

УДК 621.315

В.А. Гусев, профессор, д-р техн. наук**В.В. Старков, ст. науч. сотрудник, канд. техн. наук****А.В. Анисимов, аспирант***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: elt.sevntu@gmail.com***КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Проведен анализ направлений по повышению радиационной стойкости кремниевых солнечных элементов. Предложена структура фотопреобразователя с зарядовыми насосами, обеспечивающая радиационную стойкость на уровне арсенидгаллиевых солнечных элементов космического назначения. Представлены результаты экспериментальных исследований спектральной чувствительности микроканальных фотозлектрических преобразователей, подверженных облучению быстрыми электронами с энергией 1 МэВ и дозой 10^{15} см⁻² и радиационной стойкости ФЭП с зарядовыми насосами.

Ключевые слова: *солнечные элементы, фотопреобразователь, зарядовый насос, фотоэффект, радиационная стойкость, быстрые электроны.*

При эксплуатации в космическом пространстве солнечные батареи и, соответственно, фотопреобразователи (ФЭП) подвергаются интенсивному воздействию радиации (радиационные пояса Земли, солнечное и космическое излучение). В результате этого происходит постепенное ухудшение электрических характеристик ФЭП. Одной из главных причин деградации характеристик является возрастание рекомбинационных потерь, что, в свою очередь, является результатом уменьшения величины диффузионной длины неосновных носителей заряда $L_{\text{ннз}}$. Поэтому основные усилия разработчиков направлены на создание такого конструктивного исполнения ФЭП, в котором ослаблено влияние значений $L_{\text{ннз}}$ на эксплуатационные характеристики ФЭП. Наиболее широко в этом плане в настоящее время применяется уменьшение толщины кремниевых пластин с сохранением поглощенной дозы солнечного излучения. Однако при толщине кремниевых пластин или эпитаксиальных слоев менее 50 мкм происходит уменьшение коэффициента полезного действия η ФЭП [1]. Кроме того, усложняется технология изготовления и уменьшается процент выхода годных изделий с увеличением площади пластин.

Целью настоящей работы является анализ эволюции конструкторско-технологических вариантов и результаты экспериментальных исследований радиационной стойкости кремниевых солнечных элементов (СЭ) космического назначения, включая структуры ФЭП с зарядовыми насосами.

Эффективность конверсии солнечной энергии зависит как от оптических характеристик, так и рекомбинационных свойств кремния. Основные необратимые потери энергии в ФЭП вызываются следующими явлениями:

- отражением части солнечного излучения от поверхности СЭ;
- рассеиванием на фонах избыточной энергии фотонов (короткие волны спектра);
- прохождением части излучения без поглощения (длинноволновая часть спектра);
- поглощение части излучения на просветляющих, антиотражающих и защитных слоях покрытий;
- рекомбинацией генерированных носителей тока в объеме и на поверхности ФЭП;
- внутренним сопротивлением объема и контактной системы ФЭП;
- падением фото-ЭДС с ростом температуры.

Первые четыре вида потерь относятся к оптическим потерям, а остальные три — к рекомбинационным потерям. Общая эффективность η или КПД может быть представлена в виде

$$\eta = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{пад}}} = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{погл}}} \cdot \frac{P_{\text{погл}}}{P_{\text{пад}}} = \eta_{\text{рек}} \eta_{\text{опт}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{эл}} = U_{\text{д}} I_{\text{д}}$ — электрическая мощность согласованной нагрузки; $U_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$ — действующие значения напряжения и тока нагрузки; $P_{\text{пад}}$ — мощность падающего солнечного излучения; $P_{\text{погл}}$ — мощность поглощенного ФЭП солнечного излучения; $\eta_{\text{рек}}$ — доля КПД, определяемая рекомбинационными потерями; $\eta_{\text{опт}}$ — доля КПД, определяемая оптическими (фотонными) потерями.

Подобное представление общей эффективности (1) упрощает качественный и количественный анализ влияния различных технологических режимов и условий эксплуатации ФЭП на его фотоэлектрические параметры. В этом случае независимое определение η из отношения электрической мощности к падающей световой при установившейся конструкции ФЭП ($\eta_{\text{опт}} = \text{const}$) позволяет оценить изменения уровня рекомбинационных потерь и конструкторско-технологические направления по их снижению.

Оптическая компонента эффективности может быть представлена в виде

$$\eta_{\text{опт}} = \eta_{\text{max}}(1-R)(1-T)K(\lambda, d), \tag{2}$$

где $\eta_{\text{max}} \approx 0,3$ для кремния [2] при условии AM1,5; R, T — коэффициенты отражения и пропускания просветляющих, антиотражающих и защитных покрытий; $K(\lambda, d)$ — коэффициент захвата света конструкцией СЭ; λ — длина волны; d — толщина поглощающего слоя (базы) ФЭП.

Доля эффективности ФЭП, обусловленная рекомбинационными потерями в объеме и на фронтальной и тыльной поверхностях СЭ определяется отношением электрической мощности, отдаваемой в согласованную нагрузку ($R_H = R_o = U_d/I_d$), к поглощенной световой мощности, обеспечивающей конверсию энергии излучения в электрическую энергию (внутренний фотоэффект, $h\nu \geq \Delta E_g$ или $\lambda_{\text{тр}} \leq h_c/\Delta E_g = 1,23/\Delta E_g$ мкм, где ΔE_g — ширина запрещенной зоны полупроводника). Рекомбинационная составляющая эффективности

$$\eta_{\text{рек}} = \frac{U_d I_d}{P_{\text{погл}}},$$

где $P_{\text{погл}}$ включает в себя как электрические, так и рекомбинационные потери, моделируемые в диодной схеме замещения последовательным сопротивлением R_s , шунтирующим R_n и темновым током $I(U)$

$$P_{\text{погл}} = U_d I_d + I_d^2 R_s + \frac{U_d^2}{R_n} + \int_0^{U_d} I(u) du.$$

Из этого выражения следует

$$\eta_{\text{рек}} = \left[1 + \frac{R_s}{R_0} + \frac{R_0}{R_n} + \frac{\Phi_T}{U_d} \right]^{-1}, \tag{3}$$

где $\Phi_T = kT/q$ — тепловой потенциал электрона.

Параметры световой вольтамперной характеристики $U_d(I_d)$, напряжение холостого хода U_{xx} , ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ определяются рекомбинационными свойствами объема и поверхностей ФЭП и описываются эффективным временем жизни и диффузионной длиной неравновесных носителей заряда:

$$\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_s};$$

$$L_{ef} = \sqrt{D_n \tau_{ef}},$$

где D_n — коэффициент диффузии электронов в p -базе.

Для конструкций ФЭП, у которых время жизни значительно больше времени разделения (пролета базы) фотогенерированных носителей заряда $\tau_{ef} \gg t_{\text{нр}} = d^2/2D_n$ и диффузионная длина $L_{ef} \gg d$, потери из-за рекомбинации практически отсутствуют, и при малых R_s и R_n .

$$\eta_{\text{рек}} = \left[1 + \frac{\Phi_T}{U_d} \right]^{-1} \cong 1.$$

Полная эффективность или КПД ФЭП может быть получена из (1), (2) и (3).

$$\eta = \left[1 + \frac{R_s}{R_0} + \frac{R_0}{R_n} + \frac{\Phi_T}{U_d} \right]^{-1} \eta_{\text{max}}(1-R)(1-T)K(\lambda, d). \tag{4}$$

В структуре солнечных батарей или модулей роль омических потерь возрастает пропорционально числу последовательно включенных ФЭП, поэтому конструкция СЭ должна обеспечить минимальные величины R_s и максимальные R_n , определяемые в большой степени контактными системами фронтального и тыльного электродов.

Выражение (4) для КПД солнечного элемента отражает основные требования к конструктивно-технологическим направлениям и оптимизации производства ФЭП космического применения.

1. Фундаментальным направлением снижения рекомбинационных потерь в СЭ космического назначения является использование прямозонных полупроводников с минимальной глубиной поглощения солнечного спектра излучения. Благодаря уникальным оптическим свойствам этих полупроводников (зависимость коэффициента поглощения от энергии фотона или длины волны $\alpha = f(\lambda)$; $X_0(\lambda) = 1/\alpha(\lambda) \leq 3 \cdot 10^{-4}$ см) инерционность разделения фотогенерированных носителей заряда (фотовентильный эффект) находится в наносекундном диапазоне. Для *GaAs* арсенида галлия

$$t_{\text{нр}} = \frac{X_0^2}{2D_n} \cong \frac{10^{-7}}{2 \cdot 10^2} < 10^{-9} \text{ с.}$$

При таких малых временах разделения носителей увеличение темпа рекомбинации за счет радиационных дефектов имеет малое значение по сравнению с базовым материалом солнечной энергетики — кремнием [2]. Однако кремний обладает большей химической стабильностью и долговременной надежностью.

2. Уменьшение толщины базы d с сохранением доли поглощенной световой мощности, обеспечиваемой конструктивно-технологическими мерами по «захвату света» с помощью текстурирования фронтальной поверхности, внутреннего отражения от тыльной и фронтальной плоскостей СЭ, упругим рассеянием падающего излучения на крупных преципитатно-дислокационных комплексах [3], на врожденных структурных дефектах мультикремниевых СЭ. Необходимым условием является обеспечение величины коэффициента захвата в выражении (4) на уровне

$$K(\lambda, d) > 0,8.$$

3. Введение в высокотемпературную технологию изготовления кремниевых СЭ операций внешнего и внутреннего геттерирования быстродиффундирующих рекомбинационных примесей. После завершения высокотемпературных операций формирования структуры ФЭП проводится низкотемпературный термофотонный отжиг с «закалкой» для генерации преципитатно-дислокационных комплексов и колоний (ПДК), выступающих в качестве «стоков» и центров аннигиляции первичных радиационных дефектов. При плотности ПДК порядка $(10^7 \dots 10^8)$ см⁻³ коэффициент радиационного изменения времени жизни K_T уменьшается в (3...5) раз, что увеличивает радиационную стойкость в (1,2...2,5) раза. Оперативный контроль технологии осуществляется с помощью тестового облучения α -частицами с последующим температурным отжигом.

4. В режиме эксплуатации ФЭП в составе модулей и солнечных батарей на борту космических аппаратов предусматривается инжекционный и тепловой отжиги СЭ после достижения деградации параметров определенного уровня.

5. Использование структур с вертикальными мульти p - n -переходами микроканальных ФЭП, реализация которых отражена в работе авторов [4].

В отличие от традиционных структур лицевая поверхность микроканальных ФЭП предварительно структурируется путем формирования пор (рисунок 1, а). Глубина пор выбирается такой, чтобы расстояние от дна пор было менее действующей $L_{\text{ннз}}$ от сильнолегированного p^+ -слоя тыльного контакта ФЭП. Расстояние между порами должно быть порядка $2L_{\text{ннз}}$, диаметр пор выбирается из соображений максимального увеличения площади лицевой поверхности и максимального светопоглощения. Таким образом, рекомбинационные потери теоретически могут быть практически исключены. Для опытной проверки правильности этого предположения были проведены сравнительные испытания радиационной устойчивости ФЭП, изготовленных по стандартной технологии и с микроканальной структурой эмиттеров.

Диаметр пор для микроканальной структуры коллектирующего перехода в нашем эксперименте составлял 10 мкм, глубина пор составляла 100 мкм. Различие между двумя образцами микроканальных ФЭП состояло в том, что в одном из них поры располагались в вершинах квадрата 100×100 мкм², а в другом – в вершинах прямоугольника 100×50 мкм², что обеспечивало пористость 5% и 10% соответственно. Для всех образцов определялась исходная спектральная чувствительность в условиях АМО освещенности (1353 Вт/м²). Полученные результаты показаны на рисунке 1 как *BOL*-спектры. Сплошная кривая соответствует контрольному образцу, а пунктирные линии микроканальным структурам. Видно, что спектры чувствительности для пористых структур совпадают и даже несколько превосходят для длин волн (900...1000) нм спектр контрольных структур традиционных ФЭП. Радиационная обработка образцов быстрыми электронами с энергией 1 МэВ и дозой 10^{15} см⁻² привела к снижению спектральной чувствительности для всех образцов (см. *EOL* кривые на рисунке 1, б). При этом для длин волн света более 700 нм уменьшение спектральной чувствительности солнечных элементов, изготовленных по стандартной технологии заметно больше, чем для элементов с микроканальной структурой коллектирующего перехода. В максимуме спектральной чувствительности на длине волн

порядка 860 нм чутливість пористих структур на 12 % вище, ніж у структур стандартних сонячних елементів. При цьому різниця більш помітна для структур з більшою пористістю.

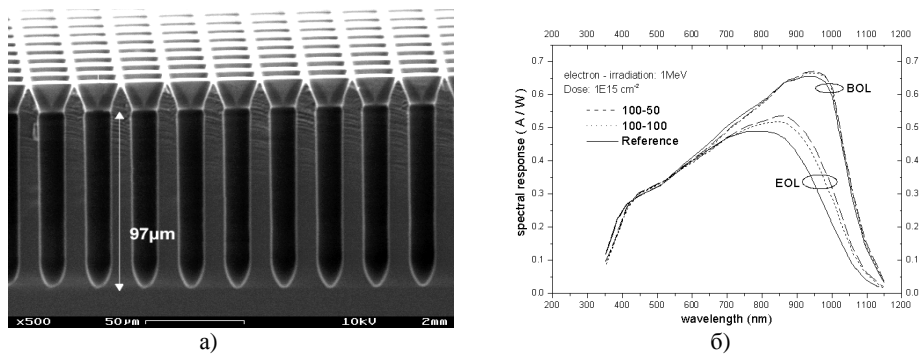


Рисунок 1 — Микроканальные ФЭП: а) вид поперечной структуры кремниевой пластины, сформированной глубоким анодным травлением для микроканальных ФЭП, б) спектральная чувствительность кремниевых солнечных элементов до (BOL) и после (EOL) радиационной обработки быстрыми электронами

6. Дальнейший прогресс в повышении радиационной стойкости кремниевых СЭ может быть достигнут при использовании конструкторско-технологического направления по «захвату света» с одновременным введением в структуру ФЭП зарядовых насосов.

Поперечные структуры ФЭП с тонкой базовой областью и с зарядовыми насосами представлены на рисунке 2.

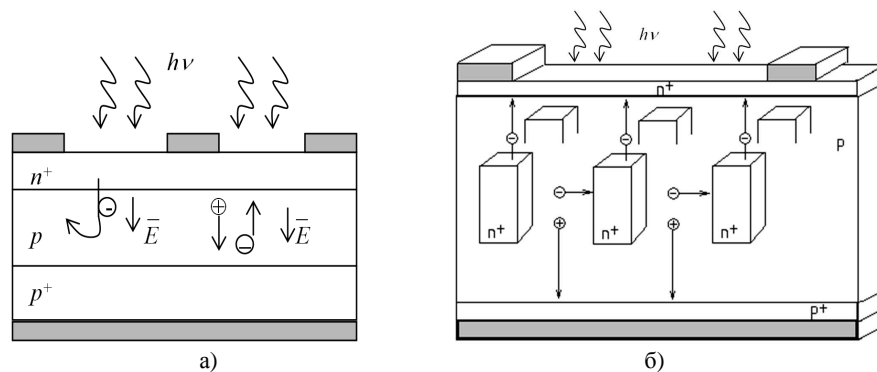


Рисунок 2 — Поперечная структура ФЭП: а) структура традиционно выпускаемых ФЭП с тонкой базовой областью, б) структура ФЭП со встроенными зарядовыми насосами

Зарядовые насосы в структуре n^+p -типового ФЭП в виде локальных n^+ -областей с плавающим потенциалом изменяют механизм разделения фотогенерированных носителей между n^+ -фронтальным слоем и p -базой. Доля коллектируемых электронов из локальных n^+ -областей, заряженных фотоэлектронами, может превышать долю электронов, поставляемых диффузией из p -базы. Время пролета n^+ -области определяется дрейфом электронов (основных носителей заряда), которое на порядки меньше, чем время диффузии электронов (неосновных носителей) в p -базе. Результирующая инерционность переноса в области насоса — время диффузии электронов, определяемое расстоянием между верхней плоскостью n^+ -области насоса и n^+ -фронтальным слоем. Если это расстояние меньше $L_{\text{низ}}(\Phi)$, то эффективность ФЭП будет слабо зависеть от интегрального потока радиации Φ .

Размеры встроенных n^+ -структур, или зарядовых насосов, а также их расположение выбирается так, чтобы максимально собирать из прилегающих областей носители тока, которые генерируются падающим на лицевую сторону ФЭП светом. Накапливающиеся во встроенных n^+ -областях фотоэлектроны инжектируются в сторону коллектирующего p - n -перехода с лицевой стороны ФЭПа. Поэтому расстояние от n^+ -структур до этого перехода также должны быть возможно меньшими. Оценки, проведенные в [5], свидетельствуют о том, что снижение рекомбинационных потерь за счет включения в структуру зарядовых насосов увеличивает КПД ФЭП с $\eta = 15\%$ до $\eta \geq 23\%$. Варьируя геометрическими размерами, конфигурацией и расположением зарядовых насосов, практически возможно минимизировать рекомбинационные потери, которые связаны с радиационным воздействием на структуру ФЭП.

Для обеспечения необходимой оптической эффективности толщина структуры ФЭП должна быть больше трех характеристических длин поглощения фотонов длинноволновой границы спектра, то есть порядка 300 мкм для кремния. Реализация необходимой эффективности (уменьшение времени

разделения) требует применения матричной конструкции с торцевым вводом излучения с помощью волоконно-оптической системы (фоконы) с увеличенной концентрацией световой энергии, передаваемой в торцевую площадь, более чем в 30 раз. Это условие обеспечивает одинаковую поглощенную энергию при перпендикулярном (вертикальном) падении излучения ($d \cong 3X_0$) и горизонтальном двухстороннем вводе лучистой энергии при минимальных оптических потерях. Практическая реализация таких ФЭП сопряжена с существенным повышением себестоимости производства солнечных элементов и модулей на их основе. Экономически более приемлема конструкция ФЭП с вертикальным падением излучения в виде транзисторной структуры (рисунок 3), в которой роль зарядовых насосов выполняют локальные эмиттерные области с плавающим потенциалом с полосковой топологией для обеспечения вывода электродов контактной системы p -базы. Величина генерационного объема в области p -базы определяется толщиной n -коллектора и должна превышать $3X_0(\lambda = 0,8 \text{ мкм}) \cong 30 \text{ мкм}$.

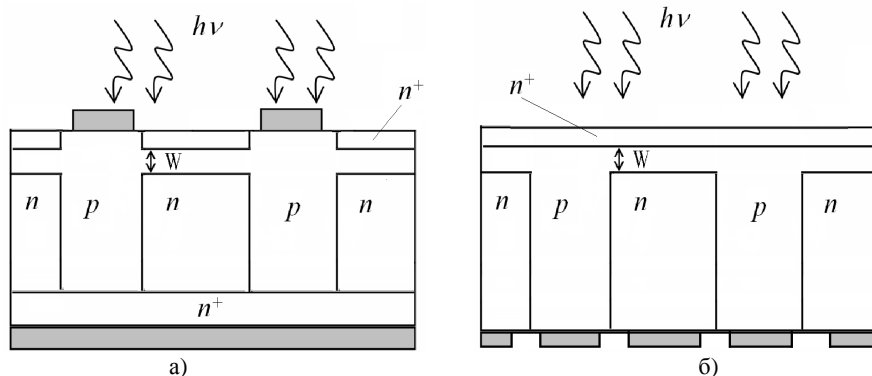


Рисунок 3 — Фрагменты СЭ транзисторного типа: а) структура с двухсторонним выводом электродов, б) структура с односторонним выводом электродов

Второй конструкцией ФЭП с повышенной радиационной стойкостью может служить структура тандемного типа (рисунок 3, б). Роль зарядового насоса играет сплошной эмиттер с плавающим потенциалом. При толщине базы $W = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ время разделения фотогенерированных носителей заряда снижается до 10^{-9} с , что приведет к относительному уменьшению эффективности преобразования после воздействия потока быстрых электронов 10^{15} см^{-2} с энергией 1 МэВ на уровне $\eta(\Phi) \leq 0,8\eta_0$ при условии сохранения коэффициента захвата света.

Для сравнительной оценки радиационной стойкости (РС) коммерческих кремниевых СЭ элементов и ФЭП с зарядовыми насосами был проведен эксперимент по их радиационной обработке потоком α -частиц $\Phi_\alpha = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ с средней энергией $E_\alpha = (4,5 \dots 5) \text{ МэВ}$ и тормозным радиусом в кремнии 18...20 мкм. Тип изотопного источника α -частиц в экспериментах (АИП-Н, ТУ95.496-78) с изотопами плутония (Pu). Выбранная величина потока Φ_α соответствует потоку электронов $\Phi_e = 1015 \text{ см}^{-2}$ с энергией 1 МэВ по эквивалентной деградации времени жизни носителей заряда в кремнии при $T = 300 \text{ К}$. В качестве ФЭП с зарядовыми насосами использовались кристаллы мощного биполярного транзистора $n^+ - p - n - n^+$ КТ841 ($5,5 \times 5,5$) мм² без алюминиевой металлизации. Роль зарядового насоса играла эмиттерная n^+ -область с плавающим потенциалом, роль ФЭП-переход база-коллектор (рисунок 3, а). Традиционный СЭ имел площадь (5×5) см². Световая мощность измерителя составляла 42 мВт/см^2 ($\sim 0,5 \text{ AM1,5}$). Относительная деградация традиционных кремниевых СЭ составила $P_m(\Phi)/P_m(O) = (0,6 \dots 0,65)$. Для ФЭП с зарядовой подкачкой — $P_m(\Phi)/P_m(O) = (0,75 \dots 0,8)$.

Таким образом, в настоящей работе проведен анализ конструктивно-технологических направлений повышения радиационной стойкости кремниевых СЭ. Экспериментально подтверждена возможность повышения РС в структуре с вертикальными мульти $p-n$ -переходами и с зарядовыми насосами. Применение структуры ФЭП с зарядовыми насосами с топологией биполярного транзистора позволяет реализовать РС на уровне арсенид галлиевых однопереходных СЭ.

Дальнейшие исследования будут ориентированы на конструктивно-технологические методы повышения «захвата света» в структуре кремниевых ФЭП с зарядовыми насосами.

Библиографический список использованной литературы

1. Ravi K.V. Thin is in, but not too thin! / K.V. Ravi // New Technologies and Materials. — 2011. — P. 1–6.
2. Алферов Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // ФТП. — 2004. — Т. 38. — Вып. 8. — С. 937–948.

3. Применение упругого рассеяния света среднего инфракрасного диапазона для исследования процесса внутреннего геттерирования в кремнии, выращенным методом Чохральского / В.П. Калинушкин [и др.] // ФТП. — 1997. — Т. 31. — Вып. 10. — С. 1158–1163.

4. Гусев В.А. Повышение радиационной стойкости кремниевых солнечных элементов / В.А. Гусев, В.В. Старков, А.В. Тетерский // Радиационная физика твердого тела: тр. XXII междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 9 июля – 14 июля 2012 г. / под ред. проф. Бондаренко Г.Г. — 2012. — С. 398–401.

5. Гусев В.А. Повышение эффективности фотопреобразователей с зарядовыми насосами / В.А. Гусев, В.В. Старков, С.Е. Шоферистов // Вестник СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь, 2012. — Вып. 131. — С. 102–107.

Поступила в редакцию 13.12.2012 г.

Гусев В.О., Старков В.В., Анисимов А.В. Конструкторське-технологічні методи забезпечення радіаційної стійкості кремнієвих сонячних елементів

Виконується аналіз конструкторсько-технологічних методів забезпечення радіаційної стійкості кремнієвих сонячних елементів. Представлені результати експериментальних досліджень спектральної чутливості мікроканальних фотоперетворювачів, після обробки потоком швидких електронів з енергією 1 МэВ і дозою 10^{15} см⁻² і радіаційній стійкості ФЭП із зарядовими насосами.

Ключові слова: сонячні елементи, фотоперетворювач, швидкі електрони, радіаційна стійкість.

Gusev V.A., Starkov V.V., Anisimov A.V. The construction-technological methods provision of radiation hardening silicon solar cells

The analysis of trends to increase radiation hardening of silicon solar cells is carried out. The results of experimental investigation of influence the action of fast electrons' dose 10^{15} cm⁻², and energy 1 MeV on photoelectric converters are presented.

Keywords: solar cells, photoelectric converter, fast electrons, radiation hardening.