

УДК 621.315.592

## ИЗУЧЕНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР $A^{III}B^V$ В УСЛОВИЯХ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2014 г. М. Н. Орлова<sup>1</sup>, С. Ю. Юрчук<sup>1</sup>, С. И. Диденко<sup>1</sup>, К. И. Таперо<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт приборов» (ФГУП «НИИП»), промзона Тураево, стр. 8, Лыткарино, Московская обл., 140080, Россия

Солнечное излучение, является практически неисчерпаемым и экологически чистым источником энергии. Солнечные батареи относятся к категории приборов, чувствительных к облучению. Поэтому проблема создания радиационно-устойчивых солнечных батарей стоит достаточно остро. При эксплуатации солнечные батареи (СБ) подвергаются воздействию жесткого корпускулярного излучения (радиационные пояса Земли, солнечное и космическое излучение), в результате чего в структуре накапливаются нарушения приводящие к постепенному ухудшению их электрических характеристик.

Проведены экспериментальные исследования деградации характеристик однокаскадных солнечных элементов на основе GaAs с Ge-подложкой вследствие структурных повреждений, образующихся при пошаговом облучении быстрыми нейтронами и электронами с различным флюенсом. До и после набора каждого флюенса нейтронов и электронов проведены измерения световых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектров фоточувствительности солнечных элементов. По измеренным ВАХ определены следующие параметры: ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, максимальный коэффициент полезного действия (отношение максимальной мощности к произведению плотности потока солнечной энергии и площади элемента), фактор заполнения (отношение максимальной мощности к произведению тока короткого замыкания и напряжения холостого хода).

**Ключевые слова:** солнечные элементы, GaAs, деградация, нейтронное излучение, электронное излучение

### Введение

Степень деградации электрофизических характеристик солнечных батарей (СБ) существенно зависит от параметров орбиты космического аппарата. Для низкоорбитальных космических аппаратов (770 км) деградация СБ на основе кремния и гетероструктур GaAs—GaAlAs составляет 15 и 5 % соответственно в течение 5 лет пребывания космического аппарата на орбите. Для космического аппарата на геостационарных орбитах деградация составляет 31 % (для кремния) и 16 % (для GaAs) в течение 15 лет пребывания на орбите. Для радиационно-опасных орбит (7400 км при угле наклона 50°) деградация оставляет 49 % (кремний) и 22 % (GaAs) в течение 5 лет пребывания на орбите. Поэтому применение для энергоснабжения космического аппарата батарей на основе GaAs—гетероструктур дает значительный экономический эффект по сравнению с СБ на основе кремния, несмотря на более высокую стоимость таких СБ. Наиболее простым способом повышения радиационной стойкости СБ оказалось применение защитных по-

крытий. В качестве такого «щита» для СБ используют кварцевые и стеклянные пластины толщиной 0,1–3 мм. При этом основные необратимые потери энергии в фотоэлектрических преобразователях (ФЭП), и как следствие снижение коэффициента полезного действия (КПД) связаны прежде всего с отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя и задерживанием значительной части падающего корпускулярного потока [1].

Оценивая перспективы развития фотоэнергетики, следует отметить, что производству СБ на основе гетероструктурных солнечных фотопреобразователей уделяется все большее внимание в наземных и космических программах многих стран мира (США, Япония, страны Евросоюза, Китай и др.). Так, на фирмах Spectrolab и EMCORE, являющихся в США основными производителями космических батарей, основная часть СБ оснащена каскадными элементами на основе наноструктур Ge/GaAs/GaInP/AlInP.

Работ, посвященных способам защиты от воздействия космической радиации ФЭП на осно-

**Орлова Марина Николаевна** — кандидат техн. наук, доцент, e-mail: xomnx@mail.ru;  
**Юрчук Сергей Юрьевич** — кандидат физ.-мат. наук, доцент, e-mail: yurchuk60@mail.ru;  
**Диденко Сергей Иванович** — кандидат физ.-мат. наук, доцент, e-mail: sdi13@mail.ru;  
**Таперо Константин Иванович** — кандидат физ.-мат. наук, советник по научным вопросам, e-mail: tapero@bk.ru.

ве  $A^{III}B^V$  [2—5]. И хотя в технологии GaAs—ФЭП допустимы значительные успехи, проблема радиационного воздействия до настоящего времени не решена.

В работе [6] была получена статистическая модель для менее консервативного предсказания максимального ожидаемого потока от солнечной вспышки, которая объединяет данные за 30 лет наблюдений. Эта модель дает оценки для предельных значений флюенса частиц в зависимости от их энергии. Данные значения не учитывают геомагнитную или атмосферную защиту, но они применимы для геостационарной орбиты (ГСО) или глубокого космоса.

Цель работы — исследование влияние ионизирующего излучения на наноструктуры Ge/GaAs/GaInP/AlInP.

### Теоретический анализ

При эксплуатации СБ подвергаются воздействию радиации (радиационные пояса Земли, солнечное и космическое излучение), в результате чего происходит постепенное ухудшение их электрических характеристик. Очень важна для космических солнечных энергетических систем способность ФЭП не терять КПД при нагревании концентрированным солнечным излучением.

Гетероструктурные солнечные элементы (СЭ) на основе GaAs имеют более высокий КПД: их максимальная рабочая температура составляет до  $+150\text{ }^\circ\text{C}$ , в отличие от многокаскадных батарей, для которых это значение —  $+70\text{ }^\circ\text{C}$ . Необходимо учитывать и ограничение по температуре с резким повышением проводимости. При нагреве элемента на один градус свыше  $25\text{ }^\circ\text{C}$  он теряет в напряжении  $0,002\text{ В}$ , т. е.  $0,4\text{ } \%/ \text{К}$ . В яркий солнечный день элементы нагреваются до  $60\text{—}70\text{ }^\circ\text{C}$  при потерях каждым  $0,07\text{—}0,09\text{ В}$ . Физическая причина заключается в увеличении темпа тепловой генерации электронно-дырочных пар с ростом температуры, что приводит к рассогласованию внутреннего сопротивления фотопреобразователя с сопротивлением его нагрузки ( $R_{\text{вн.}} \gg R_{\text{н.}}$ ) и, как следствие, к снижению напряжения на  $p\text{—}n\text{—}$ переходе (снижение напряжения холостого хода  $U_{\text{х.х}}$  и уменьшение КПД в нагрузке). Это и является основной причиной уменьшения КПД СЭ, приводя к снижению напряжения, генерируемого элементом. В настоящее время КПД обычного фотоэлемента колеблется в пределах  $10\text{—}16\text{ } \%$  [1]. Тепловой эффект подавляется повышением ширины запрещенной зоны в полупроводнике.

КПД солнечных элементов зависит от ширины запрещенной зоны  $E_g$  полупроводникового материала. Если  $E_g$  велика, то часть спектра не поглощается. Если  $E_g$  мала, то мало значение фото ЭДС ( $U_{\text{х.х}} \leq E_g$ ). Максимальное значение КПД наблюдается для полупроводников с шириной запрещенной зоны  $\sim 1,4\text{ эВ}$  (GaAs).

Солнечный спектр простирается в достаточно широком диапазоне — приблизительно от  $0,2$  до  $2\text{ мкм}$ . Кремний не поглощает свет за пределами края поглощения ( $\sim 1\text{ мкм}$ ), а следовательно, примерно половина энергии солнечного спектра находится вне рабочего диапазона для СЭ на основе кремния. С точки зрения общей чувствительности кремния, максимальная эффективность (КПД) СЭ на базе кремния может составлять приблизительно  $29\text{ } \%$ . Тогда как КПД СБ на основе GaAs доходит до  $35\text{—}40\text{ } \%$  [7].

У широкозонных СЭ на базе GaAs, радиационная стойкость выше, чем у кремния, поскольку глубина проникновения фотонов солнечного излучения у них меньше за счет большего значения коэффициента поглощения и малого исходного значения диффузионной длины. Поэтому на КПД СЭ, изготовленных из этого материала, почти не влияют радиационные дефекты, которые расположены на глубине до  $5\text{ мкм}$  от фронтальной поверхности [8].

Гетерофотопреобразователи на основе GaAs в значительно меньшей степени, чем ФЭП на базе кремния, подвержены разрушению потоками протонов и электронов высоких энергий вследствие высокого уровня поглощения света в GaAs, а также малых требуемых значений времени жизни и диффузионной длины неосновных носителей заряда. Оптимальное значение ширины запрещенной зоны в GaAs составляет  $1,424\text{ эВ}$  при  $300\text{ К}$ . Поэтому  $U_{\text{х.х}}$  достигает  $1\text{ В}$  при прямой солнечной засветке. Более того, эксперименты показали [9, 10], что значительная часть радиационных дефектов (центров) в гетерофотопреобразователях на основе GaAs исчезает после их термообработки (отжига) при температуре как раз порядка  $150\text{—}180\text{ }^\circ\text{C}$ .

### Экспериментальная часть

К настоящему времени детально разработаны вопросы теории и методики радиационно-технологического процесса. На основании этих работ [11, 12] предложена следующая методика экспериментальных исследований. Проведение заключается в контролируемом облучении частицами с энергий пучка до  $6\text{ МэВ}$  и плотностью потока до  $10^{13}\text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Время варьируют в интервале  $10\text{—}15\text{ мин}$ . При этом стабилизирующий термический отжиг происходит в процессе облучения при разогреве образца пучком до температуры порядка  $150\text{—}200\text{ }^\circ\text{C}$ . Термический отжиг радиационных центров радиационно-технологического процесса носит диффузионный характер и проходит в несколько стадий. На каждой стадии отжига происходит одновременно распад одних, относительно слабо связанных комплексов, и образование других, более термостабильных и сложных по природе.

Достоинство этого метода относительно других видов облучения заключается в высокой эффективности взаимодействия «быстрых» электронов с полу-

проводниковыми материалами и легкой управляемости параметров потока электронов при практически полном отсутствии наведенной радиации.

Пошаговое облучение СЭ быстрыми нейтронами с флюенсами  $8,6 \cdot 10^{10}$ ,  $5,6 \cdot 10^{11}$ ,  $5,6 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> проводили с помощью исследовательского импульсного реактора БАРС-4. Облучение быстрыми электронами с флюенсом электронов в  $10^{12}$ ,  $10^{13}$  и  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> выполняли на установке ЭЛУ-6.

До облучения и после набора каждого флюенса нейтронов и электронов измеряли световые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и спектры фоточувствительности СЭ. По измеренным ВАХ определяли следующие параметры:

- ток короткого замыкания  $I_{кз}$ ;
- напряжение холостого хода  $U_{х.х.}$ ;
- максимальный КПД (отношение максимальной мощности к произведению плотности потока солнечной энергии и площади элемента);
- фактор заполнения (отношение максимальной мощности к произведению тока короткого замыкания и напряжения холостого хода).

Объектом исследований являлся однокаскадный СЭ на основе GaAs с Ge подложкой [13]. Структура этого элемента показана на рис. 1.

На Ge-подложке толщиной 180 мкм с помощью процесса MOCVD выращены пять эпитаксиальных слоев GaAs (один из них GaAlAs). Контакт и просветляющее покрытие изготовлены с помощью вакуумного испарения. Сетка делений нанесена через никелевую маску.

Площадь СЭ составила  $41 \times 42,4$  мм<sup>2</sup>. Сверху на СЭ нанесено просветляющее покрытие (ARC) — стабилизированный двойной слой Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> толщиной 0,13 мкм.

**Результаты и их обсуждение**

На рис. 2 представлены световые ВАХ исследованного СЭ, измеренные до и после облучения различными флюенсами быстрых нейтронов ( $\Phi_{0,1}$  — это значение флюенса нейтронов с энергией не менее 0,1 МэВ).

Из рис. 2 видно, что по мере набора флюенса быстрых нейтронов световые ВАХ смещаются в сторону уменьшения значений тока и напряжения. Наиболее заметные изменения световых ВАХ происходят при воздействии флюенса нейтронов свыше  $6,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

Из измеренных световых ВАХ СЭ рассчитывали значения тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимального КПД и фактора заполнения. Зависимости этих параметров от уровня воздействия быстрых нейтронов представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что при облучении нейтронами ток короткого замыкания СЭ снижается от исходного значения 582 до 533 мА после облучения флюен-

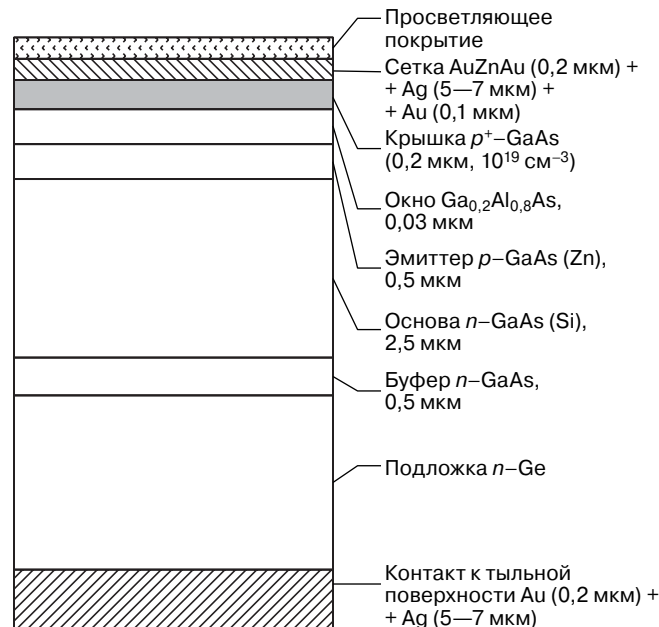


Рис. 1. Структуры исследованного со СЭ

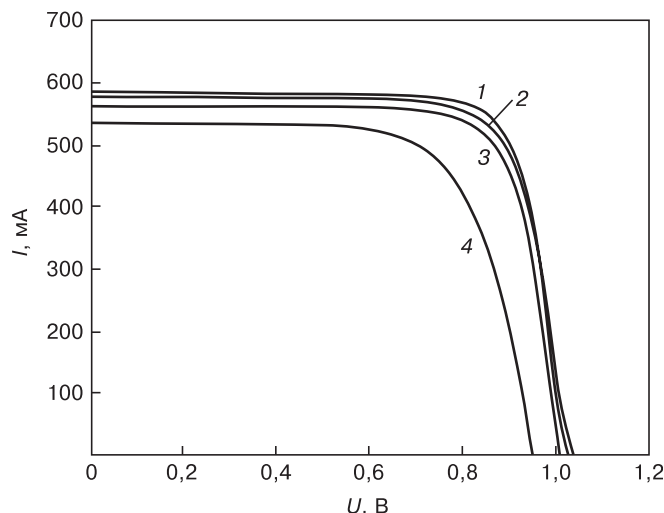


Рис. 2. Световые ВАХ исследованного СЭ, облученного различными флюенсами быстрых нейтронов  $\Phi_{0,1}$  см<sup>-2</sup>: 1 — исходная ВАХ; 2 —  $8,6 \cdot 10^{10}$ ; 3 —  $6,5 \cdot 10^{11}$ ; 4 —  $6,2 \cdot 10^{12}$

сом быстрых нейтронов  $6,2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Напряжение холостого хода при этом снижается от исходного значения 1,04 до 0,95 В после облучения флюенсом быстрых нейтронов  $6,2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Также при воздействии быстрых нейтронов наблюдается снижение максимального КПД от исходного значения 21,1 до 16,3 % после облучения флюенсом быстрых нейтронов  $6,2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, при этом наиболее заметные изменения КПД наблюдаются при флюенсах нейтронов свыше  $6,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Фактор заполнения исследованных СЭ практически не меняется при флюенсах быстрых нейтронов до  $6,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и составляет 0,77. При воздействии флюенса нейтронов, равного  $6,2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>, фактор заполнения снижается приблизительно до 0,7.

На рис. 4 приведены спектры фоточувствительности исследованного СЭ, измеренные до и после облучения быстрыми нейтронами.

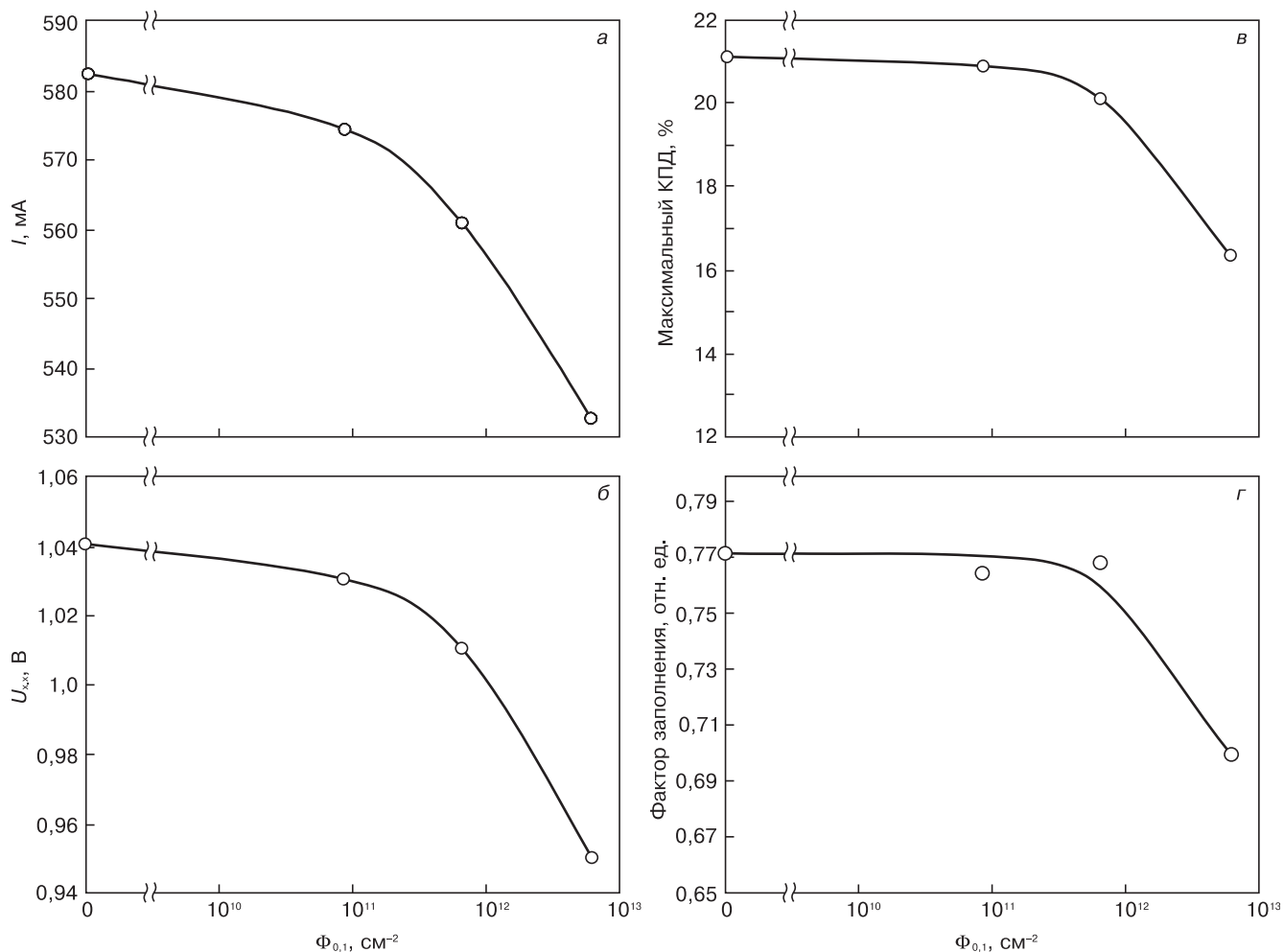


Рис. 3. Изменение тока короткого замыкания (а), напряжения холостого хода (б), максимального КПД (в) и фактора заполнения (г) исследованного СЭ при воздействии быстрых нейтронов

Из рис. 4 видно, что в исследованном диапазоне значений флюенса нейтронов (до  $6,2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) спектральная характеристика (зависимость внешнего квантового выхода от длины волны света) прак-

тически не меняется. После облучения СЭ флюенсом нейтронов  $6,2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  начинает проявляться небольшое снижение внешнего квантового выхода при длине волны свыше 700 нм. Это согласуется с

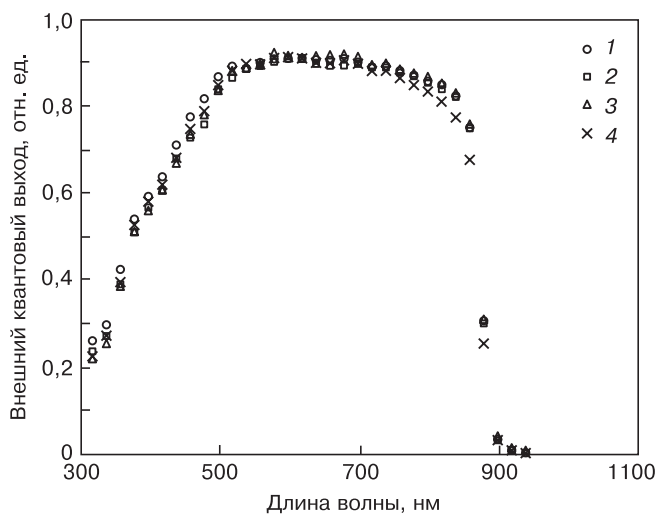


Рис. 4. Влияние нейтронного облучения на спектральные характеристики исследованного СЭ: 1 — исходный спектр; 2 —  $\Phi_{0,1} = 8,6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ; 3 —  $6,5 \cdot 10^{11}$ ; 4 —  $6,2 \cdot 10^{12}$

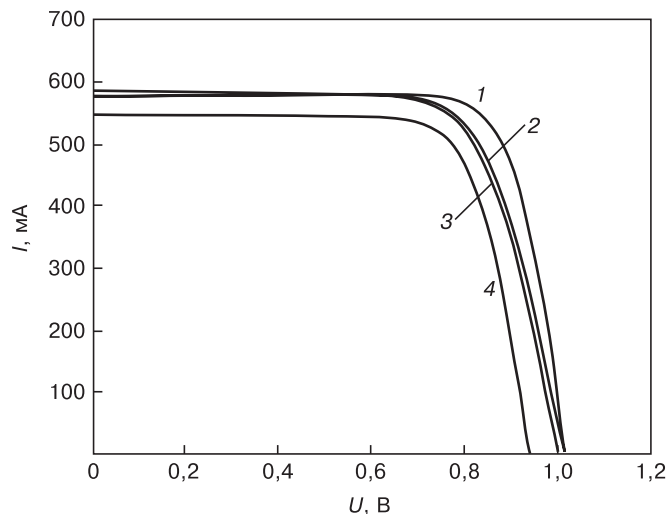


Рис. 5. Световые ВАХ исследованного СЭ: 1 — исходная ВАХ; 2 —  $\Phi = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ; 3 —  $10^{13}$ ; 4 —  $10^{14}$

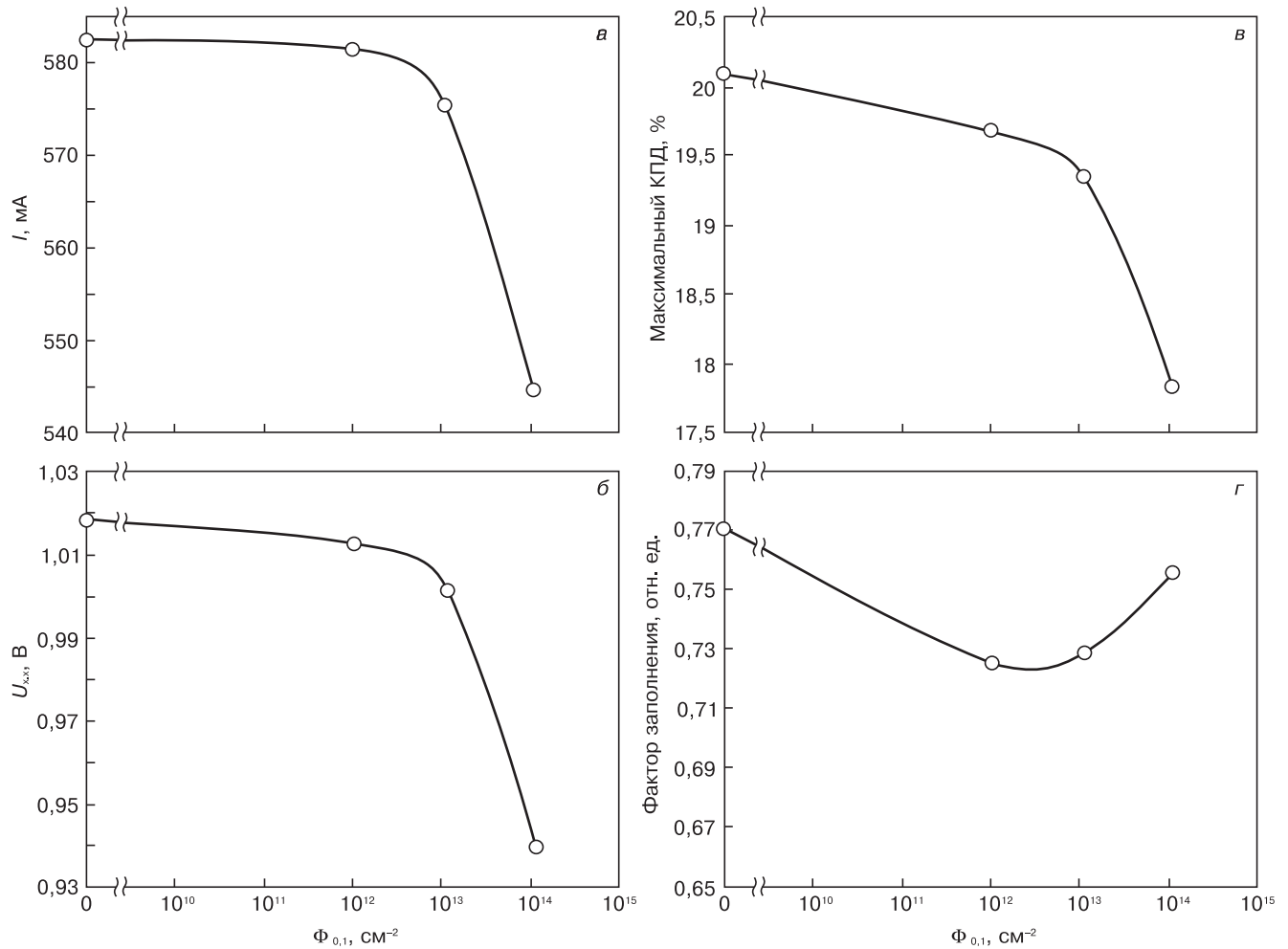


Рис. 6. Изменение тока короткого замыкания (а), напряжения холостого хода (б), максимального КПД (в) и фактора заполнения (г) при воздействии быстрых электронов

имеющимся литературными данными по радиационно-индуцированной деградации СЭ: в первую очередь снижается фоточувствительность в длинноволновой части спектра, что объясняется

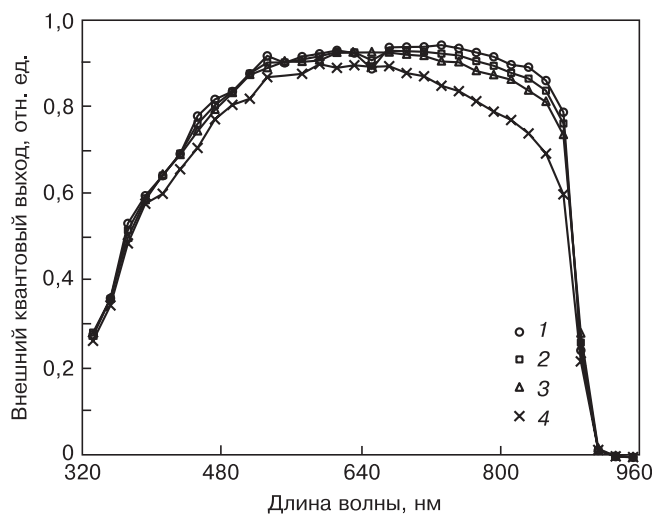


Рис. 7. Влияние облучения быстрыми электронами на спектральные характеристики исследованного СЭ: 1 — исходный спектр; 2 —  $\Phi = 10^{12}$   $\text{cm}^{-2}$ ; 3 —  $10^{13}$ ; 4 —  $10^{14}$

уменьшением глубины сбора генерированных светом неравновесных носителей заряда вследствие уменьшения диффузионной длины неосновных носителей в полупроводниках при радиационном облучении [13].

На рис. 5 представлены световые ВАХ исследованного СЭ, измеренные до и после облучения различными флюенсами быстрых электронов.

Так же, как и в случае облучения быстрыми нейтронами, из измеренных световых ВАХ рассчитывали значения тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, максимального КПД и фактора заполнения (рис. 6).

Влияние электронного облучения на спектры фоточувствительности исследованного СЭ, измеренные до и после облучения быстрыми электронами представлены на рис. 7.

Из построенных зависимостей можно предположить, что воздействие электронным облучением схоже с воздействием быстрыми нейтронами. Так же, как и в случае с облучением быстрыми нейтронами, уменьшаются значения напряжения холостого хода, ток короткого замыкания и КПД солнечного элемента.

Деградация спектральной характеристики при облучении электронами ярко выражена в «красной» области спектра. Это свидетельствует об уменьшении вклада в фоток базовой области прибора. Можно предположить, что при облучении снижается диффузионная длина неосновных носителей заряда в базе.

### Заключение

Установлено, что влияние температуры на характеристики полупроводникового прибора связано с резким повышением его проводимости.

Обнаружено, что при облучении исследованных СЭ быстрыми нейтронами и электронами ВАХ смещаются в сторону уменьшения значения тока и напряжения. Изменения ВАХ наиболее заметные при воздействии быстрыми нейтронами с флюенсом выше  $6,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и при воздействии флюенсом электронов выше  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Ввиду уменьшения рабочих параметров исследованных СЭ их КПД снизился от исходного значения 21,1 % до 16,3 и 17,8 % при облучении быстрыми нейтронами и быстрыми электронами соответственно.

Установлено, что при воздействии облучения ток короткого замыкания снижается с исходного значения 582 до 533 мА (при облучении нейтронами) и 544 мА (при воздействии электронами). Деградация СЭ по  $I_{\text{кз}}$  обусловлена уменьшением времени жизни и диффузионной длины в квазинейтральных областях структуры неосновных носителей заряда, что связано с возникновением центров рекомбинаций в области базы СЭ.

Показано, что в результате облучения напряжение холостого хода снизилось с 1,04 до 0,95 В при нейтронном, и с 1,01 до 0,94 В при электронном воздействии. Изменения  $U_{\text{х.х}}$  вызвано уменьшением диффузионной длины носителей заряда, что обусловлено возрастанием тока насыщения под влиянием уменьшения диффузионной длины носителей заряда (а также увеличением генерационной составляющей в области пространственного заряда).

Облучение высокоэнергетическими частицами приводит к деградации спектрального отклика СЭ главным образом в длинноволновой части спектра. Это вызвано преобладающим снижением собирания

фотогенерированных носителей заряда из объема полупроводника (GaAs), где поглощается основная часть фотоизлучения для гетероструктуры, по сравнению с поверхностным слоем GaAlAs.

### Библиографический список

1. **Таперо, К. И.** Радиационные эффекты в изделиях электронной техники / К. И. Таперо, С. И. Диденко – М. : МИСиС, 2013. – 350 с.
2. **Davis, A. J.** Solar minimum spectra of galactic cosmic rays and their implications for models of the near-earth radiation environment / A. J. Davis, R. A. Mewaldt, C. M. S. Cohen, A. C. Cummings, J. S. George, R. A. Leske, E. C. Stone, M. E. Wiedenbeck, N. E. Yanasak, E. R. Christian, T. T. Von Roseninge, W. R. Binns, P. L. Hink // J. Geophysical Res. – 2001. – V. 106, N A12. – P. 29979–29987.
3. International Standard ISO 15390: 2004. Space environment (natural and artificial) — Galactic cosmic ray model, [Электронный ресурс] // ISO 2004. Режим доступа: [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37095](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37095)
4. **Nymmik, R. A.** Some problems with developing a standard for determining solar energetic particle fluxes / R. A. Nymmik // Adv. in Space Res. – 2011. – V. 47, N. 4. – P.622–626.
5. **Sexton, F. W.** Destructive single-event effects in semiconductor devices and ICs / F. W. Sexton // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2003. – V. 50, N 3. – P. 603–621.
6. **Xapsos, M. A.** Probability model for worst-case solar proton event fluences, / M. A. Xapsos, G. P. Summers, J. L. Barth, E. G. Stassinopoulos, E. A. Burke // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1999. – V. 46, N 6. – P. 1481–1485.
7. **Johnston, A. H.** Optoelectronic devices with complex failure modes // IEEE NSREC Short Course. – 2000. – P. III–1–III–73.
8. **Вологдин, Э. Н.** Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко – М. : МГИЭМ, 1999. – 98 с.
9. **Кольцов, Г. И.** Изучение дефектных центров в полупроводниковых соединениях  $A^{III}B^V$ , образованных при радиационном воздействии и формировании ионно-легированных  $p^+n$ -структур / Г. И. Кольцов, С. И. Диденко, С. Ю. Юрчук, Н. А. Мусалитин // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2005. – № 3. – С. 71–77.
10. **Корольченко, А. С.** Исследование спектральных и фотоэлектрических параметров высоковольтных многопереходных солнечных батарей / А. С. Корольченко, С. А. Леготин, С. И. Диденко, С. П. Кобелева, М. Н. Орлова, В. Н. Мурашев // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2010. – № 2. – С. 50–54.
11. **Ладыгин, Е. А.** Основные типы радиационных центров и их влияние на электрофизические параметры кремниевых диодных структур при обработке быстрыми электронами / Е. А. Ладыгин, М. Н. Орлова, Д. Л. Волков // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2007. – № 2. – С. 22–26.
12. **Корольченко, А. С.** Новое поколение солнечных батарей – гибридные солнечные батареи с нанокластерами / А. С. Корольченко, С. А. Леготин, В. Н. Мурашев, М. Н. Орлова // Металлург. – 2010. – № 5. – С. 75–77.
13. **Таперо, К. И.** Исследование деградации GaAs/Ge солнечных элементов вследствие радиационно-индуцированных эффектов структурных повреждений / К. И. Таперо, Г. В. Демидас, И. В. Щемеров // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2011. – Вып. 3. – С. 46–51.

Статья поступила в редакцию 13 июня 2013 г.

**Study of Degradation of Photovoltaic Cells Based on A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> Nanoheterostructures Under Ionizing Radiation**

**Marina Nikolaevna Orlova**<sup>1</sup> — Cand. Sci. (Eng), Assistant Professor (xomnx@mail.ru); **Sergey Yuryevich Yurchuk**<sup>1</sup> — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Assistant Professor (yurchuk60@mail.ru); **Sergey Ivanovich Didenko**<sup>1</sup> — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Assistant Professor (sdi13@mail.ru); **Konstantin Ivanovich Tapero**<sup>2</sup> — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Science Advisor (tapero@bk.ru).

<sup>1</sup>*National University of Science and Technology «MISIS»,  
4 Leninskiy prospekt, Moscow 119049, Russia*

<sup>2</sup>*Research Institute of Scientific Instruments (RISI),  
8 Turaevo Industrial Zone, Lytkarino,  
Moscow region 140080, Russia*

**Abstract.** Solar radiation is practically inexhaustible and environmentally friendly source of energy. Solar panels are classified as devices very sensitive to radiation. Therefore, the problem of creating radiation-resistant solar panels is quite acute. In operation, solar batteries (SB) are exposed to hard corpuscular radiation (radiation belts, solar and cosmic radiation), resulting in the structure of accumulated violations leading to a gradual deterioration of their electrical characteristics. Conducted experimental studies of single-degradation characteristics of solar cells (SE) based on GaAs with Ge substrate due to the structural damage produced by irradiation with fast neutrons and electrons, step by irradiation with fast neutrons and electrons with different fluence. Before and after each set of neutron fluence and electrons were measured light current–voltage characteristics (CVC) and photosensitivity spectra of the AOC. Determined from the measured CVC following parameters: fault current circuit voltage with a maximum coefficient of performance (COP) (ratio of maximum power to the product of the flux density of solar energy and the cell area), fill factor (the ratio of maximum power to the product of the short-circuit current and voltage idling).

**Key word:** solar cells, GaAs, degradation, neutron radiation, electron radiation.

**References**

1. Tapero K. I., Didenko S. I. *Radiatsionnie effekti v izdeliyah elektronnoi tekhniki* [Radiation effects in electronics]. Moscow: Izdatelskii dom MISiS, 2013. 350 p. (In Russ.)
2. Davis A. J., Mewaldt R. A., Cohen C. M. S., Cummings A. C., George J. S., Leske R. A., Stone E. C., Wiedenbeck M. E., Yanasak N. E., Christian E. R., Von Rosenvinge T. T., Binns W. R., Hink P. L. Solar minimum spectra of galactic cosmic rays and their implications for

models of the near-earth radiation environment. *J. Geophysical Res.* 2001. vol. 106, no. A12, pp. 29979–29987.

3. International Standard ISO 15390: 2004. Space environment (natural and artificial) — Galactic cosmic ray model [Elektronnyi resurs] // ISO 2004. [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=37095](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=37095)

4. Nymmik R. A. Some problems with developing a standard for determining solar energetic particle fluxes. *Advances in Space Research*. 2011, vol. 47, no. 4, pp. 622–626.

5. Sexton F. W. Destructive single-event effects in semiconductor devices and ICs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2003, vol. 50, no. 3, pp. 603–621. DOI: 10.1109/TNS.2003.813137

6. Xapsos M. A., Summers G. P., Barth J. L., Stassinopoulos E. G., Burke E. A. Probability Model for Worst-Case Solar Proton Event Fluences. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1999, vol. 46, no. 6, pp. 1481–1485. DOI: 10.1109/23.819111

7. Johnston A. H. Optoelectronic Devices with Complex Failure Modes. *IEEE NSREC Short Course*. 2000, pp. III-1–III-73.

8. Vologdin E. N., Lysenko A. P. *Integralnie radiatsionnie izmeneniya parametrov poluprovodnikovih materialov* [Integral radiation changes of parameters of semiconductor materials]. Moscow: MGIEM, 1999. 98 p. (In Russ.)

9. Kol'tsov G. I., Didenko S. I., Yurchuk S. Yu., Musalitin N. A. Study of defect centers in semiconductor III–V compounds formed when radiation exposure and formation of the ion-doped p<sup>+</sup>–n-structures. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2005, no. 3, pp. 71–77. (In Russ.)

10. Korol'chenko A. S., Legotin S. A., Didenko S. I., Kobel'eva S. P., Orlova M. N., Murashev V. N. Study of spectral and photovoltaic parameters of the high voltage multijunction solar cells. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2010, no. 2, pp. 50–54. (In Russ.)

11. Ladygin E. A., Orlova M. N., Volkov D. L. The main types of radiation centers and their influence on the electrophysical parameters of silicon diode structures in the processing of fast electron irradiation. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2007, no. 2, pp. 22–26. (In Russ.)

12. Korol'chenko A. S., Legotin S. A., Murashev V. N., Orlova M. N. A new generation of solar cells and hybrid solar cells with nano-clusters. *Metallurg*. 2010, no. 5, pp. 75–77. (In Russ.)

13. Tapero K. I., Demidas G. V., Shemerov I. V. Study of the degradation of GaAs/Ge solar cells due to radiation-induced effects of structural damage. *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnogo vozdeistviya na radioelektronnuyu apparaturu*. 2011, no. 3, pp. 46–51. (In Russ.)

Received June 13, 2013