

УДК 621.315

В.А. Гусев, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: elt.sevntu@gmail.com

В.В. Старков, ст. науч. сотрудник, канд. техн. наук

Учреждение Российской академии наук Институт проблем технологии микроэлектроники и
особочистых материалов РАН

ул. Институтская, 6, ИПТМ РАН, г. Черноголовка, Московская область, Россия, 142432

E-mail: starka@iptm.ru

С.Е. Шюферистов

ул. Северо-Сырецкая, 3, Частное Предприятие «Внедренческая экспериментальная лаборатория»,
Киев, Украина, 04136

E-mail: www.wel.net.ua

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЗАРЯДОВЫМИ НАСОСАМИ

Проведен анализ инерционности процессов разделения и коллектирования фотогенерированных носителей заряда в традиционной структуре кремниевого фотопреобразователя (ФЭП) с зарядовыми насосами в виде локальных областей противоположного типа проводимости в базе с плавающим потенциалом. Предложена эквивалентная схема замещения в виде многоэмиттерного биполярного транзистора. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния зарядовых насосов на световую вольтамперную характеристику ФЭП.

Ключевые слова: солнечные элементы, фотопреобразователь, зарядовый насос, фотоэффект.

Стоимость и КПД ФЭП в значительной мере определяются свойствами полупроводникового материала и технологией его изготовления.

За полвека развития технологии солнечных ФЭП были исследованы десятки различных полупроводниковых материалов. Эти исследования и результаты опытной эксплуатации показали, что основным кандидатом на широко масштабное применение в гелиоэнергетике является кремний. В настоящее время около 90 % производимых в мире солнечных элементов изготавливается из монокристаллического, поликристаллического (мультикремний) и аморфного кремния.

Развитие наземной солнечной энергетики, основанной на внутреннем фотоэффекте, потребовало резкого снижения стоимости солнечных ФЭП и повышения их коэффициента полезного действия. Эффективность преобразователя солнечной энергии зависит как от оптических характеристик, так и рекомбинационных свойств полупроводниковой структуры ФЭП. Основные необратимые потери энергии в ФЭП определяются:

- отражением части солнечного излучения от поверхности преобразователя;
- прохождением части излучения без поглощения (длинноволновая часть спектра);
- рассеянием на фонах избыточной энергии фотонов (короткие волны спектра);
- рекомбинацией генерированных носителей заряда в объеме и на поверхности ФЭП;
- внутренним омическим сопротивлением объема и контактной системы ФЭП;
- падением фотоЭДС с ростом температуры.

Первые три вида потерь относятся к оптическим потерям ($\eta_{\text{опт}}$), остальные три — к рекомбинационным потерям ($\eta_{\text{рек}}$). Общая эффективность η или КПД могут быть представлены в виде

$$\eta = \eta_{\text{опт}} \cdot \eta_{\text{рек}} \quad (1)$$

Эффективность $\eta_{\text{рек}}$ характеризует долю фотоносителей заряда, разделяемых (коллектируемых) p - n переходом и создающими фото ЭДС, от общего количества генерированных электронно-дырочных пар в объеме структуры ФЭП.

Максимальное значение оптической эффективности определяется спектральным составом солнечного излучения и шириной запрещенной зоны полупроводника [1] и для монокристаллического кремния составляет для условий AM0 (29...31) % при отсутствии рекомбинационных потерь ($\eta_{\text{рек}} = 1$). Дальнейшее повышение оптической эффективности связано с увеличением внутреннего квантового выхода в «голубой» (коротковолновой) области ФЭП и коэффициента фотоэлектрического поглощения в длинноволновой («красной») области структуры. Одновременно обеспечиваются условия «захвата света» (*light trapping*) за счет внутреннего отражения от фронтальной и тыльной поверхностей элемента.

Целью настоящей работы является повышение эффективности ФЭП за счет уменьшения времени разделения и коллектирования фотогенерированных носителей заряда в традиционной кремниевой структуре n^+-p-p^+ типа встраиванием зарядовых насосов.

В дальнейшем будем считать, что идеальная эффективность кремниевых однопереходных солнечных элементов составляет $\eta_{\max} = 0,29$. Традиционные кремниевые структуры, в зависимости от уровня рекомбинационных потерь, имеют реальные значения эффективности в диапазоне $\eta = 0,15..0,20$, что соответствует $\eta_{\text{рек}} = 0,517..0,69$. До последнего времени основным направлением повышения КПД преобразователя считалось снижение темпа рекомбинации как в объеме (увеличение объемного времени жизни неравновесных носителей заряда (τ), так и скорости поверхностной рекомбинации (S).

Применяемые мультикремниевые и кристаллические подложки кремния, полученные методом Чохральского, и традиционная низкотемпературная технология (*RTP*) *Rapid Thermal Processing* обеспечивают эффективное время жизни электронов в p -базе элемента на уровне $(10...25) \cdot 10^{-6}$ с и диффузионную длину $L_n \cong (180...260)$ мкм. При толщине подложки (d) порядка 200 мкм вышеприведенные рекомбинационные характеристики обеспечивают КПД в диапазоне $(14...18)\%$. Снижение рекомбинационных потерь увеличением времени жизни до величин $(500...1000)$ мкс требует использования «дорогих» кремниевых подложек зонной плавки и технологий изготовления, что противоречит основной задаче фотоэнергетики — снижение стоимости преобразованной энергии.

Другой метод уменьшения рекомбинационных потерь в структуре фотопреобразователя заключается в встраивании зарядовых насосов, способных перекачивать неравновесные (фотогенерированные) носители заряда из удаленной «красной» области вблизи тыльного контакта в «голубую» — область фронтального p - n перехода (рисунок 1) или наоборот, если токовый контакт реализован в тыльной области (конструкция с односторонними выводами электродов).

Встраивание в p -базу локальных n^+ -областей с плавающим потенциалом приводит к изменению механизма разделения и коллектирования фотогенерированных неравновесных носителей заряда по сравнению с традиционными структурами [2]. В традиционной структуре сгенерированная пара электрон–дырка пространственно разделяется градиентом концентрации носителей. Электрон диффундирует и дрейфует за счет встроенного поля как неосновной носитель к фронтальной поверхности. Часть дырок сопровождает электроны, как основные носители, для поддержания нейтральности заряда. Другая часть заряжает положительно область тыльного электрода. Часть дырок рекомбинирует с электронами при пролёте базы.

Для наглядности проведем качественную оценку инерционности разделения фотогенерированных носителей в структуре ФЭП с зарядовыми насосами. Время пролёта p -базы традиционной структуры в этом случае составляет

$$t_{np.1} = \frac{d^2}{2D_n} = \frac{(2 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 26} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

где D_n — коэффициент диффузии электронов.

Время пролёта электронами p -базы в структуре с зарядовыми насосами определяется диффузионным пролётом слоя W (неосновные носители) и временем заряда локальной n^+ -области, интенсивностью светового потока и дрейфом основных носителей заряда

$$t_{np.2} = t_{\text{диф}} + t_{\text{оп}} = \frac{W^2}{2D_n} + \tau_{RC},$$

где R и C — сопротивление и зарядная ёмкость локальной n^+ -области.

Зарядная ёмкость определяется площадью сторон параллелепипеда (рисунок 1).

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{\delta(u)} (2l \cdot m + 2m \cdot h) \cong 2lm \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{\delta(u)}, l \gg h,$$

$$\text{где } \delta(u) = \left[\frac{2\epsilon \cdot \epsilon_0 (U_0 - U_{XX})}{qN_A} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}; N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}.$$

Если полагать, что электроны вводятся в n^+ -область из тыльного контакта (худший случай), то сопротивление заряда можно выразить в виде

$$R = \rho^+ \frac{h}{m \cdot l}, \quad \text{где } \rho^+ = \frac{1}{q\mu_n N_D} \cong 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Тогда постоянная времени заряда

$$\tau_{RC} = RC = 2\rho^+ h \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0}{\delta(u)} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \frac{10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-5}} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ с}.$$

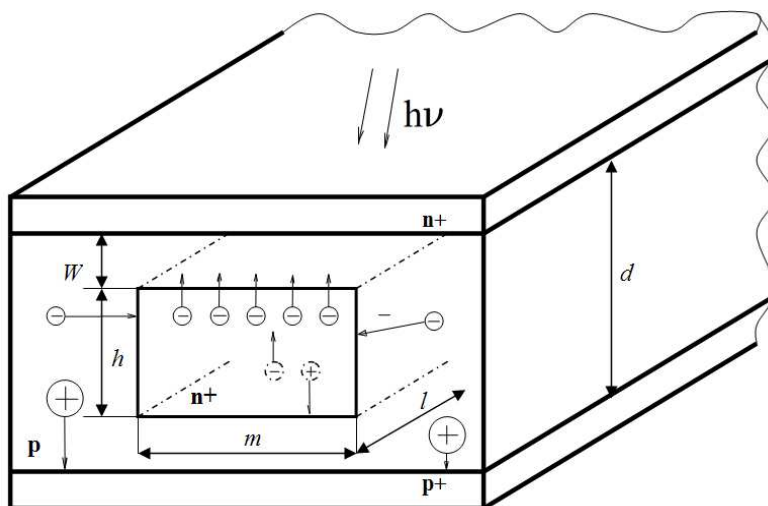


Рисунок 1 — Фрагмент структуры элемента фотопреобразователя с зарядовым насосом

Таким образом, инерционность пролета базы электронами для секции ФЭП с зарядовыми насосами будет определяться временем диффузии электронов как неосновных носителей заряда толщины базы W ($W = 2 \cdot 10^{-3}$ см).

$$t_{\text{diff}} = \frac{W^2}{2D_n} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 26} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

По сравнению с традиционной структурой время разделения зарядов снижается на порядок и более, что существенно уменьшает рекомбинационные потери.

Эквивалентная схема замещения солнечного элемента с n^+ -зарядовым насосом может быть представлена многоэмиттерным транзистором (рисунок 2).

Генератор тока I_{L0} отражает коллектирование носителей заряда объема, определяемого площадью n^+ - p -перехода S_0 и толщиной W («голубая» область, $\lambda < 0,5$ мкм). Толщина W , ориентированная на полное поглощение «голубого» спектра солнечного излучения ($W > 3 \frac{1}{\alpha(0,5)}$). Для кремния $W > 3 \cdot 10^{-4}$ см. Из соображений упрощения технологии, а также меньшего влияния «голубого» спектра на генераторы токов зарядовых насосов $I_{L1} \dots I_{Li}$ выбираем с запасом $W = 20 \cdot 10^{-4}$ см.

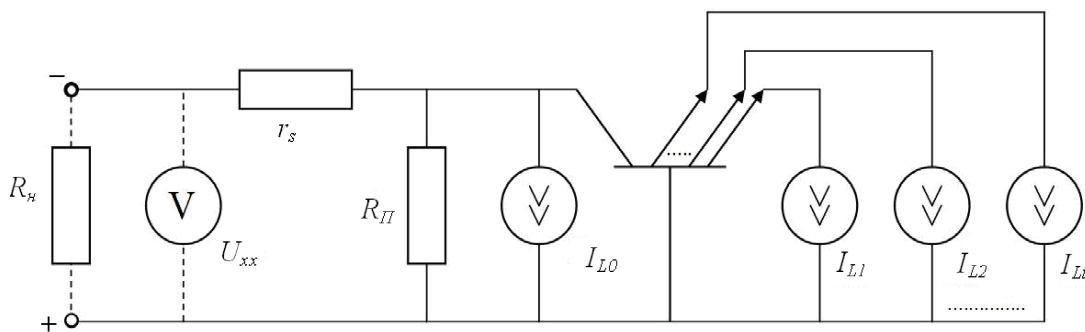


Рисунок 2 — Эквивалентная схема замещения фотопреобразователя с зарядовыми насосами

Роль диода рекомбинационного тока (темновой ток) в диодной схеме замещения играет коллекторный переход с значительно меньшим током насыщения при одинаковой площади $I_{K0} \sim th \frac{W}{L}$.

Многоэмиттерный транзистор работает в режиме насыщения. Для качественного анализа можно суммировать все токи генераторов в цепи эмиттера

$$I_{L\Sigma} = I_{L1} + I_{L2} + \dots + I_{Li}.$$

Тогда выражение для тока короткого замыкания (граница активного режима) будет иметь вид:

$$I_{K3} = I_{L0} + \alpha_N I_{L\Sigma},$$

где α_N — коэффициент передачи тока эмиттера в нормальном включении ($\alpha_N > 0,9$).

Напряжение холостого хода из модели Эберса-Молла для транзистора (двухсекционного S_1 и S_2)

$$U_{XX} = \Phi_T \ln \frac{I_{L0} + \alpha_N I_{L\Sigma}}{I_{KO}},$$

где $I_{KO} = S_1 J_{KO} th \frac{d}{L_n} + S_2 J_{KO} th \frac{W}{L_n}$; $S_1 + S_2 = S_0$; S_2 — площадь насосов.

В зависимости от рекомбинационных параметров исходной структуры (τ_n , L_n) определяются ограничения на соотношения площадей S_1 и S_2 .

$$S_2 < S_0 \left(\frac{L_n}{W} th \frac{d}{L_n} \right) \left[\frac{I_{L0}}{I_{L\Sigma}} - (1 - \alpha_N) + \frac{L_n}{W} th \frac{d}{L_n} \right]^{-1}.$$

Это условие соответствует большему по модулю смещению эмиттерных p - n переходов по сравнению с коллекторным и перемещению электронов из «красной» области к фронтальному n^+ - p переходу (коллектору, рисунок 2).

Так, например, при $\frac{I_{L0}}{I_{L\Sigma}} = 1,5$; $\frac{L_n}{W} = 10$; $S_2 < 0,83 S_0$;

при $\frac{I_{L0}}{I_{L\Sigma}} = 1,5$; $\frac{L_n}{W} = 1$; $S_2 < 0,33 S_0$.

Оценку эффективности солнечного элемента осуществляем из достигнутого уровня технологии. Пусть фотопреобразователь имеет следующие значения параметров: $d = 180$ мкм; $\eta = 15,0$ %. КПД по рекомбинационным потерям определяется как доля дошедших до p - n перехода (диффузия) фотоносителей заряда. В первом приближении

$$\eta_{рек} = \frac{\Delta n(0)}{\Delta n(d)} = \exp\left(-\frac{d}{L_n}\right); \Delta n(x) = \Delta n(d) \exp\left(-\frac{d-x}{L_n}\right). \quad (2)$$

Тогда измеряемая эффективность (0,15) может быть представлена в виде (1).

Подставив в (2) выражение (1), получим оценку основного рекомбинационного параметра

$$L_n = \frac{d}{\ln \frac{\eta_{max}}{\eta}} = \frac{0,018}{\ln \frac{29}{15}} = 0,0273 \text{ см.}$$

Оценим эффективность двухсекционной структуры фотопреобразователя со встроенными зарядовыми насосами. Эффективность пропорциональна плотности тока короткого замыкания:

$$I_{KЗ} = J_{KЗ} \cdot S_0 = J_{L0} \cdot S_1 + J_{L\Sigma} \cdot S_2;$$

$$\eta \cdot S_0 = \eta_1 \cdot S_1 + \eta_2 \cdot S_2; \eta = \eta_1 \cdot \frac{S_1}{S_0} + \eta_2 \cdot \frac{S_2}{S_0}.$$

Проведем оценку эффективности области зарядового насоса

$$\eta_{рек} = \frac{\Delta n(0)}{\Delta n(W)} = \exp\left(-\frac{W}{L_n}\right) = \exp\left(-\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2,73 \cdot 10^{-2}}\right) = 0,929.$$

Значительное уменьшение времени разделения фотоносителей приводит к увеличению $\eta_{рек}$ и эффективности области ФЭП с насосами (η_2).

$$\eta_2 = \eta_{max} \cdot \eta_{рек} = 0,29 \cdot 0,93 = 0,2694.$$

В заключение вычисляем интегральную эффективность двухсекционной структуры с зарядовыми насосами. Для структуры с $\frac{S_2}{S_0} = 0,3$

$$\eta = \frac{S_1}{S_0} \eta_1 + \frac{S_2}{S_0} \eta_2 = 0,7 \cdot 0,15 + 0,3 \cdot 0,27 = 0,186.$$

При $S_1 = 0,5 S_0$; $S_2 = 0,5 S_0$,

$$\eta = 0,5 \eta_1 + 0,5 \eta_2 = 0,5 \cdot 0,15 + 0,5 \cdot 0,27 = 0,21.$$

При $S_1 = 0,3 S_0$; $S_2 = 0,7 S_0$,

$$\eta = 0,3 \eta_1 + 0,7 \eta_2 = 0,3 \cdot 0,15 + 0,7 \cdot 0,27 = 0,234.$$

Проведенные оценки показывают, что предложенная двухсекционная структура солнечного элемента с зарядовыми насосами на базе традиционной подложки и технологии RTP позволяет повысить эффективность до 20 % и более. Аналогичные результаты дает расчет с помощью эквивалентной схемы, в которой рекомбинационные потери учитываются коэффициентом переноса:

$$\eta_{\text{рек}} = \beta = \text{sch} \frac{W}{L}.$$

Снижение времени разделения фотоносителей заряда в структуре ФЭП позволяет реализовать приемлемую эффективность кремниевых солнечных элементов на основе мультикремния и поликристаллических эпитаксиальных пленок при сохранении или уменьшении себестоимости их производства.

В системах гелеозенергетики космического назначения на ФЭП накладываются дополнительные требования по радиационной стойкости. Для обеспечения необходимой эффективности толщина структуры ФЭП должна быть больше трех характеристических длин поглощения фотонов длинноволновой границы спектра (≈ 300 мкм, Si). С другой стороны, эффективный объем сбора (разделения p - n переходом) составляет диффузионную длину (≈ 10 мкм) при $\tau_n \approx 4 \cdot 10^{-8}$ с. Реализация необходимой эффективности (уменьшение времени разделения) требует применения матричной конструкции с одним характерным горизонтальным размером порядка $2X_0 \approx 10^{-1}$ см и вертикальным 10^{-3} см 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 ($d \approx 3X_0$) 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, 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 составляет $3X_0 (\lambda = 0,8 \text{ мкм}) \approx 30$ мкм. Использование структур с вертикальным p - n переходом также позволяет повысить радиационную стойкость ФЭП [3].

Для подтверждения физической модели работы ФЭП с зарядовыми насосами были проведены экспериментальные исследования на кремниевых структурах высоковольтных биполярных транзисторов КТ841 n^+ - p - n^+ типа. Роль фотоэлемента выполнял коллекторный переход. Роль насоса — область эмиттера, которая приобретала плавающий потенциал относительно p -базы при освещении.

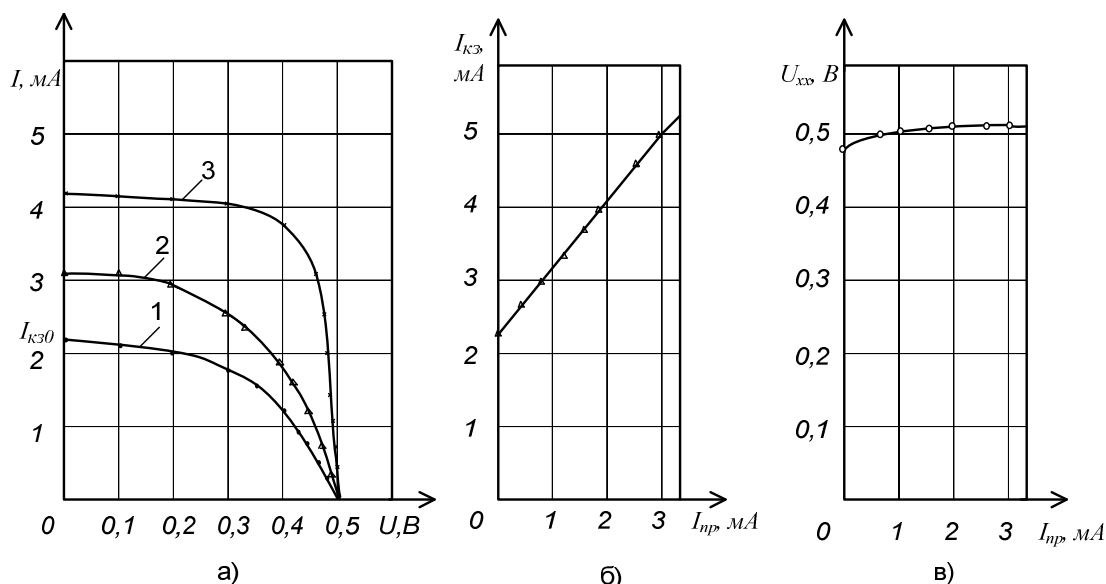


Рисунок 3 – Результаты экспериментальных исследований: а) световая ВАХ при различных I_{np} ; 1 – $I = 0$; 2 – $I = 0,8$ мА; 3 – $I = 2$ мА; б) зависимость тока короткого замыкания $I_{кз} = f(I_{np})$; в) зависимость напряжения холостого хода $U_{хх} = f(I_{np})$

На рисунке 3 представлены результаты измерения световой вольтамперной характеристики, напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при разных значениях прямого тока эмиттера $I_{э,пр.}$. Как следует из рисунка 3, инжекция из локальной n^+ -области (эмиттер) с плавающим потенциалом

приводит к увеличению тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и коэффициента заполнения FF , что свидетельствует о снижении рекомбинационных потерь и увеличении эффективности $\eta_{\text{рек}}$. Аналогичное поведение световых характеристик наблюдалось при использовании коллекторной области в качестве локальной n^+ -области, а перехода эмиттер-база в качестве фронтального (коллектирующего) перехода. В отличие от первого случая, когда фотоносители передавались от фронтальной поверхности в объем структуры ФЭП, во втором происходила доставка из глубины объема структуры к поверхности.

Таким образом, экспериментально доказана возможность перемещать генерированные фотоносители заряда с помощью локальных n^+ -элементов с плавающим потенциалом, встроенных в базу ФЭП. Предложенная эквивалентная схема замещения ФЭП с зарядовыми насосами (рисунок 2) может быть использована при расчете параметров ФЭП при различных интенсивностях светового потока.

Дальнейшие исследования будут направлены на реализацию экономически целесообразных методов изготовления структур кремниевых ФЭП с зарядовой подкачкой.

Бibliографический список использованной литературы

1. 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.
2. Гусев В.А. Фотопреобразователи на основе зарядовых насосов / В.А. Гусев // Вестник СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь, 2011. — Вып. 114. — С. 199–203.
3. Старков В.В. Изготовление кремниевых микроканальных солнечных элементов с повышенной радиационной стойкостью / В.В. Старков, И. Конли, Х. Престинг // Радиационная физика твердого тела: тр. XIII междунар. совещания, Севастополь, 5 июня 2003 г. — Севастополь, 2003. — С. 63–68.

Поступила в редакцию 14.11.2011 г.

Гусев В.О., Старков В.В., Шоферистов С.Е. Збільшення ефективності фотоперетворювачів з зарядовими насосами

Зроблено аналіз інерційності процесів поділу та колектирування фотозбуджених носіїв заряду у традиційній структурі фотоперетворювача (ФЕП) з зарядовими насосами у вигляді локальних зон протилежного типу провідності у базі з плаваючим потенціалом. Запропонована еквівалентна схема заміщення у вигляді багатоемітерного біполярного транзистора. Представлені результати експериментальних досліджень впливу зарядових насосів на світлові характеристики ФЕП.

Ключові слова: сонячні батареї, фотоперетворювач, зарядовий насос, фотоелектричний ефект.

Gusev V.A., Starkov V.V., Shopheristov S.E. The increasing of photoelectric converters efficiency by charges' pumps

The analysis of the inertial mechanisms of separating photoexcited carriers in conventional silicon converters structure with charges' pumps on base of the local floating voltage elements are performed. The equivalent circuit of such converters like multyemitters bipolar transistor is proposed. The results of experimental investigations converters light current – voltage diagrams are presented.

Keywords: photoelectric converter, charges' pumps, solar cells.