

# Действие повреждающих облучений ( $p, e, \gamma$ ) на фотовольтаические и туннельные $p-n$ -переходы из GaAs и GaSb

© В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский<sup>¶</sup>, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков

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

(Получена 17 октября 2006 г. Принята к печати 31 октября 2006 г.)

Свойства многопереходных солнечных элементов зависят от свойств составляющих фотовольтаических и туннельных  $p-n$ -переходов. В настоящей работе свойства области пространственного заряда фотовольтаических и туннельных  $p-n$ -переходов изучались с помощью темновой вольт-амперной характеристики на примере двух полупроводников: узкозонного, GaSb, и широкозонного, GaAs. Изучено действие повреждающих радиационных облучений протонами (энергия 6.78 МэВ, максимальный флюенс  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), электронами (энергия 1 МэВ, максимальный флюенс  $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) и  $\gamma$ -квантами (1.17–1.33 МэВ, максимальная доза 17 Мрад) на время жизни носителей в области пространственного заряда фотовольтаических  $p-n$ -переходов и на пиковый ток соединительных туннельных  $p-n$ -переходов. В фотовольтаических  $p-n$ -переходах определены коэффициенты повреждения обратного времени жизни. Определены коэффициенты эквивалентности между использованными облучениями, которые по порядку величины оказались почти не зависящими от типа и материала  $p-n$ -перехода (примерно одинаковы для фотовольтаических и туннельных  $p-n$ -переходов из GaAs и для туннельных  $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb).

PACS: 61.80.Ed, 61.80.Fe, 61.80.Jh, 73.40.Kp, 84.60.Jt, 85.30.Kk

## 1. Введение

Как известно, область пространственного заряда (ОПЗ) определяет механизмы токопрохождения в фотовольтаических и светоизлучающих  $p-n$ -переходах из  $A^{III}B^V$  при достаточно малых плотностях тока,  $I < (10^{-3} - 10^{-1}) \text{ А/см}^2$  [1–5]. Поэтому значимость ОПЗ для многопереходных солнечных элементов возрастает с ростом числа фотовольтаических генерирующих  $p-n$ -переходов из-за уменьшения согласованного фотогенерируемого тока, что особенно важно при преобразовании неконцентрированного солнечного излучения.

Кроме того, свойства соединительных туннельных переходов также определяются процессами в ОПЗ. Исследование вольт-амперных характеристик — один из простых и доступных методов изучения ОПЗ. Безрезисторная (не учитывающая влияние последовательного сопротивления  $p-n$ -структуры) темновая вольт-амперная характеристика перехода позволяет, в частности, рассчитывать потенциальную, т.е. предельно возможную эффективность (кпд) солнечного элемента, созданного на базе изучаемого  $p-n$ -перехода.

В настоящей работе изучались общие свойства вольт-амперных характеристик фотовольтаических и туннельных  $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb до и после действия протонного, электронного и  $\gamma$ -облучения. Отметим, что выбранные фотовольтаические переходы используются как субэлементы в tandemных (механически состыкованных) солнечных элементах (СЭ). Фотовольтаические  $p-n$ -переходы на основе GaAs были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) и низкотемпературной жидкофазной эпитаксии (LT LPE) [2]. Фотовольтаические  $p-n$ -переходы на основе GaSb были созданы методом жидкофазной

эпитаксии (LPE) [2]. Исследованные туннельные  $p-n$ -переходы из GaAs и GaSb получены методом LT LPE [3].

Облучение производилось протонами с энергией  $E_p = 6.78 \text{ МэВ}$ , флюенсами  $F_p = 3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , электронами с энергией  $E_e = 1 \text{ МэВ}$ , флюенсами  $F_e = 3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  и  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  с энергиями  $E_\gamma = 1.17 - 1.33 \text{ МэВ}$ , дозами 1.7–17 Мрад, соответствующими флюенсам  $3 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Все облучения осуществлялись при температуре  $T = 300 \text{ К}$  и низких интенсивностях потоков радиационных частиц, исключаящих какой-либо нагрев ОПЗ исследуемых СЭ.

## 2. Механизмы протекания прямого тока: значимость области пространственного заряда перехода

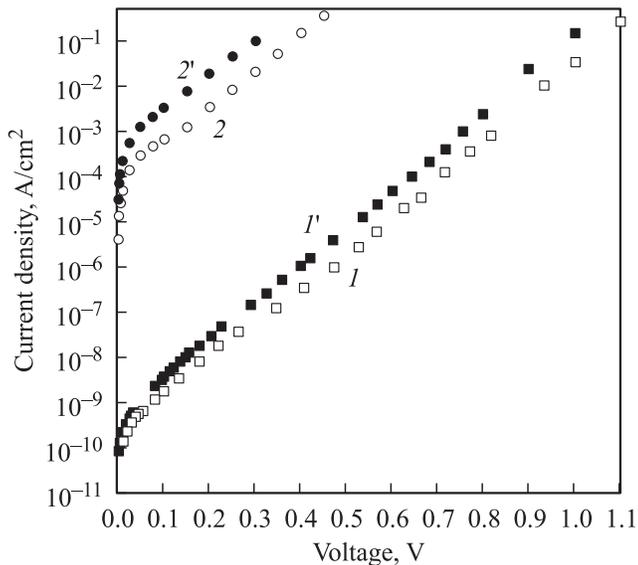
### 2.1. Фотовольтаические (генерирующие) переходы

Обобщение и суммирование экспериментальных результатов [1–4] по фотовольтаическим  $p-n$ -переходам из GaAs и GaSb показывает, что прямой ток складывается по крайней мере из трех компонент: нижней — туннельно-ловушечной (диодный коэффициент  $A > 2$ ), средней — рекомбинационной ( $A = 2$ ) и верхней — диффузионной ( $A = 1$ ). Выражение для плотности тока имеет вид

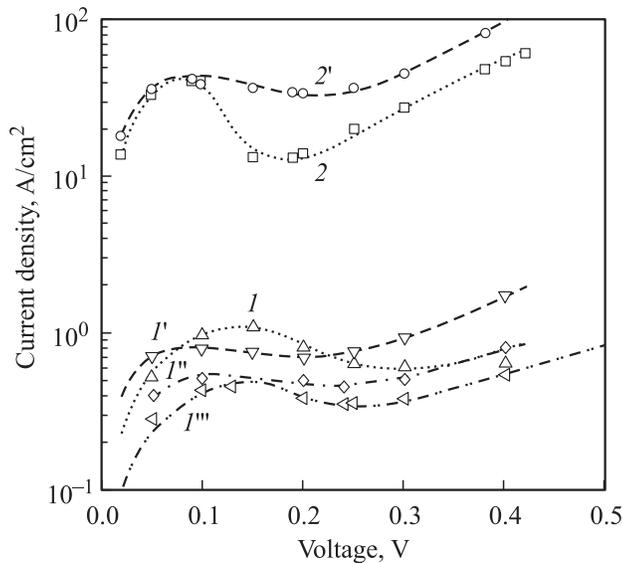
$$J = J_{or}[\exp(qV_j/kT) - 1] + J_{or}[\exp(qV_j/2kT) - 1] + J_{od}[\exp(qV_j/kT) - 1]. \quad (1)$$

Здесь  $V_j$  — напряжение на переходе,  $q$  — заряд электрона,  $T$  — температура,  $k$  — постоянная Больцмана,  $J_{or}$ ,  $J_{or}$ ,  $J_{od}$  — предэкспоненциальные множители в соответствующих компонентах тока.

<sup>¶</sup> E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru



**Рис. 1.** Темновые вольт-амперные характеристики фотовольтаических  $p-n$ -переходов из GaAs ( $I, I'$ ) и GaSb ( $2, 2'$ ) до ( $I, 2$ ) и после ( $I', 2'$ ) протонного облучения с  $E_p = 6.78$  МэВ,  $F_p = 3 \cdot 10^{12}$  см $^{-2}$ .



**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики туннельных  $p-n$ -переходов из GaAs ( $I, I', I'', I'''$ ) и GaSb ( $2, 2'$ ), перед протонным облучением ( $I, 2$ ) и после.  $F_p$ , см $^{-2}$ :  $I', 2'$  —  $3 \cdot 10^{10}$ ,  $I''$  —  $3 \cdot 10^{11}$ ,  $I'''$  —  $3 \cdot 10^{12}$ .

Кроме того, есть основания считать, что в некоторых GaAs-переходах есть еще одна верхняя компонента с дробным числовым диодным коэффициентом  $A = 5/4 < 2$ . Непосредственное измерение темновой вольт-амперной характеристики дает только туннельно-ловушечную и рекомбинационную компоненты (рис. 1), так как неизбежное наличие последовательного сопротивления  $p-n$ -структуры часто „маскирует“ диффузионную компоненту. Ее наличие устанавливается дополни-

тельными фотовольтаическими и электролюминесцентными измерениями.

Область пространственного заряда  $p-n$ -перехода задает туннельно-ловушечную и рекомбинационную компоненты, из которых для солнечных элементов, особенно многопереходных, более актуальна рекомбинационная, имеющая предэкспоненциальные множители  $J_{0r} = 10^{-11} - 10^{-10}$  А/см $^2$  (GaAs),  $J_{0r} = 10^{-5} - 10^{-4}$  А/см $^2$  (GaSb). Из них определяются времена жизни носителей (электронно-дырочных пар) в ОПЗ согласно теории Sah-Noyce-Shockley:  $\tau_w = 10^{-8} - 10^{-9}$  с (GaAs),  $\tau_w = 5 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-9}$  с (GaSb),

Отметим, что, согласно [6], ОПЗ задает также компоненту с  $A = 5/4$ , в которой предэкспоненциальный ток-вый множитель составляет  $J_0 \approx (1 - 5) \cdot 10^{-15}$  А/см $^2$ .

## 2.2. Туннельные (соединительные) переходы

Прямой ток туннельных переходов из GaAs и GaSb составлен из двух туннельных компонент: межзонной (Esaki) и туннельно-ловушечной (избыточной) (рис. 2):

$$J = J_p(V_j/V_p) \exp(1 - V_j/V_p) + J_{0r}[\exp(qV_j/kT) - 1]. \quad (2)$$

Обе эти компоненты обусловлены туннельными процессами в ОПЗ. Актуальной для многопереходных солнечных элементов является межзонная компонента, задающая соединительное сопротивление, для которой: плотность пикового тока  $J_p = 1.0 - 15$  А/см $^2$  (GaAs),  $J_p = 40 - 50$  А/см $^2$  (GaSb), пиковое напряжение  $V_p = 0.1 - 0.15$  В (GaAs),  $V_p = 0.05 - 0.1$  В (GaSb). Соответственно величины дифференциального сопротивления в нулевой точке,  $R_{diff} = (1/2.72)(V_p/J_p)$ , равны  $0.0025 - 0.05$  Ом · см $^2$  (GaAs) и  $0.001 - 0.007$  Ом · см $^2$  (GaSb).

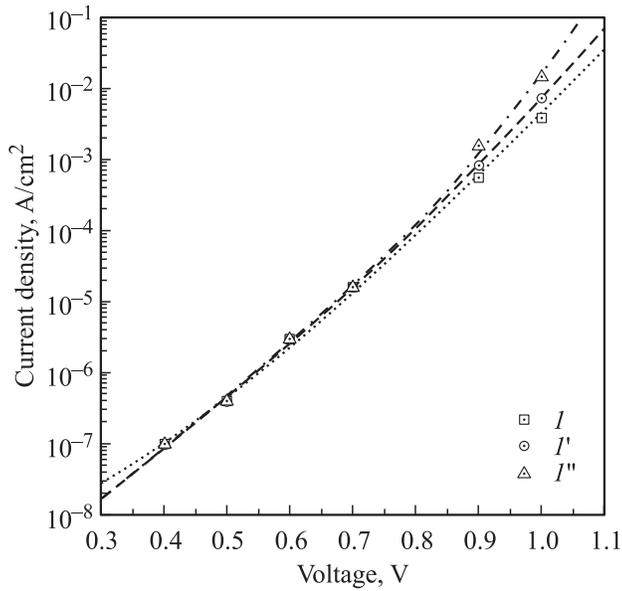
Предметом интереса при действии повреждающих облучений является пиковый ток.

## 3. Действие повреждающих облучений ( $p, e, \gamma$ ) на фотовольтаические $p-n$ -переходы из GaSb и GaAs

### 3.1. Деградация темновых вольт-амперных характеристик

В результате воздействия использованных радиационных облучений возрастают туннельно-ловушечная ( $A > 2$ ) и рекомбинационная ( $A = 2$ ) компоненты, а также компонента с диодным коэффициентом  $A < 2$  (дробночисленная [6] либо диффузионная).

Отметим опережающий рост рекомбинационной компоненты по сравнению с туннельно-ловушечной в  $p-n$ -переходах из GaSb и GaAs при протонном облучении ( $E_p = 6.78$  МэВ,  $F_p = 3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{12}$  см $^{-2}$ ) (рис. 1) и опережающий рост компоненты с  $A < 2$  по сравнению с рекомбинационной ( $A = 2$ ) в  $p-n$ -переходах из GaAs



**Рис. 3.** Деграция темновой вольт-амперной характеристики фотовольтаического  $p-n$ -перехода из GaAs при электронном облучении с  $E_e = 1$  МэВ:  $I$  — перед облучением,  $I'$  — облучение с  $F_e = 3 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ ,  $I''$  — облучение с  $F_e = 3 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  (опережающий рост компоненты с  $A < 2$ ).

при электронном облучении (рис. 3). Таким образом, из рис. 1 и 3, а также из литературных данных [7] следует эмпирический результат, относящийся к компонентам, обусловленным ОПЗ: чем меньше диодный коэффициент, тем быстрее радиационная деграция. Возможно, что величина диодного коэффициента характеризует сложность соответствующего радиационного дефекта.

Предметом основного интереса является рекомбинационная компонента, позволяющая определить обратное время жизни носителей в ОПЗ ( $1/\tau_w$ ), которое пропорционально концентрации безызлучательных рекомбинационных центров в ОПЗ. Предэкспоненциальные множители рекомбинационных компонент,  $J_{0r}$ , определены путем аппроксимации экспериментальных вольт-амперных характеристик суммой экспонент (обычно достаточно двух экспонент).

### 3.2. Деграция времени жизни в области пространственного заряда

Обратное время жизни носителей в ОПЗ возрастает с увеличением флюенса сублинейно (рис. 4). Можно ввести понятие коэффициента повреждения по отношению к обратному времени жизни в ОПЗ:

$$K_{1/\tau_w} = \frac{\Delta(1/\tau_w)}{F}, \quad (3)$$

где  $F$  — величина флюенса при протонном, электронном или  $\gamma$ -облучении,  $\Delta(1/\tau_w)$  — увеличение обратного времени жизни в результате облучения.

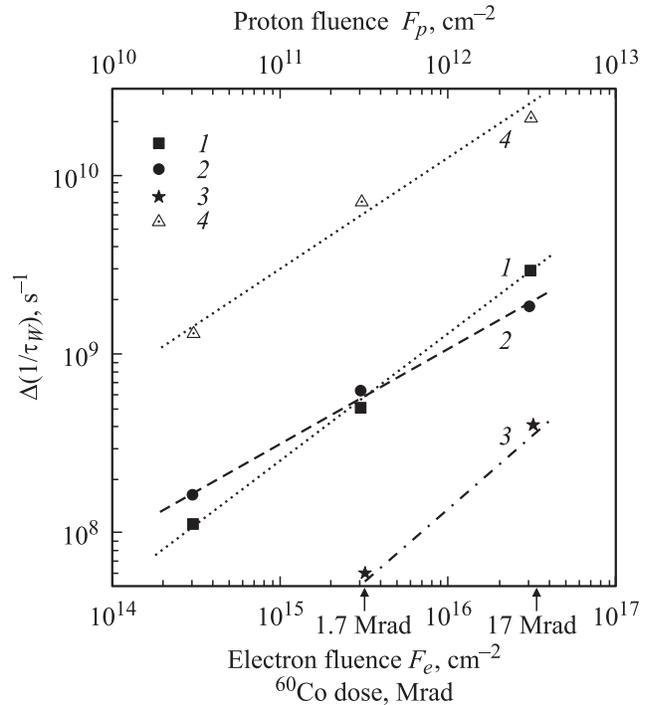
Вследствие указанной сублинейности (рис. 4) коэффициент повреждения (3) зависит от флюенса и уменьшается при его увеличении. Аналогичный результат наблюдался для коэффициента повреждения по отношению к диффузионной длине [8]. Для использованного протонного облучения в таблице приведены средние значения коэффициента повреждения по обратному времени жизни в ОПЗ. Для GaSb средний коэффициент протонного повреждения больше, чем для GaAs.

Средние значения коэффициента повреждения по обратному времени жизни при протонном облучении

Флюенс протонов $F_p$ , см $^{-2}$	Коэффициент повреждения $K_{1/\tau_w}$ , см $^2$ /с	
	GaAs	GaSb
$3 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-2}$
$3 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-2}$
$3 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$

*Примечание.* Энергия протонов  $E_p = 6.78$  МэВ.

Рис. 4 позволяет оценить по порядку величины коэффициенты эквивалентности между использованными протонным, электронным и  $\gamma$ -облучением для GaAs:  $K_{ep} \approx 10^4 e/p$ , (электроны 1 МэВ — протоны 6.78 МэВ),  $K_{\gamma p} \approx 10^5 \gamma/p$ , ( $\gamma$ -кванты  $^{60}\text{Co}$  — протоны 6.78 МэВ),  $K_{\gamma e} \approx 10 \gamma/e$ , ( $\gamma$ -кванты  $^{60}\text{Co}$  — электроны 1 МэВ).



**Рис. 4.** Возрастание обратного времени жизни носителей (электронно-дырочных пар) в области пространственного заряда фотовольтаических  $p-n$ -переходов из GaAs (1, 2, 3) и GaSb (4) при протонном с  $E_p = 6.78$  МэВ (1, 4), электронном с  $E_e = 1$  МэВ (2) и  $\gamma$ -облучении (3).

#### 4. Действие повреждающих облучений ( $p, e, \gamma$ ) на туннельные $p-n$ -переходы из GaSb и GaAs

В результате воздействия использованных облучений уменьшается пиковый ток межзонной компоненты примерно в 2 раза для GaAs и в 5 раз для GaSb (рис. 2). Соответственно возрастает дифференциальное сопротивление в нулевой точке, поскольку пиковое напряжение почти не меняется.

Уменьшение пикового тока с ростом флюенса интерпретируется как расширение ОПЗ вследствие радиационно-стимулированной диффузии электрически активных примесей.

Пиковый ток зависит от ширины ОПЗ ( $W$ ) экспоненциально:

$$J_p \propto \exp(-\alpha W/\lambda_t), \quad (4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент формы барьера (порядка 1),  $\lambda_t$  — характерная длина туннелирования (0.6 нм для GaAs и 0.3 нм для GaSb),

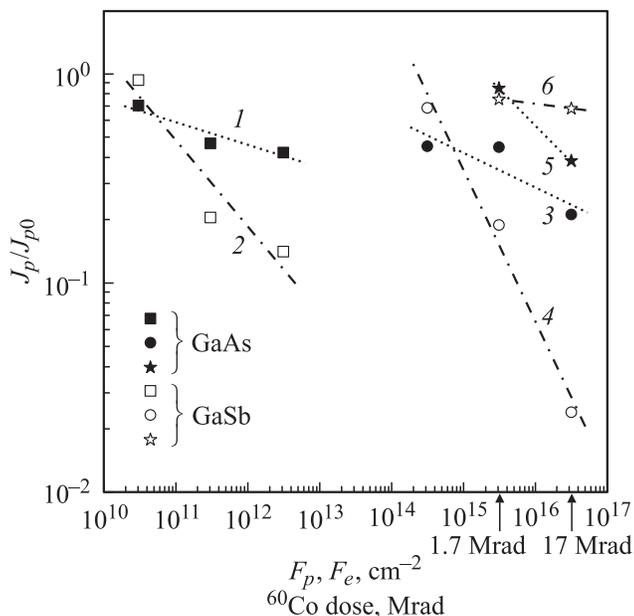
$$\lambda_t = \frac{\hbar}{\sqrt{2m^*E_g}}, \quad (5)$$

$\hbar$  — постоянная Планка,  $m^*$  — эффективная масса при туннелировании,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны (0.726 эВ в GaSb, 1.424 эВ в GaAs).

Расширение ОПЗ есть

$$\Delta W = \frac{\lambda_t}{\alpha} \ln \frac{J'_p}{J''_p}, \quad (6)$$

$J'_p/J''_p$  — относительное изменение пикового тока.



**Рис. 5.** Уменьшение пикового тока туннельных  $p-n$ -переходов из GaAs (1, 3, 5) и GaSb (2, 4, 6) при протонном (1, 2), электронном (3, 4) и  $\gamma$ -облучении (5, 6).

Уменьшение пиковых токов при облучениях  $J_p/J_{p0}$  показано на рис. 5, из которого можно оценить коэффициенты эквивалентности. Эти коэффициенты по порядку величины одинаковы для туннельных  $p-n$ -переходов из GaAs и GaSb:  $K_{ep} \approx 10^4 e/p$ ,  $K_{\gamma p} \approx 10^5 \gamma/p$ ,  $K_{\gamma e} \approx 10 \gamma/e$ .

#### 5. Заключение

На примере GaAs и GaSb показаны существенные свойства фотовольтаических (генерирующих) и туннельных (соединительных)  $p-n$ -переходов из  $A^{III}B^V$ , образующих многопереходный солнечный элемент, и влияние на них протонного, электронного и  $\gamma$ -облучения.

При увеличении числа  $p-n$ -переходов и, следовательно, при уменьшении единого фотогенерируемого тока роль области пространственного заряда  $p-n$ -переходов возрастает, особенно при неконцентрированном солнечном освещении многопереходных солнечных элементов.

В ОПЗ солнечных элементов особенный интерес представляет рекомбинационный ток (диодный коэффициент  $A = 2$ ) в случае фотовольтаических  $p-n$ -переходов и пиковый ток в случае туннельных  $p-n$ -переходов.

Все три использованных облучения (протонами, электронами,  $\gamma$ -квантами) приводят к качественно одинаковым изменениям в области пространственного заряда  $p-n$ -переходов. В фотовольтаических  $p-n$ -переходах рекомбинационный ток растет, т.е. уменьшается время жизни носителей (электронно-дырочных пар) в ОПЗ,  $\tau_w$ . В туннельных  $p-n$ -переходах пиковый ток уменьшается, т.е. увеличивается ширина ОПЗ,  $W$ .

Коэффициент повреждения обратного времени жизни,  $K_{1/\tau_w} = \Delta(1/\tau_w)/F$ , при использованном протонном облучении в узкозонном полупроводнике (GaSb) примерно на порядок больше, чем в широкозонном (GaAs):  $K_{1/\tau_w} = (1-4.5) \cdot 10^{-2}$  и  $(1-4) \cdot 10^{-3}$   $\text{см}^2/\text{с}$  соответственно.

Коэффициенты эквивалентности между использованными облучениями по порядку величины практически не зависят от типа и материала исследованных  $p-n$ -переходов:  $K_{ep} \approx 10^4 e/p$  (электроны 1 МэВ — протоны 6.78 МэВ),  $K_{\gamma p} \approx 10^5 \gamma/p$ , ( $\gamma$ -кванты  $^{60}\text{Co}$  — протоны 6.78 МэВ),  $K_{\gamma e} \approx 10 \gamma/e$ , ( $\gamma$ -кванты  $^{60}\text{Co}$  — электроны 1 МэВ).

В заключение авторы выражают признательность Г.М. Гусинскому за помощь в проведении экспериментов по протонному облучению, А.Н. Именкову и Г.В. Ильменкову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Федерального космического агентства России.

#### Список литературы

- [1] V.S. Kalinovskiy, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov. Proc. Conf. „PV in Europe — From PV Technology to Energy Solution“ (Rome, 2002) p. 63.

- [2] V.S. Kalinovsky, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov. *Proc. 3rd World Conf. Photovolt. Energy Conv.* (Osaka, 2003) 3p534.
- [3] V.S. Kalinovsky, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.P. Khvostikov. *Proc. 19th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Paris, 2004) p. 3692.
- [4] V.S. Kalinovsky, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.P. Khvostikov, O.A. Khvostikova. *Proc. 20th Eur. Photovolt. Solar Energy Conf.* (Barcelona, 2005) p. 503.
- [5] А. Берг, П. Дин. *Светодиоды* (М., Мир, 1970) гл. 2, с. 74. [Пер. с англ.: A.A. Bergh, P.J. Dean. *Light Emitting Diodes* (Oxford, Clarendon Press, 1976)].
- [6] В.В. Евстропов, И.Л. Петрович, Б.В. Царенков. ФТП, **15**(11), 2152 (1981).
- [7] R.Y. Loo, G.S. Kamath, S.S. Li. *IEEE Trans Electron. Dev.*, **37**(2), 485 (1990).
- [8] M.Z. Shvarts, O.I. Chosta, V.P. Khvostikov, E.V. Paleeva, V.M. Andreev. *Proc. 5th Eur. Space Power Conf.* (Tarragona, 1998).

Редактор Л.В. Шаронова

## Effect of damaging irradiations ( $p$ , $e$ , $\gamma$ ) on photovoltaic and tunnel GaAs and GaSb $p$ - $n$ junctions

V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.S. Kalinovsky,  
V.M. Lantratov, V.P. Khvostikov

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Properties of multijunction solar cells depend on the properties of composing photovoltaic and tunnel  $p$ - $n$  junctions. In the present work, the space charge region properties of photovoltaic and tunnel  $p$ - $n$  junctions were studied by means of the dark current-voltage characteristic on the example of two semiconductors: narrow-band GaSb and wide-band GaAs. The effect of proton (6.78 MeV, maximum fluence  $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ), electron (1 MeV, maximum fluence  $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) and gamma (1.17–1.33 MeV, maximum dose 17 MRad) damaging irradiations on the carrier lifetime in the space charge region of photovoltaic  $p$ - $n$  junctions and on the peak current of connecting tunnel  $p$ - $n$  junctions has been studied. The damage coefficients of the inverse carrier lifetime in photovoltaic  $p$ - $n$ -junctions have been determined, as well the coefficients of equivalency between the used irradiations, which do not almost depend by the order of magnitude on the type and on the material of the  $p$ - $n$  junction (they are approximately alike for photovoltaic and tunnel GaAs  $p$ - $n$  junctions and tunnel GaAs and GaSb  $p$ - $n$  junctions).