

Исследование времен жизни неравновесных носителей заряда электролюминесцентным методом в многопереходных солнечных элементах при облучении протонами и электронами высоких энергий

© С.А. Левина, В.М. Емельянов, П.Д. Корниенко, В.Р. Ларионов,
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 2 мая 2025 г.

В окончательной редакции 26 июня 2025 г.

Принята к публикации 15 июля 2025 г.

Электролюминесцентным методом исследованы трехпереходные GaInP/Ga(In)As/Ge солнечные элементы после облучения 2 и 4.5 МэВ электронами и 10 МэВ протонами. Определены плотности рекомбинационных токов $p-n$ -переходов и рассчитаны зависимости времен жизни неравновесных носителей заряда в GaInP- и Ga(In)As-слоях в зависимости от флюенсов повреждающих частиц и дозы структурных повреждений, вычислены коэффициенты повреждения для рассмотренных материалов и частиц.

Ключевые слова: электролюминесценция, солнечный элемент, радиационная стойкость, рекомбинационный ток.

DOI: 10.61011/FTP.2025.04.61252.7988

Многопереходные (МП) солнечные элементы (СЭ) на сегодняшний день являются основным источником энергии для космических аппаратов, функционирующих как на различных орбитах Земли, так и создаваемых для полетов на Луну и Марс. При этом отличительной особенностью эксплуатации СЭ в космосе является воздействие на полупроводниковые структуры частиц высоких энергий, в первую очередь электронов и протонов, захваченных магнитным полем Земли, а также переносимых солнечными и галактическими космическими лучами. Такие частицы вызывают радиационное повреждение структуры, которое приводит к возникновению дополнительных центров безызлучательной рекомбинации [1]. Они вызывают сокращение времен жизни носителей заряда в фотоактивных слоях, следствием чего является:

– снижение внешнего квантового выхода (ВКВ) фотоответа и, соответственно, фототока СЭ (в случае МП СЭ – фототоков его субэлементов);

– увеличение плотностей темновых токов $p-n$ -переходов, что ведет к уменьшению напряжения и фактора заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) СЭ.

Традиционные подходы к анализу радиационной стойкости СЭ включают проведение ускоренных радиационных испытаний и анализ спектральных и вольт-амперных характеристик приборов после облучения, однако для монолитной структуры МП СЭ известную сложность представляет получение ВАХ составляющих его субэлементов. Эта задача является важной, поскольку каждый субэлемент может демонстрировать разную степень деградации (из-за отличий в конструкции полупроводнико-

вых структур, составе, толщине и степени легирования слоев).

Одним из способов получения информации индивидуально о каждом $p-n$ -переходе (независимо от других субэлементов) является метод электролюминесцентной диагностики [2–5], основанный на принципе обратимости фотоэлектрического преобразования и связи ВКВ фотоответа $p-n$ -перехода $EQE(\lambda)$ с его спектральной зависимостью электролюминесценции (ЭЛ) M от тока через $p-n$ -переход J [6]:

$$M(\lambda, J) = EQE(\lambda)B(\lambda) \left[\exp\left(\frac{eV(J)}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где e — элементарный заряд, $V(J)$ — ВАХ $p-n$ -перехода, λ — длина волны излучения, k — постоянная Больцмана, B — спектр абсолютно черного тела при данной температуре T . Метод позволяет определить ВАХ субэлемента по измеренной зависимости ЭЛ от тока при известном ВКВ фотоответа. Он был ранее успешно применен авторами для анализа характеристик МП СЭ, облученных нейтронами [7].

Результаты экспериментальных исследований образцов GaInP/Ga(In)As/Ge МП СЭ (табл. 1), которые были подвергнуты облучению электронами с энергией 2 и 4.5 МэВ и протонами с энергией 10 МэВ, представлены на рис. 1. По измеренным ВАХ с использованием метода наименьших квадратов определялись плотности диффузационного J_{01} и рекомбинационного J_{02} токов $p-n$ -переходов GaInP- и Ga(In)As-субэлементов в предположении, что их ВАХ описываются двухдиодной мо-

делью [8,9]:

$$J(V) = J_{ph} - J_{01} \left(\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right) - J_{02} \left(\exp \left(\frac{eV}{2kT} \right) - 1 \right), \quad (2)$$

где J_{ph} — плотность фототока.

В работе [7] было показано, что использование измеренной плотности диффузационного тока $p-n$ -перехода для определения времен жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) оказывается на практике невозможным, поэтому далее проводился анализ только рекомбинационного тока. Результаты расчетов J_{02} для GaInP и Ga(In)As приведены на рис. 2, а и 3, а соответственно.

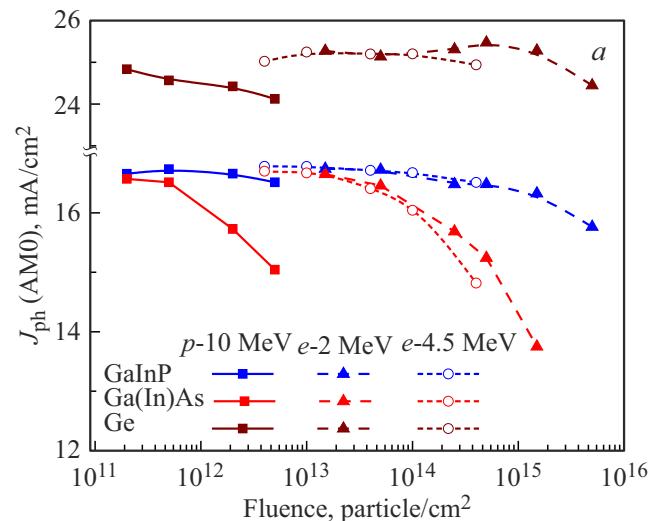


Рис. 1. Деградационные зависимости для плотностей фототоков субэлементов исследованных GaInP/Ga(In)As МП СЭ (a) до и после радиационного облучения 2 МэВ и 4.5 МэВ электронами и 10 МэВ протонами, а также зависимости „напряжение–ток“ для субэлементов, полученные методом электролюминесцентной диагностики при облучении 2 МэВ электронами (b). Зависимости „напряжение–ток“ при облучении 4.5 МэВ электронами и 10 МэВ протонами аналогичны представленным на рис. b и могут быть предоставлены по запросу.

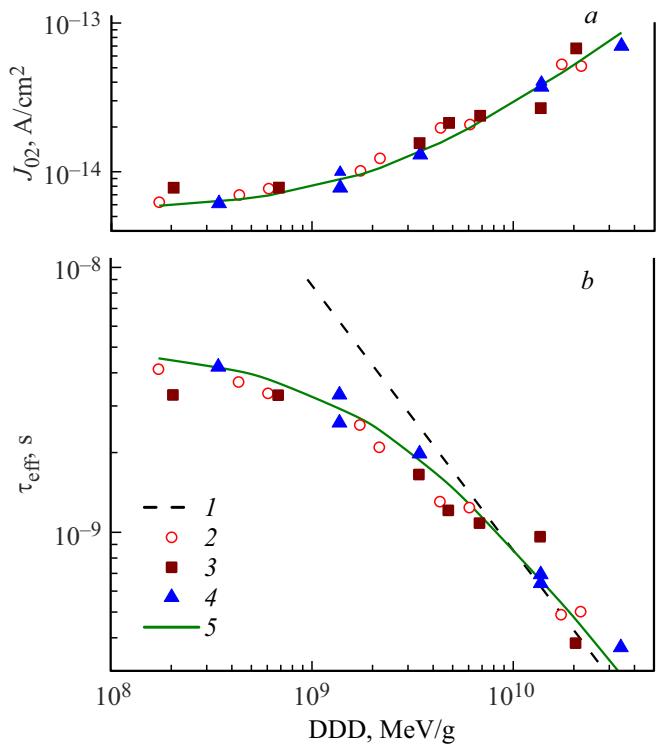


Рис. 2. Зависимости плотности рекомбинационного тока (a) и времени жизни неравновесных носителей заряда в ОПЗ (b) для GaInP-субэлемента от дозы структурных повреждений (DDD), отмасштабированной в соответствии с величиной неионизационных потерь (NIEL): 1 — литературные данные для облучения электронами с энергией 1 МэВ [11]; 2 — облучение электронами с энергией 2 МэВ; 3 — облучение электронами с энергией 4.5 МэВ; 4 — облучение протонами с энергией 10 МэВ; 5 — аппроксимация зависимостей 2 и 3.

Полученные зависимости были отмасштабированы с использованием коэффициента NIEL в соответствии с моделью „дозы структурных повреждений“, DDD [10]. При этом значение параметра R_{ep} (определенного как отношение DDD для электронов к аналогичной зависимости для протонов) принималось равным 3.11 [11], так как ЭЛ измерения субэлементов МП СЭ проводились в режиме, близком к режиму холостого хода.

Плотность рекомбинационного тока $p-n$ -перехода определяется рекомбинацией носителей заряда через глубокие центры в области пространственного заряда субэлемента. Функция рекомбинации ННЗ через глубокие центры имеет вид [8,9]

$$R(n, p) = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}, \quad (3)$$

где $\tau_p = (\gamma_p N_r)^{-0.5}$, $\tau_n = (\gamma_n N_r)^{-0.5}$ — времена жизни ННЗ в n - и p -слоях соответственно; γ_n , γ_p — коэффициенты захвата на глубокий центр для электронов и дырок; N_r — число глубоких центров; n , p — концентрации электронов и дырок, n_i — собственная концентрация носителей заряда. Коэффициенты n_1 и p_1 , имеющие

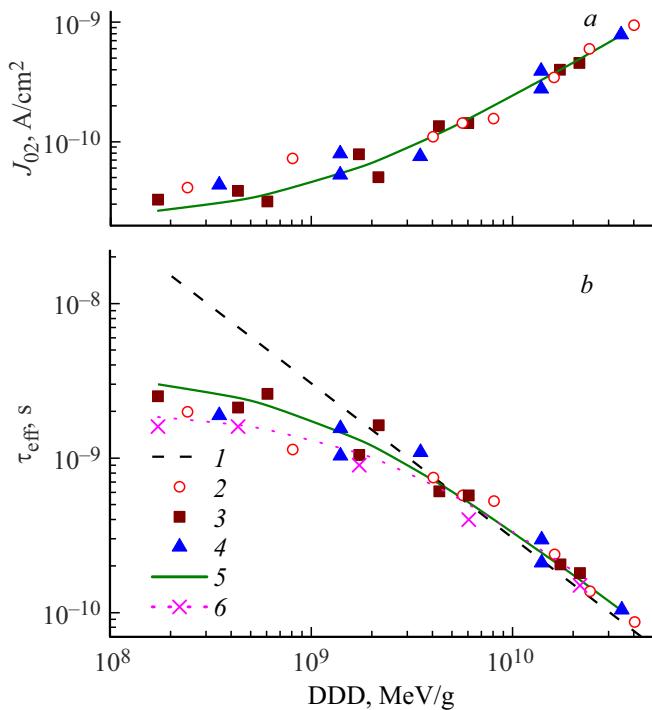


Рис. 3. Зависимости плотности рекомбинационного тока (*a*) и времени жизни неравновесных носителей заряда в ОПЗ (*b*) для Ga(In)As-субэлемента от дозы структурных повреждений (DDD), отмасштабированной в соответствии с величиной неионизационных потерь (NIEL): 1 — литературные данные для облучения электронами с энергией 1 МэВ [11]; 2 — облучение электронами с энергией 2 МэВ; 3 — облучение электронами с энергией 4.5 МэВ; 4 — облучение протонами с энергией 10 МэВ; 5 — аппроксимация зависимостей 2 и 3; 6 — времена жизни при облучении электронами с энергией 4.5 МэВ, определенные по величине внешнего квантового выхода фотоответа.

размерность концентраций, численно соответствуют количеству носителей заряда в таком полупроводнике, в котором уровень Ферми совпадает с уровнем рекомбинационного центра. Если поле внутри области пространственного заряда (ОПЗ) толщиной d достаточно слабо и можно считать концентрации электронов и дырок практически постоянными $n \approx p$, то рекомбинационный ток может быть оценен следующим образом:

$$n = n_i \left(\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right), \quad J_{02} = \frac{en_id}{\tau_{\text{eff}}}, \quad \tau_{\text{eff}} = \tau_n + \tau_p. \quad (4)$$

Такое может наблюдаться в случае, когда между n - и p -областями встроен нелегированный слой и длина экранирования Дебая оказывается меньше, чем толщина этого слоя d_i . На практике для $p-n$ -переходов в GaInP и Ga(In)As подобная ситуация может наблюдаться только в области напряжений > 1 В и i -области размером ~ 0.5 мкм и выше. Однако обычно в этом диапазоне напряжений доминирует инъекционный ток, нарастающий быстрее вследствие вдвое большего

показателя экспоненты, и рекомбинационный ток уже не оказывает влияния на форму ВАХ.

В исследованных субэлементах МП СЭ поле $p-n$ -перехода достаточно велико и границы зоны проводимости и валентной зоны плавно изменяются от легированного донорами к легированному акцепторами слоям. Рекомбинационный ток должен быть найден как интеграл от выражения (3) по всей области пространственного заряда:

$$J_{02} \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] = e \times \int_0^d \frac{n_i^2 \left(\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right) dx}{\tau_n \left(p_1 + p(d) \exp \left(\frac{e\varphi(x)}{kT} \right) \right) + \tau_p \left(n_1 + n(0) \exp \left(\frac{e(\varphi(x) - V_0 + V)}{kT} \right) \right)}, \quad (5)$$

где V_0 — контактная разность потенциалов, φ — электростатический потенциал. Здесь принято, что n -область соответствует координате $x < 0$, а p -область — $x > d$.

Приближенное значение плотности рекомбинационного тока из этого интеграла может быть найдено как

$$J_{02} = \frac{en_id_{\text{eff}}}{\tau_{\text{eff}}}, \quad \tau_{\text{eff}} = \sqrt{\tau_n \tau_p}, \quad d_{\text{eff}} = \frac{kT}{e} \left(\frac{d\varphi}{dx} \right) \Big|_{\varphi=\varphi'},$$

где

$$\exp \left(\frac{e\varphi'}{kT} \right) = \sqrt{\frac{\tau_n p(d)}{\tau_p n(0)}} \exp \left(\frac{e(V_0 - V)}{2kT} \right). \quad (6)$$

На рис. 2, *b* и 3, *b* представлены зависимости времен жизни ННЗ, определенные из величин плотности рекомбинационного тока. На них пунктиром приведены зависимости времени жизни ННЗ от флюенса для облучения электронами с энергией 1 МэВ [12].

Из рисунков видно, что полученные зависимости времени жизни ННЗ от флюенса повреждающих частиц хорошо согласуются с описанной в настоящей работе моделью. Также на рис. 3, *b* приведена зависимость времени жизни ННЗ от дозы электронов с энергией 4.5 МэВ, определенная по величине внешнего квантового выхода (ВКВ) фотоответа для Ga(In)As-субэлемента [13]. Она практически совпадает с результатами ЭЛ исследований, за исключением начального участка. Это объясняется тем, что при многократном превышении диффузионной длины ННЗ над толщинами n - и p -слоев субэлемента наблюдается практически полное сорбирование фотогенерированных носителей заряда в $p-n$ -переходе и определение времени жизни по величине ВКВ фотоответа не может обеспечить достоверность результатов.

Таким образом, продемонстрирована эффективность использования плотности рекомбинационного тока $p-n$ -перехода, измеренной с помощью электролюминесцентного метода, для нахождения времени жизни неравновесных носителей заряда при радиационных испытаниях

Таблица 1. Параметры структуры исследованного GaInP/Ga(In)As МП СЭ

Наименование слоя	Обозначение материала (наименование подслоя)	Толщина слоя, нм
Верхний субэлемент	$n\text{-Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ (широкозонное окно)	30
	$n\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (эмиттер)	50
	$p\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (база)	450
	$p\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (тыльный потенциальный барьер (ТПБ))	100
Верхний туннельный диод	$p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ (p -слой)	15
	$n^{++}\text{-GaAs}$ (n -слой)	15
Средний субэлемент	$n\text{-Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ (широкозонное окно)	30
	$n\text{-Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ (эмиттер)	90
	$\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ (i -область)	0.1
	$p\text{-Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ (база)	1800
	$p\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (ТПБ)	100
Нижний туннельный диод	$p\text{-}(AlGa)_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (стоп-слой)	30
	$p^{++}\text{-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ (p -слой)	30
	$n^{++}\text{-GaAs}$ (n -слой)	30
	$n\text{-Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (барьерный слой)	100
Брэгговский отражатель 15 периодов	$n\text{-GaAs}/n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$	68/62
Буферный слой	$n\text{-Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$	300
Нижний субэлемент	$n\text{-Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (широкозонное окно)	90
	$n\text{-Ge}$ (эмиттер)	150
	$p\text{-Ge}$ (подложка)	175000 ± 5000

Таблица 2. Измеренные коэффициенты повреждения времени жизни ННЗ для материалов GaInP и Ga(In)As при облучении частицами высоких энергий

Материал	Коэффициент повреждения для частиц, см ² /с		
	2 МэВ электроны	4.5 МэВ электроны	10 МэВ протоны
GaInP	$(1.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-6}$	$(4.0 \pm 0.6) \cdot 10^{-6}$	$(5.9 \pm 0.9) \cdot 10^{-4}$
Ga(In)As	$(4.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-6}$	$(0.9 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$	$(1.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$

приборов. Определены коэффициенты повреждения для субэлементов на основе материалов GaInP и Ga(In)As при облучении МП СЭ электронами с энергией 2 и 4.5 МэВ и протонами с энергией 10 МэВ (табл. 2).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.M. Raya-Armenta, N. Bazmohammadi, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero. SEM and SC, **233**, 111379 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111379>
- [2] G. Yan, J. Wang, J. Liu, Y. Liu, R. Wu, R. Wang. J. Luminesc., **219**, 16905 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116905>
- [3] R. Hoheisel, D. Scheiman, S. Messenger, P. Jenkins, R. Walters. IEEE Trans. Nucl. Sci., **62** (6), 2894 (2015). <https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2498838>
- [4] W. Zhang, A. Aierken, Yu Zhuang, B. Wang, L. Fang, Sh. Zhang, D. Zhang, X. Yang, Q. Song, T. Wang. Int. J. Energy Res., **46** (10), 14060 (2022). <https://doi.org/10.1002/er.8122>
- [5] T. Kirchartz, U. Rau, M. Hermle, A.W. Bett, A. Helbig, J.H. Werner. Appl. Phys. Lett., **92**, 123502 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2903101>
- [6] U. Rau. Phys. Rev. B, **76**, 085303 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.085303>
- [7] S.A. Levina, V.M. Emelyanov, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shvarts. Appl. Phys. Lett., **125** (13), 132105 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0218485>
- [8] C. Sah, R.N. Noyce, W. Shockley. Proc. IRE, **45** (9), 1228 (1957). <http://dx.doi.org/10.1109/JRPROC.1957.278528>
- [9] А.М. Васильев, А.П. Ландсман. *Полупроводниковые преобразователи* (М. Сов. радио, 1971).
- [10] C. Baur, M. Gervasi, P. Nieminen, S. Pensotti, P.G. Rancoita, M. Tacconi. Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Phys. Appl., 692 (2014). https://doi.org/10.1142/9789814603164_0111

- [11] S.R. Messenger, G.P. Summers, E.A. Burke, R.J. Walters, M.A. Xapsos. Progr. Photovolt., **9** (2), 103121 (2001).
<https://doi.org/10.1002/pip.357>
- [12] M. Yamaguchi, T. Sasaki, H.-S. Lee, C. Morioka, N.J. Ekins-Daukes, M. Imaizumi. 33rd IEEE Photovolt. Specialists Conf. (2008).
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922716>
- [13] S.A. Mintairov, V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnny, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov. Phys. Semicond. Dev., **44** (8), 1084 (2010).
<https://doi.org/10.1134/S1063782610080233>

Редактор Г.А. Оганесян

Study of lifetimes of nonequilibrium charge carriers by electroluminescence method in multijunction solar cells under irradiation with high-energy protons and electrons

*S.A. Levina, V.M. Emelyanov, P.D. Kornienko,
V.R. Larionov, M.V. Hakhimovich, M.Z. Shvarts*

Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Triple-junction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells were studied by the electroluminescence method after irradiation with 2 and 4.5 MeV electrons and 10 MeV protons. The recombination current densities of *p*–*n* junctions were determined and the dependences of the lifetimes of nonequilibrium charge carriers in GaInP and Ga(In)As layers were calculated depending on the fluences of damaging particles and the dose of structural damage, the damage coefficients for the considered materials and particles were calculated.