

УДК 621.315

**В.А. Гусев, профессор, д-р техн. наук**

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

**С.Е. Шоферистов**

*Севастопольский национальный технический университет*

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

*E-mail: elt.sevntu@gmail.com*

## **ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ В ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЗАРЯДОВЫМИ НАСОСАМИ**

*Проведен анализ конструктивно-технологических вариантов изготовления кремниевых солнечных элементов наземного назначения. Показано, что реализация коротковременной технологии термофотонной и лазерной обработки пластин «солнечного» кремния приводит к качественному изменению механизма пролёта базы фотопреобразователя, обусловленного образованием крупных дефектно-примесных комплексов, играющих роль зарядовых насосов. Представлены результаты экспериментальных исследований по повышению тока короткого замыкания солнечных элементов квазиимпульсной термофотонной обработкой.*

**Ключевые слова:** *солнечные элементы, фотопреобразователь, зарядовый насос, фотоэффект, дефектно-примесная инженерия.*

Для разработки дешевых методов производства солнечных элементов (СЭ) с удовлетворительным КПД ( $\geq 20\%$ ) на основе «солнечного» кремния и мультикремния, содержащих высокие концентрации структурных дефектов и остаточных примесей, необходимы уточнения механизмов транспорта фотогенерированных носителей заряда в материале с гетерогенно распределенными пространственными дефектами типа преципитатно-дислокационных комплексов или колоний (ПДК). Пространственная неоднородность рекомбинационно-генерационных свойств поглощающего излучение объема базы ФЭП затрудняет применение традиционной оценки фотоэлектрических характеристик СЭ с помощью усредненного значения времени жизни  $\tau_{ef}$  и диффузионной длины  $L_{ef}$ . Кроме того, большой размер пластин СЭ (до  $200\text{ см}^2$ ) приводит дополнительно к макроскопической флуктуации характеристик СЭ в различных участках фронтальной поверхности [1].

Тем не менее, опыт производства и эксплуатации коммерческих СЭ наземного применения показал, что ФЭП, изготовленные из менее совершенных пластин «солнечного» кремния, не только не уступают, но и превышают в некоторых случаях по эффективности преобразования СЭ из более совершенных монокристаллических пластин. Возможной причиной подобной ситуации является переход на низкотемпературную быстро временную технологию изготовления СЭ (*RTP-RAPID THERMAL PROCESSING*) и изменением механизма переноса носителей заряда в базе ФЭП, обеспечивающим уменьшение рекомбинационных потерь в пластинах с большим содержанием структурных дефектов. Одним из вероятных механизмов снижения рекомбинационных потерь в пластинах «солнечного» кремния может быть уменьшение времени разделения (коллектирования) фотогенерированных носителей тока (уменьшение рекомбинационных потерь) аналогично процессам в структуре СЭ с зарядовыми насосами [2]. Зарядовые насосы различной природы могут быть реализованы дефектно-примесной инженерией, обеспечивающей зарождение, кластеризацию, агрегацию и преципитацию пространственных структурных дефектов с последующим или сопровождающим геттерированием быстро диффундирующих примесей (БДП) и осаждением легирующих и нейтрализующих примесей из пересыщенных твердых примесных растворов с помощью быстрых тепловых воздействий и термической закалки.

*Целью настоящей работы* является анализ эволюции конструкторско-технологических вариантов кремниевых СЭ наземного назначения и реализации различных видов зарядовых насосов методами дефектно-примесной инженерии.

В настоящее время около 90% производимых в мире СЭ для наземного применения изготавливаются из монокристаллического (Cz-Si), поликристаллического (мультикремний) и аморфного (Si:H) кремния. За полувековой этап исследований и эксплуатации кремниевых ФЭП большинство производителей пришло к универсальному типу структуры и технологии их массового изготовления. В качестве базового процесса принята низкоэнергетическая, низкотемпературная ( $T_{max} < 950^\circ\text{C}$ ) с малой длительностью термических обработок (мин) RTP технология, обеспечивающая эффективное время жизни электронов в *p*-базе Cz-Si элемента на уровне  $(10-25) \cdot 10^{-6}$  с и диффузионную длину  $L_n \approx (140...250)$  мкм. При толщине *p*-базы (*d*) порядка 200 мкм выше приведенные рекомбинационные характеристики обеспечивают КПД в диапазоне (14...18)%. В процессе эволюции структуры и технологических

режимов были реализованы следующие направления повышения эффективности кремниевых СЭ наземного назначения.

1. Для снижения рекомбинации на тыльном контакте формировался изотипный  $p^+$ - $p$ -переход.
2. Геттерирование БДП и структурных дефектов (фосфорное геттерирование, геттерирование алюминием, «внутреннее» геттерирование кислородными преципитатами).
3. С целью уменьшения объемной и поверхностной рекомбинации и величины рекомбинационных потерь была введена пассивация фронтальной и тыльной поверхности (защита от внешнего загрязнения и уменьшение  $S_{\text{рек}}$ ) с одновременным уменьшением толщины пластины с 350 мкм до 180...200 мкм, что обеспечивает снижение последовательного сопротивления потерь  $R_s$ .
4. При уменьшении толщины ( $d$ ) для сохранения поглощенной световой мощности предусмотрены меры по «захвату света» (*light trapping*) с помощью текстурирования фронтальной поверхности и внутреннего отражения от тыльной и фронтальной плоскостей элемента.
5. Использование конструкции с двухсторонней засветкой, обеспечивающей большую поглощенную мощность за счет освещения тыльной стороны отраженным рассеянным светом, но не эффективность фотоэлектрического преобразования.
6. Структуры с односторонней и двухсторонней засветкой для систем с умеренной концентрацией солнечного излучения 30...100 солнц. СЭ с концентрированным светом имеют различные контактные системы фронтальных и тыльных электродов с малым последовательным сопротивлением  $R_s$ . Повышение эффективности в этом случае связано не только с увеличением  $\tau_{ef}$ , но и  $\eta_{\text{max}}$ , обусловленным расширением спектра фотопоглощения в длинноволновой («красной») области в связи с уменьшением ширины запрещенной зоны  $\Delta E_g(n,P,\Delta T)$  кремния и ослаблением температурной зависимости  $U_{\text{xx}}(T)$ .
7. Значительное снижение себестоимости и цены СЭ достигается заменой пластин монокристаллического кремния поликристаллическим мультикремнием с столбчатой структурой. СЭ из мультикремния обладают эффективностью на уровне 0,8...0,9 кристаллических ФЭП. В составе модулей это различие уменьшается из-за более высокой топологической плотности мультикремниевых элементов (квадрат) по сравнению с кристаллическими (квазиквадрат).
8. Введение в структуру СЭ «селективного» эмиттера, обеспечивающего повышенную чувствительность в коротковолновом диапазоне солнечного спектра с малым контактным сопротивлением металлизации.

Во второй половине первой декады 2000-х годов резко увеличился объем производства кремниевых коммерческих СЭ наземного назначения, связанный с внедрением низко температурной технологии RTP, основанной на импульсной фотонной обработке пластин кремния. Малая тепловая масса в RTP- технологии обеспечивает высокие скорости нагрева и охлаждения (закалка) пластин. Широкий спектр излучения галогенных ламп от вакуумного ультрафиолета до инфракрасного индуцирует фотохимические реакции и фотофизические эффекты (диффузия примесей, генерация вакансий и междоузельных атомов, образование преципитатов и дислокаций и др.) Именно в этот период времени произошло резкое увеличение (на 3 %...5 %) эффективности кремниевых коммерческих СЭ наземного базирования, который способствовал существенному увеличению объема производства солнечных модулей и батарей (до 10 ГВт установленной мощности в год) (рисунок 1).

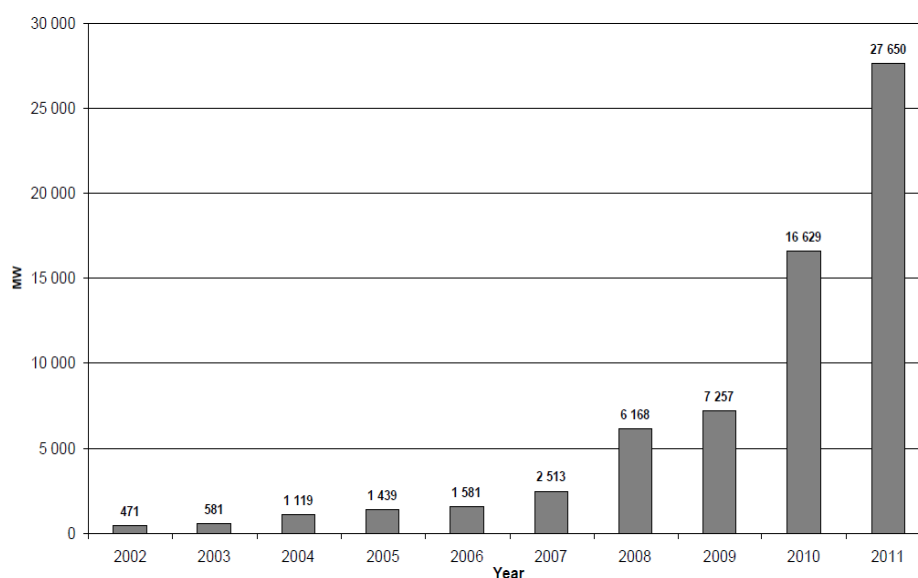


Рисунок 1 — Годовой объем производства солнечных модулей

Качественное повышение эффективности фотопреобразования кремниевых солнечных элементов было достигнуто методом «проб и ошибок». При этом абсолютное большинство производителей пришло к «конечному» идентичному конструктивно-технологическому варианту, использующему квази импульсную низкотемпературную термофотонную обработку галогенными лампами (*RTP*) и формирование фронтальной контактной сетки и тыльного электрода методом шелкографии с длительностью заключительного этапа, включающего вжигание проводящих паст (1,8...2,5) мин (рисунок 2). Резкие (короткие во времени) фронты подъема температуры и охлаждения (закалка) определяют соотношение между концентрацией крупных кислородных преципитатов и дислокационно-примесных комплексов, декорированных рекомбинационными быстро диффундирующими примесями («внутреннее» геттерирование) и гомогенно распределенной по объему оставшейся концентрацией рекомбинационных центров. Экспериментально подбирая режимы термообработки с максимальным и устойчиво воспроизводимым значением времени жизни  $\tau_{ef}$ , параметров ФЭП  $I_{кз}$ ,  $U_{xx}$ ,  $FF$  и  $\eta$ , устанавливают базовый режим изготовления солнечных элементов. При изменении поставщика пластин по необходимости процесс корректируется.

Два других процесса повышения эффективности кремниевых СЭ также связаны с термофотонной обработкой. Первый тип относится к ФЭП, имеющим структуру с заглубленным фронтальным контактом, расположенном в канавке глубиной 20...60 мкм, полученной лазерной абляцией (проплавлением) (LGBC — laser grooved buried contact). Это обеспечивает повышение  $\eta$  на (3...4) % по сравнению с обычной технологией конвекционной термообработки в конвейерной печи. Во втором случае используется лазерная абляция системы из напыленного слоя Al через пассивирующий слой SiO<sub>2</sub>, формирующая омический контакт из эвтектики Al-Si (силумин). Авторы [3] полагают, что расплавление и рекристаллизация локальных областей эвтектического слоя приводят к значительному уменьшению скорости рекомбинации избыточных носителей на тыльном контакте, что обеспечивает рост тока короткого замыкания и увеличение эффективности ФЭП. Такое объяснение имеет спорный характер, так как рекордные значения эффективности ФЭП были получены на структурах с пассивированными SiO<sub>2</sub> фронтальной и тыльной поверхностями именно за счет малой скорости поверхностной рекомбинации (PERL, PERC, PERC cells).

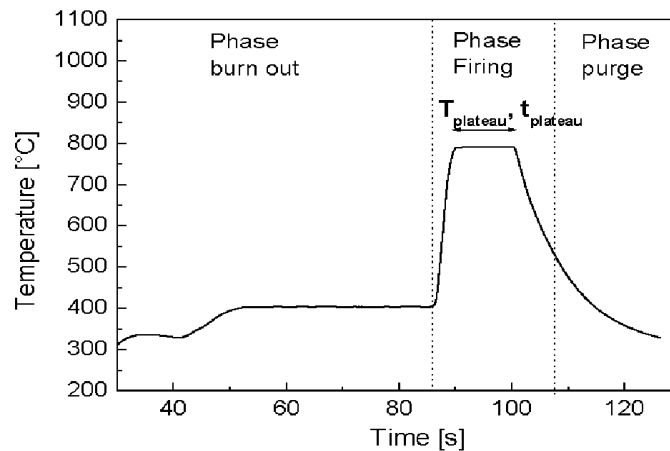


Рисунок 2 — Типовой профиль изменения температуры заключительной термофотонной обработки кремниевых пластин солнечных элементов

Возможное объяснение повышения эффективности СЭ фотонной обработкой содержится в предложенной физической теории фотоэлектрической конверсии в однопереходных ФЭП с зарядовыми насосами [2]. Зарядовый насос представляет собой локальную область с плавающим потенциалом в объеме базы, способную пространственно разделять фотовозбужденные неравновесные носители заряда и обеспечивать их перемещение в зону действия основного коллектирующего *p-n* перехода. В качестве зарядовых насосов в структуре ФЭП могут быть встроенные локальные  $n^+$  и  $p^+$  области с плавающим потенциалом (в *p*- и *n*- базе соответственно), системы металл-полупроводник (барьер Шоттки), диэлектрик-полупроводник, МДП, локальные гетеропереходы, квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки. Зарядовые насосы могут активироваться внешним воздействием, но с обеспечением энергетического выигрыша в целом с учетом энергетических затрат на активацию. Основной целью зарядовых насосов является снижение рекомбинационных потерь в объеме и на поверхностях фронтального и тыльного электродов (увеличение  $\eta_{рек}$ ) посредством не увеличения  $\tau_{ef}$  за счет совершенства кристалла (Si зонной плавки), а уменьшения времени разделения (пролет базы) СЭ из дешевого «солнечного» кремния, выращенного методом Чохральского, либо мультикремния с столбчатой структурой. В случае реализации зарядовых насосов с помощью локальных  $n^+$ -областей в *p*-

базе с плавающим потенциалом изменяется механизм разделения и коллектирования фотогенерированных электронно-дырочных пар. В традиционной структуре  $n^+p-p^+$  типа носители генерируются по всей толщине базы и диффундируют от тыльного электрода к фронтальному. При этом время пролета структуры с толщиной  $\approx 200$  мкм составляет единицы мкс [4]. Максимум спектральной чувствительности соответствует  $\lambda \approx 1,0$  мкм («красная» область структуры). Если время жизни неравновесных носителей тока составляет менее 10 мкс, то при  $t_{\text{пр}} = \tau_{\text{ef}}; d = L_n$ ,

$$\Delta n_{\text{рек}} = \Delta n(0) - \Delta n(t_{\text{пр}}) = \Delta n(d) \left(1 - \exp - \frac{t_{\text{пр}}}{\tau_{\text{ef}}}\right).$$

Только, приблизительно, третья часть фотовозбужденных носителей тока разделяется фронтальным переходом, а  $2/3 \Delta n(\Phi)$  рекомбинируют. Эта оценка приводит к значению  $\eta_{\text{рек}} = (0,3 \dots 0,4)$  и соответственно общий КПД составляет (9...12) %, что и реализовывалось в 60-х ... 80-х годах прошлого столетия.

Время пролета электронами  $p$ -базы с зарядовыми насосами определяется диффузионным пролетом слоя  $W$  (неосновные носителя) (рисунок 3) и временем дрейфа электронов (основных носителей) в  $n^+$ -области толщиной  $h$  (время заряда локальной  $n^+$ -области генерируемым фотонапряжением). Время заряда составляет величину менее  $10^{-10}$  с, поэтому основная инерционность обусловлена временем диффузии через слой  $W$ , составляющий десятые или сотые доли общей толщины базы  $d$ . Поэтому, по сравнению с традиционной структурой, время разделения зарядов снижается на полтора-два порядка, что существенно уменьшает рекомбинационные потери. Проведенные в [4] оценки показывают, что в структуре, у которой половина площади (объема) занята зарядовыми насосами с  $W = 0,1d$ , а другая имеет толщину  $p$ -базы  $d$ , эффективность возрастает с 15 % до 21 % при одинаковых рекомбинационных свойствах. При увеличении объема, занятого зарядовыми насосами до  $0,7 V_0$ , КПД возрастает до 23,4 %.

Форма зарядовых насосов может быть различной: столбчатого вида, полоскового, дискретного. Топология размещения насосов в  $p$ -базе должна обеспечить малое последовательное сопротивление  $R_s$  тыльного электрода («булка с изюмом» рисунок 3, б). Для этого по высоте дискретные элементы должны быть расположены вдоль перпендикуляров к тыльной поверхности (колоннами, столбами) с суммарной толщиной вертикальных зазоров  $(0,1 \dots 0,2) d$ .

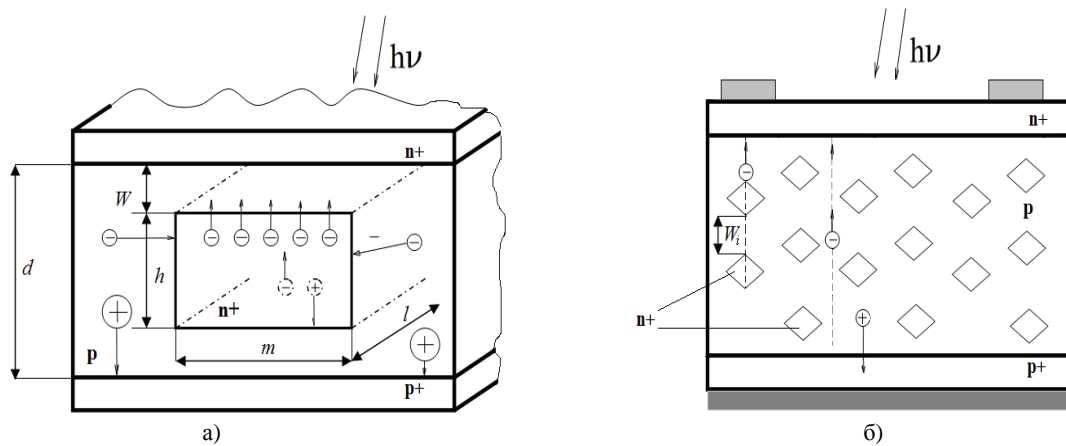


Рисунок 3 — Фрагменты структуры элемента фотопреобразователя с зарядовым насосом: а) полосково-столбчатого типа; б) с дискретной топологией

Токоперенос в такой структуре будет обеспечиваться двумя потоками: диффузией электронов в объеме  $p$ -базы с толщиной  $d$  и параллельно дрейфом электронов в  $n^+$ -областях насоса с последовательной инжекцией и диффузией через зазор  $p$ -базы ( $W_i$ ) вплоть до коллектирующей фронтальной  $n^+$ -области, формирующей внешнюю фотоздс.

В случае высокой концентрации рекомбинационных быстро диффундирующих примесей ( $Fe, Cu, Au, Ni, Cr$ ) в пластинах «солнечного» кремния эффективное время жизни  $\tau_{\text{ef}}$  может иметь величину порядка единиц микросекунд. Так, например, паспортное значение времени жизни в мультикремниевых пластинах, предназначенных для солнечных элементов имеет норму 2 мкс. При таком времени жизни в готовом СЭ невозможна реализация КПД более 8 %..10 % при толщине базы 200 мкм. Такого же порядка (до 10 мкс) имеет время жизни носителей тока «солнечные» пластины, изготовленные методом Чохральского, в экспериментах работы [5]. В этой работе было установлено, что применение коротких во времени термообработок излучением галогенных ламп в диапазоне температур менее  $1050^\circ\text{C}$  приводило к увеличению времени жизни ННЗ в (1,6...2,2) раза. Это увеличение автор не связывает с внешним и

внутренним геттерированием и трактует такое поведение, как общее свойство монокристаллов кремния, выращенных методом Чохральского.

В работе [6] были проведены исследования по малоугловому упругому рассеянию инфракрасного излучения с длиной волны 10,6 мкм в пластинах кремния ( $Cz-Si$ ) до и после термообработок, обеспечивающих внутреннее геттерирование БДП. Было обнаружено, что интенсивность рассеяния излучения после термообработок увеличивалась на (1,5...2) порядка. Рассеяние в этом случае объясняется образованием крупных структурных дефектов с размером (5,0...30) мкм сферической и цилиндрической формы, негеттерированно распределенных в объеме пластины с концентрацией ( $10^5...10^7$ ) см<sup>-3</sup>. Структура этих дефектов связывается с выделениями кислородных преципитатов и дислокационно-примесных комплексов. На основе этих исследований авторы предлагают методику контроля технологического процесса, использующего операции внутреннего генерирования. В более ранних работах по аномальному пропусканию рентгеновского излучения [1] было обнаружено, что в процессе термообработки кислородсодержащего кремния интенсивность проходящего излучения уменьшается на два порядка, за счет образования кислородных преципитатов  $SiO_x$  и примесных кластеров.

Проведенный краткий анализ образования пространственных дефектов в структуре кремния показал, что короткая по длительности и низкотемпературная термофотонная обработка является необходимым условием повышения тока короткого замыкания и эффективности кремниевых коммерческих ФЭП наземного назначения. Экспериментальные результаты подтверждают геттерированный характер распределения по объему и размерам преципитатно-дислокационных комплексов и колоний, которые действуют как внутренние стоки для БДП. В кристаллах с гомогенно распределенными дефектами и в поликристаллических эпилепках с малыми зёрнами внутреннее геттерирование не будет результативным. Примеси, «связанные» гомогенно распределенными дефектами, тоже будут иметь однородное распределение, в результате чего эффективность других методов геттерирования окажется ослабленной.

Примесные «атмосферы» дислокационных колоний могут содержать избыточную концентрацию донорных центров (кислородные доноры, водородные  $H^+$ , литиевые  $Li^+$  и др.) и формировать локальные  $n$ -области с плавающим потенциалом в  $p$ -базе, выполняющих роль зарядовых насосов. В случае декорирования ПДК акцепторными примесями формируются локальные  $p^+$ - $p$  области, пространственный заряд которых будет способствовать отражению электронов из объема  $p^+$ -дефекта, если время пролета характерного размера (меньший размер плоского дефекта) будет существенно меньше локального времени жизни

$$\tau_{ni} > t_{np} = \frac{a_i^2}{2 \cdot D_{ni}},$$

где  $a_i$  — толщина дефектной области,  $D_{ni}$  — коэффициент диффузии электрона (неосновного носителя тока) в локальной области дефекта.

Этот вид дефекта может играть роль ограничителя темпа рекомбинации или зарядового насоса с полевым (дрейф) механизмом в локальной области, если его характерный размер меньше критического

$$a_i < 2 \sqrt{D_{ni} \tau_{ni}} = \sqrt{2} L_{ni},$$

где  $L_{ni}$  — диффузионная длина неосновных носителей заряда в области дефекта.

При превышении толщины плоского дефекта за счет дальнейшей агрегации пересыщенной примесью или междоузельными атомами  $Si$  и вакансиями критического значения ( $a_{кр} > 3L_{ni}$ ) этот тип дефекта превращается в пространственный центр интенсивной рекомбинации (локальный шунт  $p$ - $n$  перехода).

В процессе управления дефектообразованием термофотонной обработкой в объеме  $p$ -базы СЭ могут формироваться геттерированные по рекомбинационным свойствам ( $\tau_{ni}$ ) локальные области за счет внутреннего геттерирования рекомбинационных БДП. Пространственное чередование этих областей формирует структуру с направленным перемещением (дрейфом-диффузией) неосновных носителей заряда, индуцируемых излучением. Области с большим значением  $\tau_{ni}$  (прилегающие и охватывающие объем пространственного дефекта), очищенные от рекомбинационных центров, фотогенерируют на порядки большие величины избыточных носителей заряда

$$\Delta n_{Fi} = G \tau_{ni},$$

где  $G$  — темп фотогенерации.

Пространственная неоднородность по толщине базы избыточной концентрации при наличии мощного стока на фронтальной поверхности (ОПЗ  $p$ - $n$  перехода) будет способствовать направленной диффузии – дрейфу и уменьшению рекомбинационных потерь. При этом конфигурация и размеры структурных дефектов играют существенное значение. Так, например, столбчатая структура мультискремниевых пластин позволяет реализовать интегральные (по площади) значения времени жизни

одного порядка с кристаллическим кремнием  $Cz-Si$ , хотя они имеют на 3...4 порядка больше рекомбинационных примесей.

Другим источником неоднородной фотогенерации является зависимость характерной длины поглощения излучения  $X_0(\lambda) = \alpha(\lambda)^{-1}$  от энергии фотона или длины волны. Экспоненциальное падение с толщиной темпа фотогенерации всего спектра солнечного излучения коллектирующим электроны  $p-n$  переходом вблизи тыльного электрода (тандемный СЭ) обеспечивает направленный дрейф-диффузию электронов от фронтальной поверхности к тыльной. Эти два типа насосов могут быть отнесены к зарядовым насосам, активируемых внешним воздействием. При увеличении концентрации света эффективность преобразования таких СЭ увеличивается значительно сильнее, чем у СЭ на основе более чистого монокристаллического кремния [1].

Эффективность квазипульсовой фототермической обработки значительно зависит от степени совершенства и примесной чистоты кристаллической структуры СЭ. Более «грязные» (до определенного уровня [1]) пластины демонстрируют более высокое относительное улучшение фотоэлектрических параметров и эффективности СЭ.

В качестве примера влияния фотонной обработки с введением в структуру ФЭП быстро диффундирующей примеси  $Li$  были проведены экспериментальные исследования по изготовлению опытных образцов СЭ. Предложенная схема реализации экспериментальной структуры представлена на рисунке 4.

Образцы ФЭП изготавливались из кремния  $p$ -типа проводимости КДБ7,5 (100), толщина пластин составляет 340 — 350 мкм. Коллекторный  $n^+-p$ - и контактный тыльный  $p^+-p$  переходы формировались с помощью пленок на основе ТЭОСа быстрым фотонным отжигом по методике, изложенной в [7]. Перед формированием контактной разводки, поверхность пластин подвергалась термическому окислению. Металлические контакты формировались методами стандартной шелкографии. В отличие от традиционной структуры ФЭП, топология металлического контакта с тыльной стороны пластины формировалась той же маской, что и лицевой контакт (рисунок 4, а). Общая площадь ФЭП структуры составляла  $5 \times 2,5 \text{ см}^2$ . Необходимо отметить, что, хотя такая конструкция не оптимальна с точки зрения обеспечения малого сопротивления контакта с тыльной стороны пластины ФЭП, но позволяет реализовать предложенный технологический процесс для проверки работоспособности и последующей оптимизации структуры СЭ с зарядовыми насосами.

На следующем этапе на тыльную сторону пластины через металлическую маску производилось локальное напыление пленки лития (рисунок 4, б). Маска представляла собой пластину из нержавеющей стали соответствующего размера со сквозными щелями в виде полосок, которые расположены между контактными полосками ФЭП. Напыление лития проводилось в вакууме  $1,3 \times 10^{-2} \text{ Па}$  из резистивного испарителя, толщина металлической пленки составляла  $2 \pm 0,5 \text{ мкм}$ .

Таким образом, осуществлялось локальное формирование полосок металлического лития на тыльной поверхности кремния в промежутках между дорожками тыльного контакта ФЭП. Непосредственно после извлечения из вакуумной камеры пластина помещалась в установку фотонного отжига. Фотонное легирование кремния из металлической пленки лития осуществлялось на воздухе по методике, изложенной в [7]. В результате, в структуре базового  $p$ -слоя формируются встроенные  $n^+$  области полоскового типа.

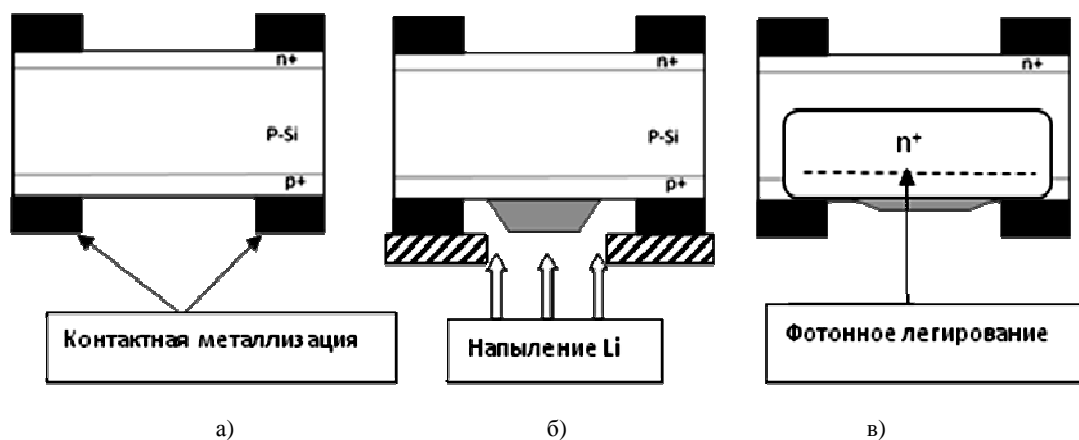


Рисунок 4 — Схема формирования зарядовых насосов в структуре ФЭП

Выбор лития в качестве диффузанта в первую очередь связан с низкой температурой его введения, а также его способностью осаждения в рекомбинационных преципитатах «кислородной и дислокационной» природы [1], приводящей к подавлению темпа локальной рекомбинации, а

следовательно увеличению тока короткого замыкания. Предельная диффузионная растворимость  $Li$  в  $Si$  может достигать уровня  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> при температуре около 670 °С. Для создания  $n^+$ -областей концентрационный профиль  $n$ - типа примеси должен быть таким, чтобы не перекомпенсировать уровень легирования приконтактного  $p^+$  слоя и наоборот, возможно сильнее перекомпенсировать уровень легирования  $p$  базы. Кроме того, глубина легирования выбиралась такой, чтобы не происходило диффузионного перекрытия  $n^+$ -областей в латеральном направлении, а также закорачивания коллекторного и тыльного слоев.

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

На рисунке 5 представлены ВАХ экспериментальных ФЭП структур при стандартизованной освещенности поверхности 835 Вт/м<sup>2</sup> (AM1.5).

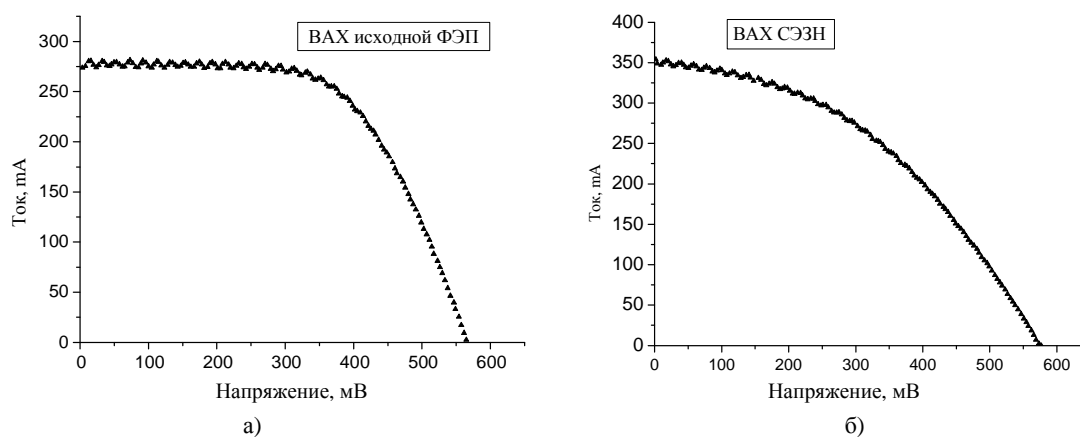


Рисунок 5 — Световые вольт амперные характеристики экспериментальных ФЭП: а) ВАХ исходной структуры ФЭП; б) ВАХ той же ФЭП после формирования зарядовых насосов

Видно, что введение в структуру ФЭП зарядовых насосов по предложенной схеме позволяет увеличить величину тока короткого замыкания с  $I_{кз} = 274$  мА у исходной структуры до  $I_{кз} = 354$  мА в структуре СЭ с зарядовыми насосами (СЭЗН). Величина напряжения холостого хода у исходных структур  $U_{xx} = 0,565$  В и несколько выше для СЭЗН структур,  $U_{xx} = 0,577$  В. С другой стороны, для СЭЗН структур заметно уменьшение фактора заполнения  $FF$ . Это, вероятнее всего, является следствием увеличения резистивных потерь на тыльном контакте в рассмотренном варианте экспериментальной ФЭП структуры и требует дальнейшей оптимизации её конструктивно-технологического исполнения.

Дальнейшие исследования будут направлены на снижение контактных омических потерь в структуре СЭЗН с меньшей толщиной базы ( $d$ ), увеличенной концентрацией основных носителей заряда ( $N_A$ ) и поверхностной концентрации бора в  $p^+$  слое изотипного  $p^+$ - $p$  перехода с оптимизацией температурно-временного профиля термофотонной обработки.

#### Библиографический список использованной литературы

1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви. — М.: Мир, 1984. — 475 с.
2. Гусев В.А. Фотопреобразователи на основе зарядовых насосов / В.А. Гусев // Вестник СевНТУ. Серия Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь, 2011. — Вып. 114. — С. 199–203.
3. Müller I Recombination at local aluminum-alloyed silicon solar cell base contacts / I. Müller, K. Bothe, S. Gatz // Energy Procedia — 8 (2011). — P. 337–342.
4. Гусев В.А. Повышение эффективности фотопреобразователей с зарядовыми насосами / В.А. Гусев, В.В. Старков, С.Е. Шоферистов // Вестник СевНТУ. Серия: Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь, 2012. — Вып. 131. — С. 102–107.
5. Lee Je Youn Rapid Thermal Processing Silicon Cells-Passivation and Diffusion / Lee Je Youn / Ph D thesis, Freiburg, ISE. — 2003.
6. Применение упругого рассеяния света среднего инфракрасного диапазона для исследования процесса внутреннего геттерирования в кремнии, выращенным методом Чохральского / В.П. Калинушкин, А.Н. Бузынин, Д.И. Мушин, В.А. Юрьев, О.В. Астафьев // ФТП. — 1997. — Том 31. — Вып. 10. — С. 1158–1163.

7. Диффузионное легирование кремния бором и фосфором в условиях быстрого термического отжига / В.А. Кравченко, В.В. Старков, Н.В. Амбросимов, В.Н. Амбросимова // Электронная техника. Сер. Материалы. — 1989. — Вып. 4 (241). — С. 20–23.

*Поступила в редакцию 13.12.2012 г.*

**Гусев В.О., Старков В.В., Шоперистов С.Е. Дефектно-домішкова інженерія в технології кремнієвих сонячних елементів із зарядовими насосами**

Проведений аналіз конструктивно-технологічних варіантів виготовлення кремнієвих сонячних елементів наземного призначення. Показано, що реалізація короткотимчасової технології термофотонної і лазерної обробки пластинів "сонячного" кремнію призводить до якісної зміни механізму прольоту бази фотоперетворювача, обумовленого утворенням великих дефектно-домішкових комплексів, що грають роль зарядових насосів. Представлені результати експериментальних досліджень по підвищенню струму короткого замикання сонячних елементів квазі імпульсною термофотонної обробкою.

**Ключові слова:** кремнієві сонячні елементи, фотоперетворювач, зарядовий насос, швидкі електрони, фотонний отжиг.

**Gusev V.A., Starkov V.V., Shopheristov S.E. Defects-impurities engineering for manufacture silicon solar cells with charge pumps**

The analysis of manufacture different kinds of silicon solar cells is carried out. It is shown rapid thermal processing forms a large structure defects. The latter can change the transport of mobile carriers and fulfill role of charge pumps. The results of experimental investigations increasing short circuits currents of photoelectric converters by using incoherent light source are presented.

**Keywords:** silicon solar cells, photoelectric converter, charge pumps, light beam annealing.