

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

*Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 4. С. 279–284.
ISSN 1609–3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-4-279-284*

УДК 621.383:621.315.592

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАРЯДОВЫХ НАСОСОВ В СТРУКТУРЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

© 2015 г. В. В. Старков¹, В. А. Гусев¹, Н. О. Кулаковская¹,
Е. А. Гостева², Ю. Н. Пархоменко²

¹ ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН»,
ул. Академика Осипьяна, д. 6, Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Рассмотрены результаты дальнейшего развития оригинальной концепции зарядовой подкачки в структуре фотоэлектрических преобразователей. Зарядовые насосы обусловлены образованием пространственных дефектно-примесных комплексов. Формирование зарядовых насосов в структуре приводит к изменению механизма пролета фотогенерированными носителями базы солнечного элемента. Впервые предложен технологический процесс атермального, или «холодного» фотонного отжига. Этот процесс предполагает использование стандартного оборудования для фотонного отжига. Эффект атермального фотонного отжига достигается применением оригинальной фотомаски (съёмного фотошаблона). Фотошаблон обеспечивает режим отжига множественными световыми источниками и тепловую изоляцию отжигаемой пластины. Процесс получил название локального фотонного отжига. Эффективность и простота процесса не требуют значительных затрат на внедрение в производство. Представлены результаты экспериментальных исследований по повышению тока короткого замыкания и максимальной мощности солнечных элементов за счет применения локального фотонного отжига. Эксперименты выполнены на солнечных элементах, изготовленных различными производителями.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, зарядовые насосы, солнечные элементы, локальная фотонная обработка.

Введение

Несмотря на большие усилия исследователей по разработке новых материалов, основным материалом для изготовления солнечных элементов наземного применения является кремний. Тенденция уменьшения стоимости солнечных элементов ведет к все более широкому применению дешевых сортов так называемого солнечного и мультикристаллического кремния.

Для этих сортов кремния характерно более высокое содержание структурных дефектов. Необходимость повышения эффективности фотопреобразования до предельных значений предполагает более детальный учет механизмов транспорта фотогенерированных носителей заряда в материале с гетерогенным распределением пространственных

дефектов типа преципитатно-дислокационных комплексов или их колоний. В качестве механизма снижения рекомбинационных потерь предложено использовать процесс уменьшения времени разделения фотогенерированных носителей тока в структуре солнечных элементов с зарядовыми насосами [1–4].

Зарядовые насосы различной природы могут быть созданы методами дефектно-примесной инженерии. Эти методы обеспечивают зарождение, кластеризацию, агрегацию и преципитацию пространственных структурных дефектов с последующим или сопровождающим геттерированием быстро диффундирующих примесей (БДП).

В качестве зарядовых насосов могут выступать встроенные локальные n^+ - и p^+ -области с плавающим потенциалом (в p - или n -базе

Старков Виталий Васильевич¹ — канд. тех. наук, старший науч. сотрудник, e-mail: starka@iptm.ru; **Гусев Владимир Александрович**¹ — доктор техн. наук, e-mail: elt.sevntu@gmail.com; **Кулаковская Наталья Олеговна**¹ — инженер, e-mail: elt.sevntu@gmail.com; **Гостева Екатерина Александровна**² — ассистент, e-mail: gos-3@mail.ru; **Пархоменко Юрий Николаевич**² — доктор физ.-мат. наук, профессор, e-mail: parkh@rambler.ru

соответственно), системы «металл—полупроводник» (барьер Шотки), «диэлектрик—полупроводник», «металл—диэлектрик—полупроводник» (МДП), локальные гетеропереходы, квантовые ямы, квантовые нити и квантовые точки.

Основной задачей зарядовых насосов является снижение рекомбинационных потерь в объеме и на поверхностях фронтального и тыльного электродов. Это осуществляется не посредством увеличения эффективного времени жизни неосновных носителей заряда τ_{eff} за счет совершенства кристалла (Si зонной плавки), а благодаря уменьшению времени разделения (пролета базы) солнечных элементов из дешевого «солнечного» кремния, выращенного методом Чохральского (Cz-Si), или мультикремния со столбчатой структурой.

Ниже рассмотрены конструктивно-технологические варианты реализации различных видов зарядовых насосов в структуре кремниевых солнечных элементов методами дефектно-примесной инженерии.

Низкотемпературная технология производства фотоэлектрических преобразователей

В качестве базового процесса производства фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе кремния большинством производителей принята низкоэнергоемкая, низкотемпературная ($T_{\text{max}} < 950$ °C) с малой длительностью термических обработок (*rapid thermal processing*) RTP-технология. Экспериментально подбирая режимы термообработки с максимальными и устойчиво воспроизводимыми значениями времени жизни τ_{eff} , а также основных параметров ФЭП, производители ФЭП устанавливают базовый режим изготовления солнечных элементов. Эта технология обеспечивает 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 $d \sim 200$ мкм приведенные рекомбинационные характеристики обеспечивают КПД η в диапазоне 13–18 %. Внедрение низкотемпературной RTP-технологии, основанной на квазиимпульсной термофотонной обработке пластин кремния, позволило существенно увеличить объем производства коммерческих солнечных элементов наземного назначения на базе кремния. Одним из направлений развития кремниевой технологии промышленного производства ФЭП с η на уровне 24 % можно назвать развиваемую авторами работ [1–4] концепцию зарядовой подкачки. Эта технология основана на контролируемом формировании в структуре солнечных элементов зарядовых насосов (СЭЗН).

Время пролета электронами p -базы с зарядовыми насосами определяется диффузионным пролетом слоя толщиной W (неосновных носителей заряда) (рис. 1) и временем дрейфа электронов (основных

носителей заряда) в n^+ -области толщиной h (время заряда локальной n^+ -области генерируемым фотонапряжением). Время заряда составляет менее 10^{-10} с. Поэтому основная инерционность обусловлена временем диффузии через слой толщиной W , составляющей десятые или сотые доли общей толщины базы d . Следовательно, по сравнению с традиционной структурой, время разделения зарядов снижается на полтора–два порядка, что существенно уменьшает рекомбинационные потери. Проведенные теоретические оценки показали, 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 используемого кремния [2].

Образцы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводили на образцах солнечных элементов, изготовленных различными производителями (Россия, Китай) с интегральной эффективностью $\eta = 13 \pm 18$ %. Зарядовые

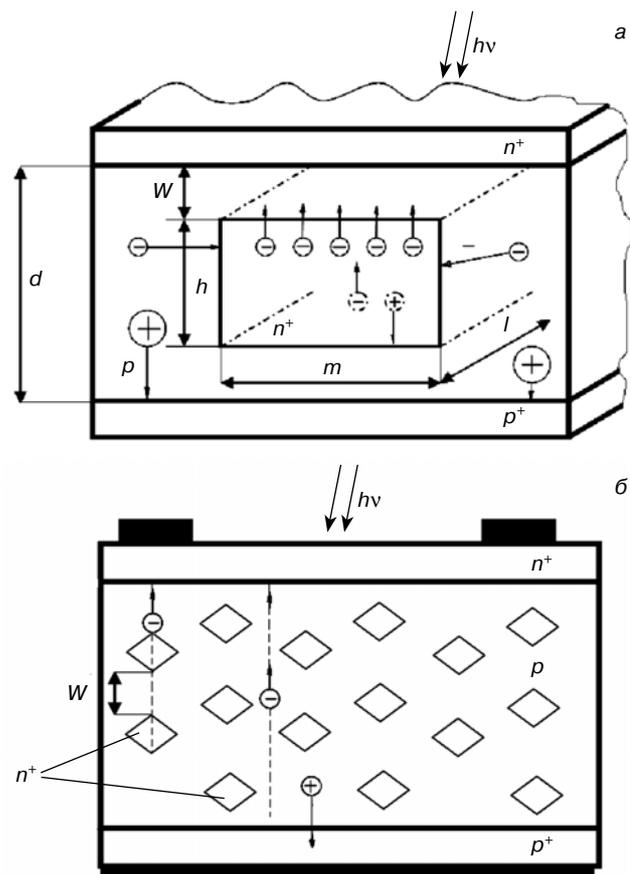


Рис. 1. Fragments of the structure of a photovoltaic element with CP:

(a) Strip and Column Type [2]; (b) Discrete Topology; h, m, l – height, width and length of charge pump correspondingly

Fig. 1. Fragments of the Structure of a Photocell with CP: (a) Strip and Column Type [2], (b) Discrete Topology; h is Height, m is Width and l is Length of CP

насосы формировали в структуре ФЭП. Для этого опытные образцы площадью от 4 до 25 см² вырезали из готовых пластин солнечных элементов алмазным инструментом. Дальнейшее формирование структур осуществляли с применением двух различных конструктивно-технологических вариантов СЭЗН.

Измерение параметров пластин готовых солнечных элементов проводили на тестере PASAN900 с импульсным источником излучения в условиях стандартного освещения (спектр АМ 1,5, уровень освещенности 1000 Вт/м², температура $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Формирование зарядовых насосов

Солнечные элементы с зарядовыми насосами полоскового типа. Формирование зарядовых насосов полосково-столбчатого типа (см. рис. 1, а [2]) может быть реализовано с помощью локальной диффузии в p -базу быстродиффундирующих примесей донорного типа (Li^+ , H^+ , SiO_n^+). Выбор лития авторами работы [2] связан с низкой температурой его введения, способностью осаждения в рекомбинационных преципитатах, приводящей к подавлению темпа локальной рекомбинации, а значит, — к увеличению тока короткого замыкания.

Зарядовые насосы в виде n^+ -областей в базе p -типа проводимости в структуре ФЭП формировали с помощью локального фотонного легирования с тыльной стороны готовых пластин солнечных элементов. Описание процесса локальной диффузии лития подробно описано в работе [2]. Исследование световых характеристик показало, что введение в структуру ФЭП зарядовых насосов по предложенной схеме позволяет увеличить значение тока короткого замыкания с $I_{sc} = 274\text{ мА}$ у исходной структуры до $I_{sc} = 354\text{ мА}$ в структуре СЭЗН в идентичных условиях измерений.

Солнечные элементы с зарядовыми насосами с дискретной морфологией. В отличие от процесса формирования зарядовых насосов с помощью локальной диффузии, результаты которого уже изложены в работах [2—5], рассмотрим более детально другое конструктивно-технологическое исполнение СЭЗН (см. рис. 1, б).

В этом случае процесс основан на эффекте атермического локального фотонного отжига (**ЛФО**) пластин кремния. Как и все остальные RTP-технологии, этот процесс является достаточно эффективным и не требует существенных затрат на технологическое переоснащение производства.

Типовые RTP-технологии изготовления солнечных элементов на базе Cz-Si и мультикремния содержат высокотемпературные операции ($\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) формирования n^+ -эмиттера, плазмохимического осаждения антиотражающего и защитного слоев SiN_x (**PECVD**), вжигания фронтального и тыльного электродов, пассивирующего отжига в форминг-газе. Эти операции в сочетании с латентными дефектами

и зародышами генерируют в структуре кремния ряд активных точечных дефектов: межузельных атомов кислорода, кремния, бора, водорода, азота, вакансий и их соединений. В результате формируются кластеры и агломераты низкотемпературных двухзарядных доноров TD1, включающих в себя скопления атомов быстродиффундирующих примесей (**БДП**) рекомбинационного типа.

Донорный агломерат оказывается изолированным от p -матрицы контактным полем границы раздела и может инвертировать тип проводимости с дырочной на электронную. В этом случае активность акцепторных рекомбинационных центров и глубоких донорных уровней БДП подавляется. Это эквивалентно внутреннему геттерированию высокотемпературными кислородными преципитатами вне активного объема традиционных сверхбольших интегральных схем (**СВИС**). Необходимым условием образования кластеров донорного типа является доминирование реакции по переводу бора из положения в узлах кристаллической решетки в межузельное положение атомами кремния, кислорода и их комплексами. Участие ионов водорода ускоряет диффузию точечных дефектов [6—9].

Кластеры донорного типа находятся под плавающим потенциалом и отражают дырки из окружающего объема контактным полем границы кластера и p -матрицы. При концентрации донорных кластеров и агломератов 10^{12} — 10^{13} см^{-3} [6] расстояние между ними при гомогенном распределении составляет 10^{-4} см . Это значительно меньше диффузионной длины электронов в p -базе солнечного элемента. При фотонном возбуждении цепочка кластеров (см. рис. 1, б) превращается в проводящий канал n -типа, в котором электроны переносятся дрейфовым механизмом [7], аналогично встроенному легирующим примесями зарядовому насосу [10, 11].

Низкотемпературное формирование n -области в Cz-Si p -типа проводимости также посредством кластеров термодоноров TD1 наблюдали в работах [8, 9] при проведении травления в плазме Ar. Фотонная деградация и регенерация солнечных элементов из Cz-Si [4] могут быть инициированы перестройкой донорных кластеров TD1 в нейтральные с активацией рекомбинационных глубоких акцепторных и донорных центров. Эти центры приводят не только к уменьшению объемного времени жизни, но и к подавлению эффективности элемента зарядового насоса. Восстановление донорной природы кластера термоотжигом при температуре $T = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение времени $t = 10\text{ мин}$ или регенерацией при повышенной температуре $120 < T < 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ с фотонной или электрической инжекцией в темноте возвращает эффективность конверсии солнечных элементов [6].

Примесные «атмосферы» дислокационных колоний также могут содержать избыточную концентрацию донорных центров (кислородные доноры, H^+ , Li^+ и др.) и формировать локальные n -области

с плавающим потенциалом в p -базе, выполняющие роль зарядовых насосов.

Необходимым условием контролируемого формирования локальных областей зарядовых насосов является пространственная дискретность фотонного воздействия с мощностью 45—50 Вт/см². Для проведения RTP-обработок использована установка быстрой термической обработки галогенными лампами. Мощность светового облучения достигала 45 Вт/см², скорость нарастания температуры в диапазоне от 0 до 1000 °С составляла 125 К/с [12].

Атермический режим ЛФО реализовывали, применяя металлическую фотомаску (съёмный шаблон), представляющую пластину из нержавеющей стали толщиной 6 мм. В пластине по всей площади имелись сквозные отверстия размером 1 × 1 мм², расстояние между отверстиями составляло 3 мм.

Фотомаску размещали на поверхности всей пластины и после окончания световой обработки удаляли с пластины так, чтобы температура нагрева пластины в результате обработки не превышала 45—55 °С по показаниям пирометра Term Pro–1200. Таким образом, фотошаблон выполнял также функцию термического экрана, не позволяющего чрезмерно нагреваться пластине солнечного элемента за время обработки.

Результаты и их обсуждение

В зависимости от длительности фотонного импульса от 5 до 30 с и удельной мощности ламп $P = 44$ Вт/см² увеличение предельной мощности в образцах исследуемых ФЭП составило от 3 до 35 % с максимумом в интервале времени ЛФО-обработки $t_u = 8 \div 13$ с. При этом максимальное возрастание тока короткого замыкания наблюдали у образцов с малой исходной эффективностью $\eta < 15$ %. У образцов с эффективностью $\eta \geq 17$ % и плотностью тока короткого замыкания $j_{sc} > 35$ mA/cm² увеличение предельной мощности фиксировали на уровне 7—15 %.

При фотонной обработке всей поверхности различных образцов солнечных элементов (без использования фотошаблона) изменений тока короткого замыкания и мощности или не происходило вообще (при $t_u < 13$ с), или наблюдали уменьшение значений более чем на 50 % (при $t_u > 20$ с). Было замечено также, что образцы с малой площадью подвержены аналогичной деградации в режимах ЛФО. Эти результаты объясняются термическим перегревом структуры, так как температура поверхности образца превышала 1000 °С за время обработки $t_u > 20$ с [12].

На рис. 2 представлены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов солнечных элементов российского производства (г. Подольск). Экспериментальные ВАХ получены при освещении образца светом с освещенностью 80000 лк до (см. рис. 2, а) и после ЛФО на воз-

духе в течение 9 с при удельной мощности ламп $P = 44$ Вт/см² (см. рис. 2, б). В исходном состоянии до обработки образец характеризовался током короткого замыкания $I_{sc} = 414,4$ мА, напряжением холостого хода $U_{oc} = 0,6$ В, коэффициентом заполне-

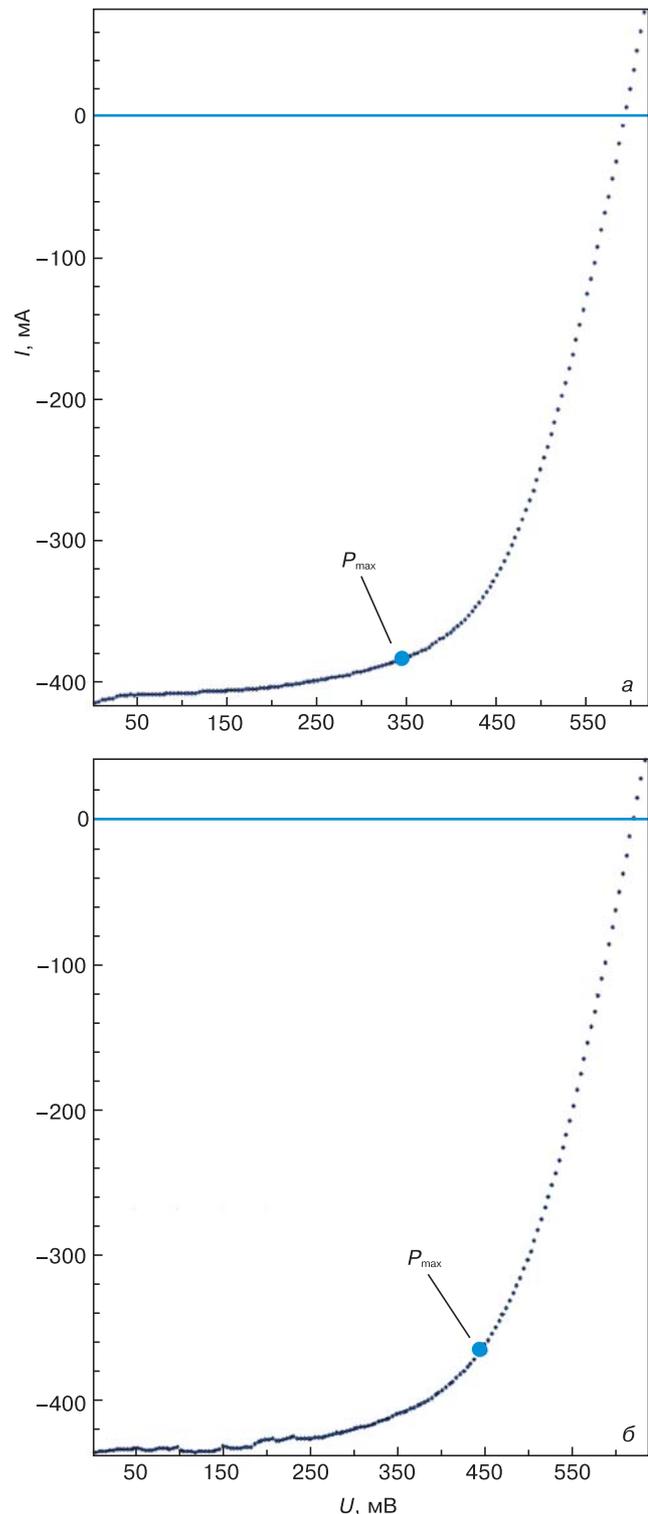


Рис. 2. Световые ВАХ ФЭП: а — исходная структура; б — структура после ЛФО на воздухе в режиме $P = 44$ Вт/см², $t = 9$ с

Fig. 2. Light CV Curves of the Photocells: (a) Initial, (b) after Local Photon Annealing in Air at $P = 44$ W/cm² for $t = 9$ s

ния $FF = 60,3\%$. Предельная мощность элемента составила $P_{\max} = 150$ мВт. После проведения ЛФО характеристики образца заметно увеличились: $I_{sc} = 435,6$ мА, $U_{oc} = 0,614$ В, $P_{\max} = 163$ мВт, $FF = 61\%$. Подобные экспериментальные результаты характерны практически для всех образцов этого производителя ФЭП. Они свидетельствуют об эффективности ЛФО–процесса, в результате которого в p -базовой области структуры ФЭП формируются комплексы донорного типа. Увеличение концентрации донорных центров после ЛФО должно приводить к модуляции проводимости p -базовой области солнечного элемента в сторону увеличения ее сопротивления. Оценка внутреннего сопротивления образца солнечного элемента в точке предельной мощности P_{\max} (см. рис. 2) свидетельствует о том, что эта величина, действительно, возросла с 0,9 до 1,2 Ом после ЛФО. Этот экспериментальный факт может служить дополнительным подтверждением развитой модели зарядовой подкачки в ФЭП с дискретной структурой зарядовых насосов на основе донорных комплексов.

Отсутствие достоверной информации об истории термических процессов формирования структуры солнечного элемента [13] и технологии изготовления пластин конкретных производителей не позволяет делать бесспорные выводы о природе увеличения тока короткого замыкания у ФЭП, подверженных ЛФО. Очевидно, что с целью получения максимальных результатов для исследуемых образцов ФЭП, в зависимости от конкретных процессов их изготовления, необходимо также оптимизировать режимы ЛФО. Проведенные эксперименты по применению ЛФО, вероятно, могут свидетельствовать о повышении эффективности конверсии ФЭП за счет увеличения плотности локальных кластерных агломератов донорного типа, играющих роль зарядовых насосов в структуре солнечных элементов.

Заключение

Предложена схема реализации технологического процесса создания экспериментальной структуры СЭЗН. Экспериментальные исследования подтвердили факт увеличения тока короткого замыкания и максимальной мощности после проведения ЛФО образцов ФЭП различных производителей.

Снижение рекомбинационных потерь в структурах солнечных элементов, подверженных ЛФО, достигнуто за счет уменьшения времени разделения фотогенерированных носителей тока зарядовыми насосами, реализованными дефектно–примесной инженерией.

Применение обнаруженного эффекта увеличения тока короткого замыкания и максимальной мощности за счет ЛФО на ФЭП большой площади будет способствовать созданию элементной базы солнечной энергетики повышенной эффективности ($\eta > 20\%$) с гигаваттными объемами установленной мощности.

Библиографический список

1. **Гусев, В. А.** Фотопреобразователи на основе зарядовых насосов / В. А. Гусев // Вестн. СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь – 2011. – Вып. 114. – С. 199–203.
2. **Gusev, V. A.** Solar cells with a charge pump: theoretical prospects and technological aspects of the application / V. A. Gusev, V. V. Starkov, A. V. Teterskii // Russian Microelectronics. – 2015 – V. 44, iss. 8. – P. 569–574. DOI: 10.1134/S1063739715080065
3. **Гусев, В. А.** Солнечные элементы с зарядовой подкачкой / В. А. Гусев, В. В. Старков // Материалы XII Междунар. научно–практ. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб., 2011. – Т. 2. – С. 157–158.
4. **Гусев, В. А.** Солнечные элементы с зарядовой подкачкой: теоретические перспективы и технологические аспекты применения / В. А. Гусев, В. В. Старков, А. В. Тетерский // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2013. – № 2. – С. 49–54.
5. **Гусев, В. А.** Объемный делительный слой в структуре высоковольтных полупроводниковых приборов / В. А. Гусев, Д. Г. Мурзин // Вестн. СевНТУ. Сер. Информатика, электроника, связь. – 2007. – Вып. 82. – С. 85–89.
6. **Heruth, A.** Avoiding boron–oxygen related degradation in highly boron doped Cz Silicon / A. Heruth, G. Schubert, M. Kaes, G. Hahn // Proc. 21st EU PVSEC. – 2006. – P. 530–537.
7. **Breitenstein, D.** EBIC investigation of a 3–dimensional network of inversion channels in solar cell on silicon ribbons / O. Breitenstein, M. Langenkamp, J. P. Rakotoniaina // Solid State Phenomena. – 2001. – V. 78–79. – P. 29–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.78–79.29
8. **Buzynin, A. N.** Non – equilibrium impurity redistribution in Si / A. N. Buzynin // Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – V. 188. – P. 366–370. DOI: 10.1016/S0168–583X(01)00882–5
9. **Buossisina, T.** Observation of transition metals at shunt locations in multicrystalline silicon solar cells / T. Buonassisi, O. F. Vyvenko, A. A. Istratov, E. R. Weber, G. Hahn, D. Sontag, J. P. Rakotoniaina, O. Breitenstein, J. Isenberg, R. Schindler // J. App. Phys. – 2004. – V. 95, N 36. – P. 1556–1558. DOI: 10.1063/1.1636252
10. **Гостева, Е. А.** Дефектно–примесная инженерия при формировании структуры солнечных элементов с зарядовыми насосами / Е. А. Гостева, В. А. Гусев, В. В. Старков, Н. Н. Герасименко // Материалы I Всероссийской науч. конф. «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечных элементов 3–го поколения». – Чебоксары, 2013. – Вып. 1. – С. 63–65. URL: http://amf21.ru/filestore/%D1%81%D0%B1%D0%E%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B8%20Chuv–Nano–Solar_2013.pdf
11. **Гостева, Е. А.** Оптимизированная приборная структура фотопреобразователя на основе зарядовых насосов, сформированных методами дефектно–примесной инженерии / Е. А. Гостева // 69 Дни науки студентов НИТУ «МИСиС». – М., 2014. – С. 601–602. URL: http://sciencedays.misis.ru/69_DNI_all.pdf
12. **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 // Электрон. техника. Сер. Материалы. – 1989. – Вып. 4. – С. 20–23.
13. **Нейшман, В. Б.** О природе зародышей для образования термодоноров в кремнии / В. Б. Нейшман, Е. А. Пузенко, А. Н. Кабалдин, А. Н. Крайчинский, Н. Н. Красько // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, вып. 12. – С. 1423–1427.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2015 г.

Formation a charge pump in the structure of phototransformators

Vitaliy V. Starkov¹ — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher (starka@iptm.ru); **Vladimir A. Gusev**¹ — Dr. Sci. (Eng.) (elt.sevntu@gmail.com); **Nataliya O. Kulakovskaya**¹ — Engineer (elt.sevntu@gmail.com); **Ekaterina A. Gosteva**² — Assistant (gos-3@mail.ru); **Yuri N. Parkhomenko**² — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof., Head of Department of the Material Science of Semiconductors and Dielectrics at the MISiS (parkh@rambler.ru)

¹ **Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS,**

6 Academician Ossipyan Str., Chernogolovka, Moscow District 142432, Russia

² **National University of Science and Technology «MISIS»,**
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia

Abstract. Results of further investigation into original concept of charge pumps in the structure of photoelectric cells show that charge pumps are formed due to the formation of spatial defect–dopant complexes which produce a qualitative change in the transport mechanism of light generated charges at the base of the solar cell. For the first time a large scale charge pump manufacturing process has been offered. This process involves a non–thermal or «cold» photon annealing and uses standard photon annealing equipment. The photon annealing effect is achieved by using an original photomask (removable). The mask provides an annealing pattern with multiple light sources and heat insulation of the target wafer. This process is called local photon annealing (LPA). Due to its efficiency and simplicity the process does not require significant industrial investment. Experimental results show that it is possible to increase short circuit current and maximum power output of a solar cell with the use of the LPA technique. Experimental solar cell samples have been chosen from different manufacturers.

Keywords: semiconductor lasers, iron group ions, energy structure, intensity of transitions

References

1. Gusev V. A. Photoelectric converters based on charge pumps. *Vestn. SevNTU, Ser. Inform., Elektron., Svyaz'*. 2011, no. 114, pp. 199–203. (In Russ.)
2. Gusev V. A., Starkov V. V., Teterskii A. V. Solar cells with a charge pump: theoretical prospects and technological aspects of the application. *Russian Microelectronics*. 2015, vol. 44, no. 8, pp. 1–6. DOI: 10.1134/S10637397150800065
3. Gusev V. A., Starkov V. V. Solar cells with charge swap. *Trudy XII Mezhdunar. nauchnoprakt. konf. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologii v promyshlennosti = Proceedings of the 12th International Scien-*

tific–Practical Conference on Fundamental and Applied Studies, Development and Application of Higher Technologies in Industry. St. Petersburg, 2011, vol. 2, pp. 157–158. (In Russ.)

4. Gusev V. A., Starkov V. V., Tetersky A. V. Solar cells with the charge pumping: theoretical perspectives and technological aspects of the application. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2013, no. 2, pp. 49–54. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2013-2-49-54

5. Gusev V. A. Volumetric division layer in the structure of high–voltage semiconductor devices. *Vestn. SevNTU, Ser. Inform., Elektron., Svyaz'*. 2007, no. 82, pp. 85–89. (In Russ.)

6. Heruth A., Schubert G., Kaes M., Hahn G. Avoiding boron–oxygen related degradation in highly boron doped Cz Silicon. *Proc. 21st EU PVSEC*, 2006, pp. 530–537.

7. Breitenstein D., Langenkamp M., Rakotoniaina J. P. EBIC investigation of a 3–dimensional network of inversion channels in solar cell on silicon ribbons. *Solid State Phenomena*. 2001, vol. 78–79, pp. 29–38. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.78-79.29

8. Buzynin A. N. Non–equilibrium impurity redistribution in Si. *Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Res.* 2002, vol. 188, pp. 366–370. DOI: 10.1016/S0168-583X(01)00882-5

9. Buonassisi T., Vyvenko O. F., Istratov A. A., Weber E. R., Hahn G., Sontag D., Rakotoniaina J. P., Breitenstein O., Isenberg J., Schindler R. Observation of transition metals at shunt locations in multicrystalline silicon solar cells. *J. App. Phys.* 2004, vol. 95, no. 36, pp. 1556–1558. DOI: 10.1063/1.1636252

10. Gosteva E. A., Gusev V. A., Starkov V. V., Gerasimenko N. N. Defect–impurity engineering in the formation of the structure of solar cells with charge pumps. *Materiali I Vserossiiskoi nauchnoi konferencii «Nanostrukturirovannye materialy i preobrazovatelnye ustroystva dlya solnechnih elementov 3–go pokoleniya»*. Cheboksary, 2013. Iss. 1, pp. 63–65. (In Russ.)

11. Gosteva E.A. Optimized instrument structure of a photo–converter based on charge pumps, formed by methods of defect–impurity engineering. *Sbornik tezisov 69 Dni nauki studentov NITU «MISiS»*. Moscow, 2014. Pp. 601–602. URL: http://sciencedays.misis.ru/69_DNI_all.pdf

12. Kravchenko V. A., Starkov V. V., Abrosimov N. V., Abrosimova V. N. Diffusion alloying of silicon by boron and phosphorous in conditions of fast thermal annealing. *Elektron. Tekh., Ser. Mater.* 1989, no. 4, pp. 20–23. (In Russ.)

13. Neishman V. B., Puzenko E. A., Kabaldin A. N., Kraichinskii A. N., Krasko N. N. On the Nature of Embryos for the Formation of Thermodonors in Silicon. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*. 1999, vol. 33, no. 12, pp. 1423–1427. (In Russ.)

Received December 17, 2015