

# ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

УДК 621.315.592

## СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ЗАРЯДОВОЙ ПОДКАЧКОЙ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

© 2012 г. В. А. Гусев, В. В. Старков\*, А. В. Тетерский\*  
Севастопольский национальный технический университет, Украина,  
\*ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники  
и особо чистых материалов РАН»

Рассмотрены первые результаты применения концепции зарядовой подкачки в структуре электрических фотопреобразователей (ФЭП). Проведен анализ скорости процессов разделения и коллектирования фотогенерированных носителей заряда в традиционной структуре кремниевых солнечных элементов с зарядовыми насосами. Зарядовые насосы представляли собой локальные  $p^+$ -области в Si-базе  $p$ -типа проводимости. Предложена эквивалентная схема замещения в виде многоэмиттерного биполярного транзистора. Представлены экспериментальные результаты влияния зарядовых насосов на световую вольт-амперную характеристику ФЭП. Рассмотрены технологические аспекты формирования структуры ФЭП с зарядовыми насосами.

**Ключевые слова:** фотоэлектрические преобразователи, зарядовые насосы, солнечные элементы.

### Введение

Развитие современной гелиоэнергетики связано с постоянным стремлением более полного использования доступного энергетического спектра солнечного излучения, с одной стороны, а также снижения уровня антропогенного влияния на окружающую среду — с другой. При этом около 58 % энергии солнечного излучения конвертируется в тепло. На преобразовании этой части солнечной энергии уже созданы и работают электростанции. Одним из таких крупных проектов можно назвать станцию Gemasolar, построенную в Испании и уже подключенную к энергетической сети. Станция работает за счет концентрации и накопления тепла и последующей генерации электроэнергии традиционными методами. Накопитель тепла в Gemasolar способен обеспечивать комплекс энергией в течение целых 15 ч после захода солнца, и станция способна снабжать энергией круглосуточно до 25 тыс. домов, при этом расчетная экономия выбросов  $\text{CO}_2$  составляет 30 тыс. т в год.

Оставшуюся часть энергетического спектра (~42 %) можно конвертировать с различным уровнем КПД в электрическую энергию, используя разнообразные электрические фотопреобразователи (ФЭП), в первую очередь на основе известных полупроводниковых материалов. Стоимость и КПД фотопреобразователей в значительной мере определяются свойствами полупроводникового материала и технологией его изготовления. За полвека развития технологии солнечных ФЭП (рис. 1, а) были исследованы десятки различных материалов. Эти исследования и результаты опытной эксплуатации показали, что основным кандидатом на широкомасштабное применение является кремний. В настоящее время ~90 % производимых в мире солнечных элементов (СЭ) изготавливается из монокристаллического, поликристаллического (мультикремний) и аморфного кремния. Несмотря на положительную динамику развития мирового рынка солнечной энергетики, ключевой проблемой широкого применения в энергетике до настоящего времени яв-

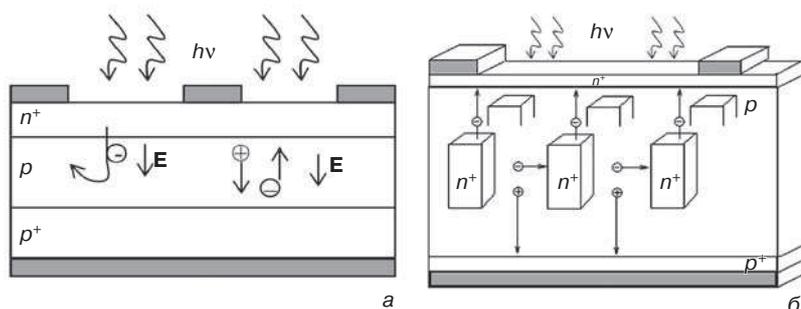


Рис. 1. Схематическое изображение структуры ФЭП:  
а — традиционная структура ФЭП; б — структура СЭЗН (структура типа «булочка с изюмом»)

ляется сравнительно высокая стоимость генерации электроэнергии. В то же время прогноз изменения цен на электроэнергию свидетельствует о том, что производство 1 кВт энергии с помощью ФЭП, начиная с 2025 г., будет сравнимо по стоимости с электроэнергией, производимой из углеводородного сырья (нефть, газ), а с 2030 г. станет ниже [1]. Существенное влияние на снижение стоимости выработанной солнечной электроэнергии оказывает уровень достигнутого КПД фотопреобразователей. Анализ, проведенный в работе [2], показал, что увеличение КПД с 14,4 до 21,5 % снижает стоимость производства 1 Вт электроэнергии с 5,73 до 3,55 долл. США.

Цель работы — повышение эффективности ФЭП за счет уменьшения времени разделения и коллектирования фотогенерированных носителей заряда в традиционной структуре на базе кремния  $n^+—p—p^+$ -типа, достигаемое за счет формирования в базовой области так называемых зарядовых насосов (рис. 1, б) — солнечных элементов с зарядовыми насосами (СЭЗН) [3].

#### Анализ скорости разделения и коллектирования фотогенерированных носителей заряда в традиционной структуре и структуре солнечных элементов с зарядовыми насосами

Преобладающее число разработанных полупроводниковых ФЭП в настоящее время функционирует на внутреннем фотоэффекте, заключающемся в генерации электронно-дырочных пар в полупроводнике фотонами излучения с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны  $E_g$ . В качестве элемента, пространственно разделяющего отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные дырки и создающего источник фотоЭДС, используют  $p—n$ -переход. Контактное поле неподвижных ионов акцепторов и доноров, определяемое уровнем легирования  $p$ - и  $n$ -областей с потенциалом в диапазоне  $(0,5—0,8)E_g/q$  (где  $q$  — заряд электрона), осуществляет соби́рание фотогенерированных носителей с глубин  $p$ - и  $n$ -областей порядка диффузионных длин неравновесных (неосновных) носителей заряда в этих областях ( $L_n$  и  $L_p$  соответственно). Про-

цесс разделения неравновесных носителей сопровождается их рекомбинацией. Поэтому полезная доля поглощенного излучения, преобразованного в электрическую энергию, или эффективность фотопреобразователя для наиболее распространенных монокристаллических солнечных элементов на базе кремния не превышает 18—20 %.

Одной из основных проблем развития фотоэнергетики является снижение стоимости кремниевых структур с  $p—n$ -переходом большой площади (150—200 см<sup>2</sup>). Из экономических соображений в последние годы осуществляют перевод фотоэнергетики на более дешевые подложки из поликремния, мультикремния, листового и тонкопленочного кремния, в которых темп рекомбинации неравновесных носителей заряда на порядки выше, чем у монокристаллического кремния.

Существенным шагом по повышению эффективности явилось создание ФЭП с каскадным последовательным включением структур с разной шириной запрещенной зоны, обеспечивающим полное поглощение энергетического спектра солнечного излучения. Однако это направление требует привлечения дорогостоящих технологий. Поэтому была разработана концепция введения в базу локальных областей, способствующих более эффективному разделению фотогенерированных носителей заряда и снижению их рекомбинации. По своему функциональному назначению они были названы зарядовыми насосами. Оптимизация конструктивно-технологического исполнения ФЭП с зарядовой подкачкой при минимальных затратах на технологическое совершенствование существующего процесса производства практически позволит приблизиться к уровню КПД, теоретически предельного для ФЭП на основе кремния.

Основные необратимые потери энергии в ФЭП определяются следующим:

- 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  $\eta$  или КПД может быть представлена в виде

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

Эффективность  $\eta_{рек}$  характеризует долю фотоносителей заряда, разделяемых (коллектируемых)  $p-n$ -переходом и создающих фотоЭДС, 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, и для монокристаллического кремния оно составляет  $\eta_{max} = 0,29$  при отсутствии рекомбинационных потерь ( $\eta_{рек} = 1$ ) [4]. 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.

Традиционные кремниевые структуры, в зависимости от уровня рекомбинационных потерь, имеют реальные значения эффективности в диапазоне  $\eta = 0,15 \div 0,20$ , что соответствует  $\eta_{рек} = 0,517 \div 0,69$ . До последнего времени основным направлением повышения КПД преобразователя считалось снижение как темпа рекомбинации в объеме (увеличение объемного времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$ ), так и скорости поверхностной рекомбинации  $S$ . Применяемые подложки из мульти- и поликристаллического кремния, полученные методом Чохральского, и традиционная низкотемпературная технология **RTF** (*rapid thermal processing*) обеспечивают эффективное время жизни электронов в  $p$ -базе элемента на уровне  $(10-25) \cdot 10^{-6}$  с и диффузионную длину  $L_n \cong 180 \div 260$  мкм. При толщине подложки  $d \sim 200$  мкм приведенные выше рекомбинационные характеристики обеспечивают КПД в диапазоне 14—18 %. Снижение рекомбинационных потерь за счет увеличения времени жизни до 500—1000 мкс требует использования дорогостоящих подложек из кремния, полученного методом зонной плавки, и технологий изготовления, что противоречит основной задаче фотоэнергетики — снижению стоимости преобразованной энергии.

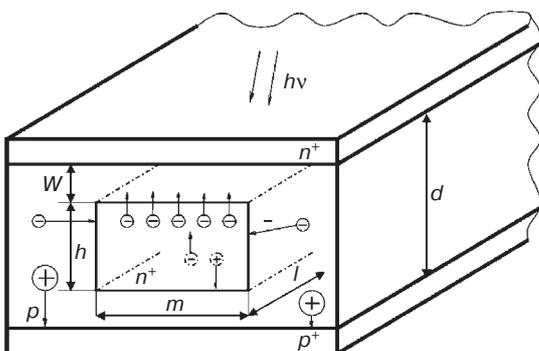


Рис. 2. Фрагмент двухсекционной структуры элемента СЭЗН полоскового типа

Другой метод уменьшения рекомбинационных потерь в структуре фотопреобразователя заключается во встраивании зарядовых насосов, способных перекачивать неравновесные (фотогенерированные) носители заряда из удаленной «красной» области вблизи тыльного контакта в «голубую» — область фронтального  $p-n$ -перехода (см. рис. 1, б). 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 [5].

Проведем качественную оценку инерционности разделения фотогенерированных носителей в структуре ФЭП с зарядовыми насосами. Время пролета  $p$ -базы традиционной структуры в этом случае составляет

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

где  $D_n$  — коэффициент диффузии электронов.

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

$$t_{пр.2} = t_{диф} + t_{др} = \frac{W^2}{2D_n} + \tau_{RC},$$

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

Зарядная емкость определяется площадью сторон параллелепипеда (рис. 2).

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

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

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

$$R = \rho^+ \frac{h}{ml},$$

где  $\rho^+ = \frac{1}{q\mu_n N_D} \cong 2 \cdot 10^{-2}$  Ом · см.

Тогда постоянная времени заряда

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

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

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

По сравнению с традиционной структурой (см. рис. 1, а) время разделения зарядов в предлагаемых структурах ФЭП с зарядовыми насосами (см. рис. 1, б) снижается на порядок и более, что существенно уменьшает рекомбинационные потери.

Эквивалентная схема замещения солнечного элемента с  $n^+$ -зарядовым насосом может быть представлена многоэмиттерным транзистором (рис. 3).

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 ( $W > 3^{0,5}$ ), составляет для кремния  $W > 3 \cdot 10^{-4}$  см. Из соображений упрощения технологии, а также меньшего влияния «голубого» спектра на генераторы токов зарядовых насосов  $I_{L1}$ — $I_{Li}$  выбираем с запасом  $W = 20 \cdot 10^{-4}$  см.

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

$$I_{\text{к.з}} = I_{L0} + \alpha_N I_{L\Sigma},$$

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

Напряжение холостого хода из модели Эберса—Молла для транзистора (двухсекционного  $S_1$  и  $S_2$ ) можно рассчитать как

$$U_{\text{х.х}} = \varphi_T \ln \frac{I_{L0} + \alpha_N I_{L\Sigma}}{I_{KO}},$$

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

В зависимости от рекомбинационных параметров исходной структуры ( $\tau_n$ ,  $L_n$ ) определяют ограничения на соотношения площадей  $S_1$  и  $S_2$ :

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

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, см. рис. 2).

Например, при  $\frac{I_{L0}}{I_{L\Sigma}} = 1,5$ ;  $\frac{L_n}{W} = 10$ ;  $S_2 < 0,83S_0$ ;  
при  $\frac{I_{L0}}{I_{L\Sigma}} = 1,5$ ;  $\frac{L_n}{W} = 1$ ;  $S_2 < 0,33S_0$ .

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

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

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

Тогда измеряемая эффективность (0,15) может быть представлена в виде уравнения (1). Подставив в уравнение (2) выражение (1), получим оценку основного рекомбинационного параметра:

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

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

$$I_{\text{к.з}} = J_{\text{к.з}} S_0 = J_{L0} S_1 + J_{L\Sigma} S_2;$$

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

Проведем оценку эффективности области зарядового насоса

$$\eta_{\text{рек}} = \frac{\Delta n(0)}{\Delta n(W)} = \exp\left(-\frac{W}{L_n}\right) =$$

$$= \exp\left(-\frac{2 \cdot 10^{-3}}{2,73 \cdot 10^{-2}}\right) = 0,929.$$

Значительное уменьшение времени разделения фотоносителей приводит к увеличению  $\eta_{\text{рек}}$  и эффективности области ФЭП с насосами ( $\eta_2$ ):

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

В заключение вычислим интегральную эффективность двухсекционной структуры с зарядовыми насосами:

$$- \text{ для структуры с } \frac{S_2}{S_0} = 0,3$$

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

$$- \text{ при } S_1 = 0,5S_0 \text{ и } S_2 = 0,5S_0$$

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

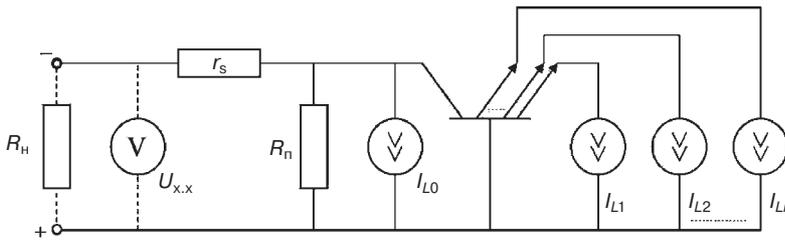


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения СЭЗН

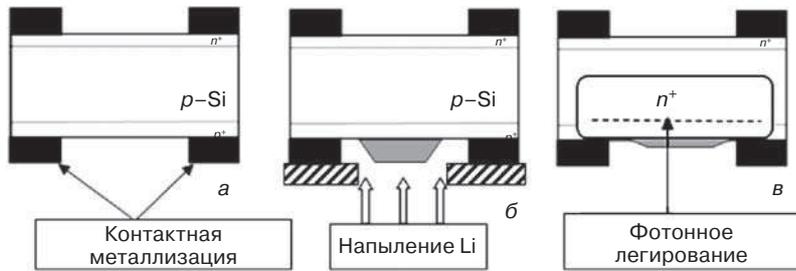


Рис. 4. Схема формирования зарядовых насосов в структуре ФЭП

– при  $S_1 = 0,3S_0$  и  $S_2 = 0,7S_0$

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

Таким образом, оценки показывают, что предложенная двухсекционная структура СЭЗН 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:

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

### Экспериментальная часть

В качестве зарядовых насосов в фотопреобразователях с  $p$ -базой могут быть использованы локальные  $n^+$ -элементы с «плавающим потенциалом». Такие локальные области могут быть созданы различными известными в технологии методами, например эпитаксией и ионной имплантацией, локальной диффузией и отжигами. Области должны быть пространственно разделены между собой на расстояние порядка двух диффузионных длин неосновных носителей заряда в рассматриваемой области и иметь высоту  $h$  от одной десятой до толщины  $W$  слоя, необходимого для разделения локальных  $n^+$ -областей от коллектирующего  $n^+ - p$ -перехода ( $d - W$ , см. рис. 2). При этом нижняя плоскость  $n^+$ -области отделена от тыльного омического электрода  $p^+$ -областью.

Для подтверждения рассмотренной физической модели СЭЗН предложена схема изготовления экспериментальной структуры, которая представлена на рис. 4. Структуру ФЭП изготавливали из кремния  $p$ -типа проводимости марки КДБ 7,5 (100). Толщина пластин составляла 340—350 мкм. Коллекторный  $n^+ - p$ - и контактный торцевой  $p^+ - p$ -переходы (см. рис. 1, а) формировали с помощью пленок на

основе тетраэтилортосиликата (ТЭОС) быстрым фотонным отжигом по методике, изложенной в работе [6]. Перед формированием контактной разводки поверхность пластин подвергали термическому окислению. Металлические контакты формировали методами стандартной шелкографии. В отличие от традиционной структуры ФЭП (см. рис. 1, а), топологию металлического контакта с тыльной стороны пластины формировали тем же фотошаблоном, что и лицевой контакт (см. рис. 4, а). Общая площадь ФЭП структуры составляла  $5 \times 2,5 \text{ см}^2$ . Необходимо отметить, что хотя такая конструкция не обеспечивает необходимого снижения сопротивления контакта с тыльной стороны пластины ФЭП, она позволяет реализовать предложенную схему создания, проверки работоспособности и последующей оптимизации

структуры СЭЗН.

На следующем этапе на тыльную сторону пластины через металлическую маску локально напыляли пленки лития (см. рис. 4, б). Маска представляла собой пластину из нержавеющей стали соответствующего размера со сквозными прорезами в виде полосок, которые расположены между контактными полосками ФЭП. Напыление лития проводили в вакууме  $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  из резистивного испарителя, толщина металлической пленки составляла  $2 \pm 0,5 \text{ мкм}$ . Таким образом, осуществляли локальное формирование полосок металлического лития на тыльной поверхности кремния в промежутках между дорожками тыльного контакта ФЭП. Непосредственно после извлечения из вакуумной камеры пластину помещали в установку фотонного отжига. Фотонное легирование кремния из металлической пленки лития осуществляли на воздухе на экспериментальной установке фотонного отжига, технологические возможности которой описаны в работе [6]. В результате в структуре базового  $p$ -слоя формируются локально встроенные  $n^+$ -области полоскового типа (см. рис. 2).

### Результаты и их обсуждение

Выбор лития в качестве диффузанта, формирующего  $n$ -области в  $p$ -кремнии, в первую очередь связан с низкой температурой его введения, а также его способностью осаждаться в рекомбинационных преципитатах «кислородной и дислокационной» природы, приводящей к подавлению темпа локальной рекомбинации, а следовательно, увеличению тока короткого замыкания. Предельная диффузионная растворимость лития в кремнии может достигать уровня  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  при температуре  $\sim 670 \text{ }^\circ\text{C}$  [7]. Для создания  $n^+$ -областей концентрационный профиль примеси  $n$ -типа должен быть таким, чтобы не перекомпенсировать уровень легирования при-

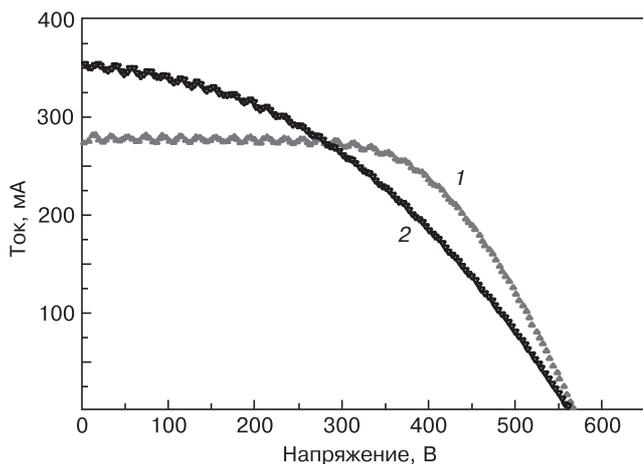


Рис. 5. Световые ВАХ экспериментальных ФЭП: 1 — исходная структура ФЭП; 2 — та же структура ФЭП после формирования в базовой области зарядовых насосов

контактного  $p^+$ -слоя и, наоборот, возможно сильнее перекомпенсировать уровень легирования  $p$ -базы. Кроме того, глубину легирования выбирали такой, чтобы не происходило диффузионного перекрытия  $n^+$ -областей в латеральном направлении, а также электрического закорачивания коллекторного и тыльного слоев.

Зарядовые насосы в виде  $n^+$ -областей в базе  $p$ -типа проводимости в экспериментальной структуре ФЭП формировали в следующем режиме фотонного отжига: мощность ламп нагрева  $P = 37 \text{ Вт/см}^2$ , время 20 с. Глубина диффузии лития, определенная по глубине залегания  $n^+$ - $p$ -перехода в этом режиме, составила  $h = 158 \pm 5 \text{ мкм}$ .

На рис. 5 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) экспериментальных ФЭП-структур при стандартизованной освещенности поверхности  $835 \text{ Вт/м}^2$  (AM1.5). Из рис. 5 видно, что введение в структуру ФЭП зарядовых насосов по предложенной схеме позволяет увеличить ток короткого замыкания с  $I_{к.з} = 274 \text{ мА}$  у исходной структуры до  $I_{к.з} = 354 \text{ мА}$  у СЭЗН-структуры. Напряжение холостого хода у исходных структур составило  $U_{х.х} = 0,565 \text{ В}$  и его значение несколько выше для СЭЗН-структур,  $U_{х.х} = 0,577 \text{ В}$ . С другой стороны, для СЭЗН-структур заметно уменьшение фактора заполнения. Это вероятнее всего является следствием увеличения резистивных потерь на тыльном контакте в рассмотренном варианте экспериментальной ФЭП-структуры и требует дальнейшей оптимизации ее конструктивно-технологического исполнения.

### Заключение

В работе представлены теоретические оценки скорости разделения и коллектирования фотогенерированных носителей заряда в традиционной структуре ФЭП и структуре СЭЗН. Показано, что зарядовые насосы в структуре  $n^+$ - $p$ - $p^+$ -типового ФЭП в виде локальных  $n^+$ -областей с плавающим потенциалом изменяют механизм разделения фото-

генерированных носителей между  $n^+$ -фронтальным слоем и  $p$ -базой. При этом 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. Кроме того, варьируя геометрическими размерами, конфигурацией и расположением зарядовых насосов, практически возможно минимизировать рекомбинационные потери. Оценки показывают, что предложенная двухсекционная структура солнечного элемента с зарядовыми насосами на базе традиционной технологии позволяет повысить эффективность до 20% и более.

Предложена эквивалентная схема замещения солнечного элемента с  $n^+$ -зарядовым насосом в виде многоэмиттерного транзистора.

Впервые предложена экспериментальная технология локальной диффузии лития в структуру традиционных ФЭП. Технология локального фотонного легирования позволила сформировать зарядовые насосы в базовой области СЭ. Экспериментально продемонстрирована эффективность применения зарядовых насосов в традиционной структуре ФЭП. Ток короткого замыкания на 29,2% превысил  $I_{к.з}$  исходного СЭ после формирования в ее структуре зарядовых насосов. При этом на 2% возросло значение  $U_{х.х}$ .

Необходимо также отметить, что развитие концепции зарядовых насосов в структуре ФЭП предполагает дальнейшее проведение исследований по оптимизации как конструктивного, так и технологического исполнения СЭЗН, а относительная простота и дешевизна реализации этой концепции методами дефектно-примесной инженерии определяют перспективность этого направления дальнейшего развития фотовольтаики на основе кремния.

### Библиографический список

1. Наумов, А. В. Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006—2010 гг. / А. В. Наумов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. — 2006. — № 2. — С. 29—35.
2. Woodhouse, M. An economic analysis of photovoltaics versus traditional energy sources. / M. Woodhouse // IEEE Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC). — Seattle; Washington, 2011. — P. NREL/PR-6A20-52311.
3. Гусев, В. А. Солнечные элементы с зарядовой подкачкой / В. А. Гусев, В. В. Старков // Матер. XII Междунар. научн.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». — СПб, 2011. — Т. 2, С. 157—158.
4. 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.
5. Гусев, В. А. Фотопреобразователи на основе зарядовых насосов / В. А. Гусев // Вестн. СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь. — 2011. — Вып. 114. — С. 199—203.
6. Кравченко, В. А. Диффузионное легирование кремния бором и фосфором в условиях быстрого термического отжига / В. А. Кравченко, В. В. Старков, Н. В. Абросимов, В. Н. Абросимова // Электронная техника. Сер. Материалы — 1989. — Вып. 4(241). — С. 20—23.
7. Reiss, H. Solubility of lithium in doped and undoped silicon, evidence for compound formation / H. Reiss, C. S. Fuller, Pietruszkiewicz. // J. Chem. Phys. — 1956. — V. 25, N 4. — P. 650—655.