преобразования концентрированного солнечного излучения. Образцы СЭ облучались флюенсами электронов с энергиями 2 и 4.5 МэВ и протонов 10 МэВ. Радиационные испытания проводились на линейных ускорителях

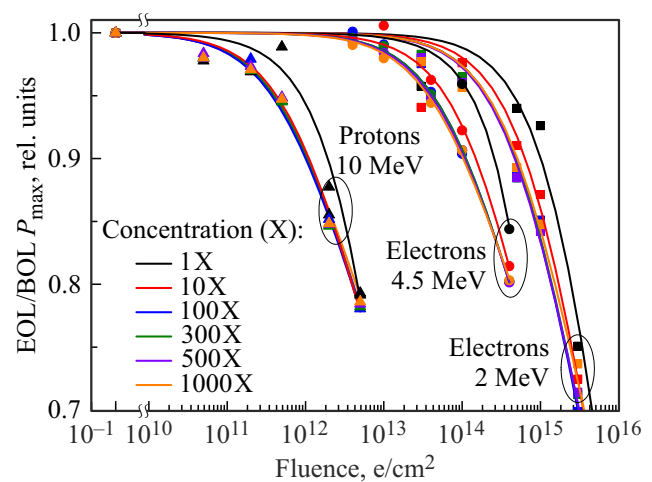


Рис. 1. Деградационные зависимости GaInP/Ga(In)As МП СЭ после радиационного облучения 2 МэВ (квадраты) и 4.5 МэВ (круги) электронами и 10 МэВ (треугольники) протонами при разной кратности концентрирования солнечного излучения.

частиц с площадью мишени для размещения образцов $< 20 \text{ см}^2$. Плотность потока частиц поддерживалась на уровне $0.2\text{--}1 \cdot 10^{12}$ частиц/см² · с. Флюенс электронов и протонов контролировался с использованием цилиндра Фарадея и дозиметров вторичного электронного тока, погрешность измерения флюенса составляла $< 10\%$. Температура образцов во время облучения не превышала 40°C .

Измерения ВАХ образцов производились в диапазоне освещенностей 1–1000 крат (рис. 1). При определении единой деградационной кривой для 1 МэВ электронов использовался расчетный коэффициент NIEL для GaAs-материала (как наименее стойкого к облучению) в соответствии с характерной для него энергией связи атомов [9,10]. Коэффициент n для электронов находится в результате регрессионного анализа экспериментальных данных методом наименьших квадратов. За оптимальное решение принимается такое значение n , при котором все экспериментально зарегистрированные зависимости формируют массив точек, через который можно провести единственную кривую с выполнением требования минимальности суммы квадратов отклонений экспериментальных данных и аналитического выражения.

Колебания значений полуэмпирических параметров C и D_x с ростом кратности солнечного излучения оказываются незначительными (рис. 2). Далее при расчетах C и D_x рассматриваются как константы, не зависящие от освещенности.

Ожидалось, что все деградационные характеристики должны „схлопнуться“ вне зависимости от кратности концентрирования излучения, формируя единую эквивалентную 1 МэВ логарифмическую кривую для выбранного фотоэлектрического параметра ($\frac{P}{P_0}$). Однако только зависимости при идентичных кратностях солнеч-

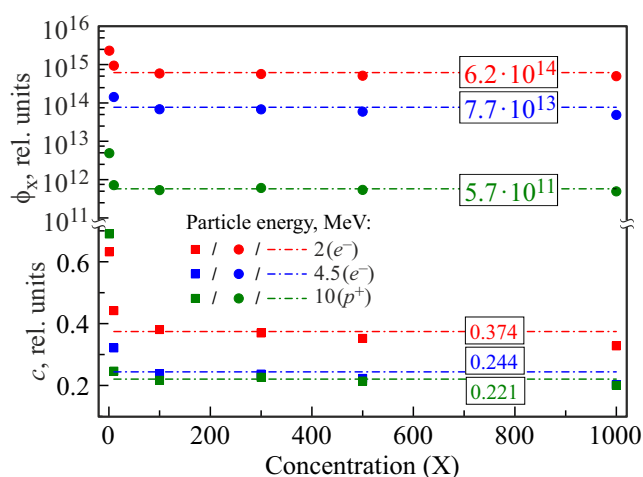


Рис. 2. Колебания значений полуэмпирических параметров C и D_x с ростом кратности солнечного излучения для электронов и протонов разных энергий. Цифры на графике соответствуют рассчитанным значениям соответствующих параметров.

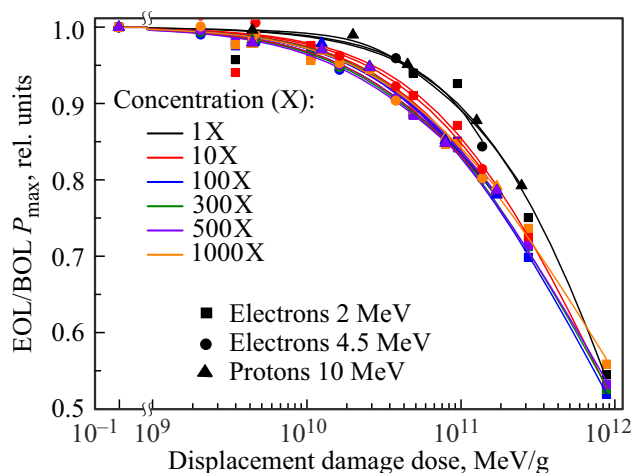


Рис. 3. Преобразование экспериментальных данных (рис. 1) в единую деградационную кривую для 1 МэВ электронов, рассчитанную по формуле (3).

ного излучения демонстрируют ожидаемую сходимость результатов (рис. 3).

Изменение условий тестирования (варьирование кратности концентрирования излучения) приводит к формированию семейства деградационных кривых: наименьшая оцениваемая деградация (максимальная радиационная стойкость) наблюдалась при минимальной световой облученности (1 крат), а по мере роста кратности концентрирования излучения скорость деградации увеличивается. Очевидно, что изменение освещенности меняет механизм протекания тока с вероятно преобладающего при режиме „одного Солнца“ рекомбинационного на диффузионный при концентрированной засветке. Одновременно имеется и рост эффективности СЭ с увеличением освещенности.

4. Заключение

В работе представлены деградационные характеристики трехпереходных GaInP/GaAs/Ge МП СЭ в диапазоне освещенностей 1–1000 крат, при облучении флюенсами электронов с энергиями 2 и 4.5 МэВ и протонов 10 МэВ. Исследование радиационной стойкости образцов проводилось с помощью NRL-подхода. Обнаружено, что при вариации кратности концентрирования солнечного излучения формирование единой деградационной кривой для 1 МэВ электронов NRL-методом невозможно. Прослеживая экспериментально полученные деградационные зависимости СЭ, следует заключить: прогнозирование ресурса СЭ концентрированного излучения в условиях радиационного воздействия следует вести на основе зависимостей с максимальным уровнем снижения соответствующего фотоэлектрического параметра. На основе полученных результатов видно (рис. 1, 3), что в диапазоне кратностей от 100X и выше наблюдаемая разница между деградационными кривыми (для различных X и типов частиц) статистически незначительна. Поэтому можно предположить, что для адекватной оценки радиационной стойкости концентраторных МП СЭ измерения следует проводить при освещенностях > 100 „Солнц“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.R. Messenger, G.P. Summers, E.A. Burke, R.J. Walters. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **9** (2), 103 (2001). DOI: 10.1002/pip.357
- [2] I. Jun, W. Kim, R. Evans. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **56** (6), 3229 (2009). DOI: 10.1109/TNS.2009.2034178
- [3] H.Y. Tada, J.R. Carter, B.E. Anspaugh, R.G. Downing. Pasadena: JPL Publication, **3**, 82 (1982).
- [4] B.E. Anspaugh. *GaAs Solar Cell Radiation Handbook* (JPL Publication, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 1996) p. 96-9.
- [5] G.P. Summers, E.A. Burke, P. Shapiro, S.R. Messenger, R.J. Walters. *IEEE Proc. 1st World Conf. on PV Energy Conversion (WCPE)*, Dec. 5–9, Waikoloa, Hawaii, **2**, 2068 (1994).
- [6] J. Lindhard, V. Nielsen, M. Scharff, P.V. Thomsen. *Mate-matisk-fysiske meddelelser udgivet af Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*, **33** (10), 42 (1963).
- [7] C. Leroy, P.-G. Rancoita. *Principles of radiation interaction in matter and detection*. Singapore: World Scientific, **3**, 1040 (2011). DOI: 10.1142/7915
- [8] G.P. Summers, E.A. Burke, P. Shapiro, S.R. Messenger, R.J. Walters. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **40**, 1372 (1993). DOI: 10.1109/23.273529
- [9] J.M. Raya Armenta, N. Bazmohammadi, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero. *Solar Energy Mater. and Solar Cells*, **233**, 111379 (2021). DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111379

- [10] M. Yamaguchi, N.J. Ekins-Daukes, H.-S. Lee, T. Sumita, M. Imaizumi, T. Takamoto, T. Agui, M. Kaneiwa, K. Kamimura, T. Ohshima, H. Itoh. *IEEE Proc. 4th World Conf. on PV Energy Conf.*, May 7–12, Hawaii, **2**, 1789 (2006). DOI: 10.1109/WCPEC.2006.279844

Редактор Г.А. Оганесян

Radiation degradation tracing for multi-junction solar cells operated at concentrated sunlight

S.A. Levina, V.M. Emelyanov-Girs, P.D. Kornienko, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The degradation characteristics of triple-junction GaInP/GaAs/Ge solar cells designed for the conversion of concentrated solar radiation are investigated. The samples were irradiated with electron fluences of 2 and 4.5 MeV and proton fluences of 10 MeV. The characteristics were measured in the range of illuminations of 1 to 1000 times. The search for a single degradation curve for 1 MeV electrons was conducted using the equivalent flux method.