

*В. А. АНТОНОВА, канд. техн. наук, В. Н. БОРЩЕВ, д-р. техн. наук,  
В. Р. КОПАЧ, канд. техн. наук, А. М. ЛИСТРАТЕНКО, канд. техн. наук,  
Н. И. СЛИПЧЕНКО, канд. техн. наук, И. Т. ТЫМЧУК*

## **ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЫЛЬНОКОНТАКТНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Одной из характерных особенностей начала третьего тысячелетия является стремительное развитие существовавших ранее, а также возникших совсем недавно новых промышленных ресурсосберегающих экологически чистых технологий. Среди последних особое место занимает фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии, превратившееся на рубеже тысячелетий из научно-прикладного направления в индустриальное [1]. Сегодня его вклад в копилку мирового рынка энергетических ресурсов составляет свыше 1 ГВт пиковой мощности, которые явились востребованными для обеспечения электроэнергией как многих наземных объектов, так и практически всех современных космических аппаратов. Поэтому наряду с задачей массового применения энергетических установок на основе солнечных батарей (СБ) фотопреобразователей (ФП) и проблемой повышения их эффективности особо актуальным становится обеспечение технологической простоты и снижение стоимости изготовления как ФП так и СБ.

В настоящее время около 90 % объема мирового производства ФП осуществляется на основе кристаллического кремния [1]. Согласно [2, 3], достигнутые значения КПД для серийно изготавливаемых монокристаллических кремниевых фотопреобразователей космического применения составляют 12-17%, а для ФП наземного применения – до 20 %, в то время как рекордные значения КПД лучших лабораторных образцов монокристаллических кремниевых-ФП космического применения составляют 19-20%, а наземного применения – около 24 %.

Согласно [4, 5], для достижения максимально возможной эффективности работы ФП, изготавливаемых в условиях промышленного производства, необходимо обеспечить:

- как можно более высокое значение времен жизни  $\tau$  неосновных носителей заряда в объеме базового кристалла, в диффузионном слое и в слое обеднения р-п перехода после изготовления ФП;
- превышение диффузионной длины  $L$  неосновных носителей заряда над толщиной базового кристалла в течение всего срока эксплуатации ФП;
- минимальные скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда на лицевой и тыльной поверхностях базового кристалла ФП;
- максимальное снижение потерь солнечной энергии на отражение при взаимодействии солнечного излучения с ФП.

Выполнение первых двух из перечисленных выше требований при изготовлении ФП космического применения достигается ставшими за последние 10 лет традиционными способами – использованием высококачественного радиационно-стойкого кремния р-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и  $\tau_n \geq 100 \text{ мкс}$ , утонением базовых кристаллов до толщины не более 200 мкм, а также оптимизацией геометрического и концентрационного профилей  $p^+$ -слоя со стороны фронтальной поверхности ФП. Удовлетворение третьего и четвертого требований связано с использованием новых конструктивно-технологических решений (КТР), обеспечивающих существенное повышение фототока и снижение диодного тока насыщения, что ведет к значительному приросту напряжения холостого хода  $U_{\text{хх}}$ , плотности тока короткого замыкания  $j_{\text{кз}}$ , фактора заполнения нагрузочной световой вольт-амперной характеристики FF и, следовательно, КПД.

Так, например, для существенного снижения потерь солнечного излучения, обусловленных рекомбинационными процессами непосредственно на фронтальной и тыльной поверхностях ФП, а также на межфазных поверхностях Si/металл под токосъемными электродами,

применяются следующие подходы [6]. Фронтальная и тыльная поверхности пассивируются термически выращенным тонким слоем SiO<sub>2</sub>. Непосредственный контакт электродов с этими поверхностями создается через многочисленные сквозные отверстия в окисле, суммарная площадь которых составляет около 0,2 % площади указанных поверхностей. В области контакта металла с поверхностью р-типа проводимости уровень ее легирования акцепторной примесью повышается на 3-4 порядка. Для снижения потерь солнечной энергии на отражение от фронтальной поверхности ФП последняя подвергается текстурированию с образованием инверсионного либо хаотичного прямого пирамидального рельефа [3, 4-7]. Полное устранение затенения фронтальной поверхности ФП токосъемными электродами достигается созданием n<sup>+</sup>-р и р<sup>+</sup>-р переходов со стороны тыльной поверхности ФП и вынесением электродов обеих полярностей на эту поверхность [6, 7].

Целью настоящей работы является обоснование и разработка КТР тонких тыльноконтактных ФП с использованием процессов диффузии из жидкорастворных композиций (ЖРК) и процессов внешнего геттерирования, обеспечивающих простоту изготовления, повышение надежности, снижение стоимости ФП и воспроизводимость их параметров [8]. Основной мотивацией разработки является то, что наряду с реализацией 100%-й фотоприемной активной площади ФП появляются новые возможности создания эффективных процессов сборки ФП в модули. При этом перспективной является новая техника межсоединений, базирующаяся на использовании проводящих адгезивов [9].

Такое усовершенствованное КТР отечественных монокристаллических кремниевых ФП космического применения при сохранении наиболее рациональных подходов, реализованных ранее [10-13], должно включать следующие новые элементы:

- утонение кремниевых пластин до толщин не более 200 мкм;
- создание нерегулярного мелкого рельефа фронтальной поверхности базового кристалла и формирование со стороны последней диффузионного n<sup>+</sup>-слоя;
- пассивацию кремния его тонким термическим окислом со стороны фронтальной и тыльной поверхностей;
- вынесение на тыльную поверхность ФП контактной системы электрод/n<sup>+</sup>-Si и электрод/p<sup>+</sup>-Si с двумя (соответствующими n<sup>+</sup>-Si и p<sup>+</sup>-Si областям) встречными металлическими гребенками и локальными точечными сквозными окнами под ними в слое SiO<sub>2</sub>.

По нашим оценкам результатом указанного совершенствования КТР отечественных монокристаллических кремниевых ФП космического применения должно явиться улучшение их показателя мощность/вес в 1,5-2 раза.

При решении поставленной комплексной задачи в качестве исходных пластин для изготовления тонких тыльноконтактных ФП предполагается использовать высококачественный кремний марки КДБ-10 с ориентацией (100), выращенный методом Чохральского и имеющий время жизни неосновных носителей  $\tau_n \geq 100$  мкс. Использование в качестве исходного материала кремния, полученного методом зонной плавки, может обеспечить более высокие показатели ФП, но приведет к значительному повышению их стоимости.

Для обоснования топологии и структуры тыльноконтактных ФП были проведены расчеты диффузионной длины неосновных носителей заряда для различных областей фотопреобразователя:

$$L = \sqrt{D\tau}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии носителей заряда, определяемый из соотношения Эйнштейна:

$$D = \frac{kT}{e} \cdot u = \varphi_T \cdot u. \quad (2)$$

Здесь u – подвижность носителей заряда,  $\varphi_T = \frac{kT}{e}$  – температурный потенциал, который при T=300 °C равен 0,026В.

Для базовой области ФП решение системы уравнений [14]

$$N_a = \frac{I}{e \cdot u_p(N_a) \cdot \rho}, \quad (3)$$

$$u_p(N_a) = (480 - 122 \cdot \lg \frac{N_a}{10^{21}}) \cdot 10^{-4} \frac{M^2}{B \cdot c}, \quad 10^{21} < N_a < 4 \cdot 10^{24} M^{-3} \quad (4)$$

показывает, что в случае кремния марки КДБ-10 с  $\rho=10$  Ом·см и концентрацией акцепторной примеси  $N_a = 1,35 \cdot 10^{21} M^{-3}$  подвижность основных носителей (дырок)  $u_p = 0,0464 M^2/(B \cdot c)$ .

Учитывая связь между отношением подвижностей носителей заряда и отношением их эффективных масс, для Si с  $m_n^* = 0,26 m_0$  и  $m_p^* = 0,49 m_0$  получим значение подвижности неосновных носителей (электронов)  $u_n = 0,125 M^2/(B \cdot c)$ . На основании выражений (1) и (2) в

базовой области фотопреобразователя  $D_n = 32,5 \cdot 10^{-4} M^2/c$ ,  $L_n = 5,7 \cdot 10^{-4} M = 570$  мкм.

Для легированных слоев n-типа с удельным поверхностным сопротивлением  $R_s = 200$  Ом/кв и глубиной залегания p-n-перехода  $x_i = 1,5$  мкм с учетом выражений [14]:

$$R_s = \frac{\rho}{x_i} = \frac{I}{e \cdot N_d \cdot u_n(N_d) \cdot x_i}, \quad (5)$$

$$u_n(N_d) = (1300 - 284 \cdot \lg \frac{N_d}{2 \cdot 10^{20}}) \cdot 10^{-4} \frac{M^2}{B \cdot c}, \quad 2 \cdot 10^{20} < N_d < 4 \cdot 10^{24} M^{-3} \quad (6)$$

и соотношений (1) и (2) получаем:  $N_d = 7,1 \cdot 10^{23} M^{-3}$ ,  $u_n = 293 \cdot 10^{-4} M^2/(B \cdot c)$ ,  $u_p = 108 \cdot 10^{-4} M^2/(B \cdot c)$ ,

$D_p = 2,8 \cdot 10^{-4} M^2/c$ ,  $L_p = 7,5 \cdot 10^{-5} M = 75$  мкм (при  $\tau = 20$  нс).

Полученные результаты позволяют предложить несколько вариантов структуры и топологии тыльноконтактных ФП (рис. 1, рис. 2). На рис. 1 приведен общий вид (рис. 1а) и структура (рис. 1б) тыльноконтактного ФП.

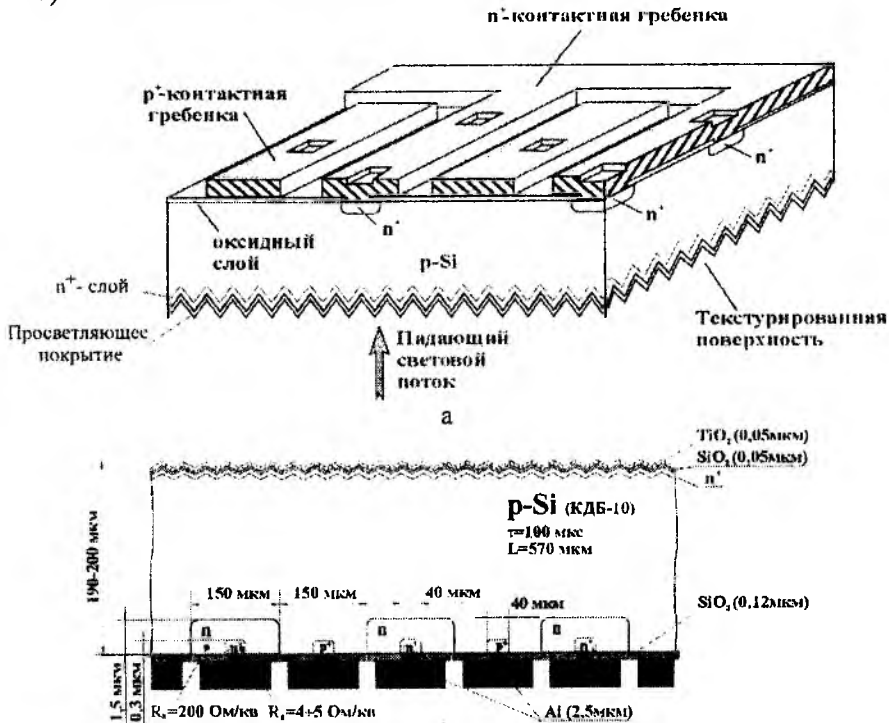


Рис.1

Структура тыльноконтактного ФП с утопленными контактами к базовой области изображена на рис. 2.

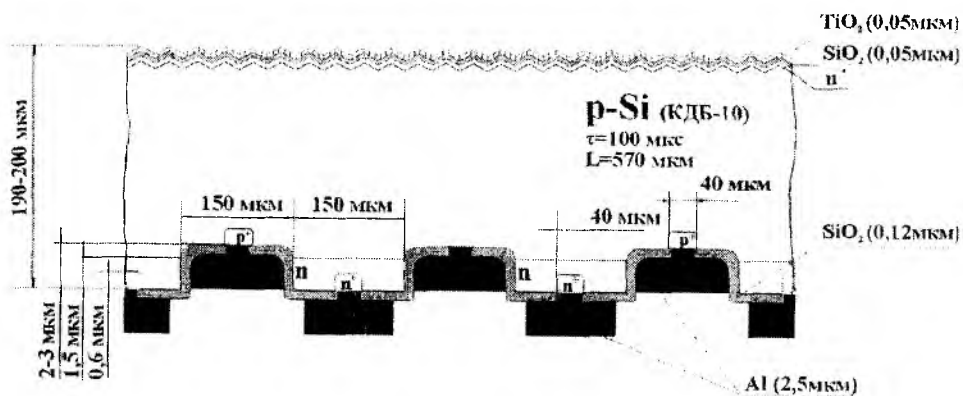


Рис. 2

Конструкция контактной системы ФП, при которой контакты как к  $p^+$ -области, так и к  $p^-$ -области выполнены на тыльной поверхности ФП с помощью двух встречных металлических гребенок, контактирующих с полупроводниковыми слоями в локальных точечных местах, обладает еще одним важным преимуществом наряду с указанными ранее. Это преимущество связано с возможностью изготавливать такие металлические гребенки достаточно широкими, минимизируя тем самым потери на выделение джоулева тепла в контактной системе и обеспечивая повышение КПД фотопреобразователя. Кроме того, при размещении контактных гребенок на одной стороне упрощается процесс сборки ФП в солнечные модули и возрастает надежность коммутации ФП.

Подготовка исходных пластин для изготовления тыльноконтактных ФП предполагает утонение и неглубокое текстурирование Si-пластин, имеющих ориентацию (100), с использованием анизотропного травителя – 100 г КОН + 500 мл  $H_2O$ . Процесс текстурирования проводится в статических условиях при температуре травителя –  $(90 \pm 5) ^\circ C$ . Скорость утонения пластин составляет 6-7 мкм/мин. Текстурирование фотоприемной поверхности уменьшает коэффициент отражения солнечного излучения и обеспечивает многократное прохождение длинноволнового излучения в объеме ФП, что должно приводить к росту плотности фототока.

Особенностью разрабатываемых КТР фотопреобразователей является использование для диффузионных процессов жидкорастворных композиций КФК-15-15 и КФК-50-10, для которых проведены комплексные исследования технологических режимов, обеспечивающих требуемые параметры диффузионных слоев [8,10,13]. Использование ЖРК позволяет обеспечить высокую равномерность распределения диффузанта на поверхности кремниевой пластины, а также возможность плавного регулирования поверхностной концентрации атомов примеси и точное регулирование  $R_s$  в широком диапазоне благодаря высокой точности дозирования атомов примеси в слое ЖРК.

На рис. 3 приведена структура ФП с контактной сеткой на тыльной стороне и электродом на лицевой стороне. Для конструкции тыльноконтактных ФП с  $p^+$ -слоем на лицевой стороне максимальный КПД обеспечивается при соединении тыльного и лицевого контактов к  $p^+$ -областям. Однако лицевой  $p^+$ -слой может быть изолирован и находиться под плавающим отрицательным потенциалом, снижающим скорость рекомбинации неосновных носителей заряда на этой поверхности. В этом случае электроны, генерируемые в эмиттере и базе, собираются  $p^+$ -коллектором подобно тому, как это имеет место в биполярном транзисторе с заданным  $p^+$ -эмиттером.

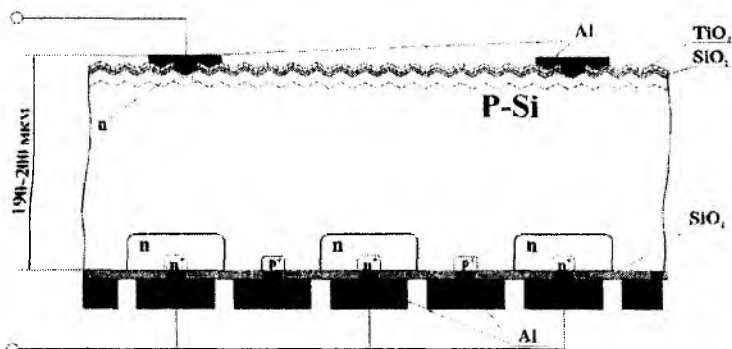


Рис. 3

В заключение отметим, что практическая реализация предложенных КТР тыльноконтактных кремниевых ФП позволит существенно упростить процесс сборки модулей из таких ФП и увеличить коэффициент заполнения СБ до 98%. При этом могут быть значительно улучшены показатели отношения мощность/вес, что за счет сравнительно низких ценовых характеристик и в дальнейшем позволит конкурировать кремниевым ФП с арсенид-галлиевыми ФП, которые в настоящее время все более широко используются для применения в космосе.

**Список литературы:** 1. Hoffmann W. PV solar electricity: one among the new millennium industries // Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany. 2001. P. 851 – 861. 2. Bücher K., Kunzelmann S. The Fraunhofer ISE PV charts: assessment of PV device performance // 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain. 1997. P. 272 – 277. 3. K.A. Münzer, R.E. Schlosser, B. Hösselbarth et al. Silicon solar cells for satellites based on terrestrial manufacturing // Proceedings of the 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany. 2001. P. 2171 – 2174. 4. Фаренбрух А. Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент. М.: Энергоиздат, 1987. 280 с. 5. 18,3% efficient silicon solar cell for space application / G.T. Grotty, P.J. Verlinden, M. Cudzinovich et al // 26-th IEEE Photovoltaic Specialist Conference. Anaheim, CA. 1997. P. 1035 – 1038. 6. The range of high efficiency silicon solar cells fabricated at Fraunhofer ISE / S.W. Glunz, J. Knobloch, C. Hebling, W. Wetzling // 26-th IEEE Photovoltaic Specialist Conference. Anaheim, CA. 1997. P. 231-237. 7. Состояние и тенденции развития твердотельных преобразователей солнечной энергии / Ю.Е. Николаенко, Н.М. Вакив, С.И. Круковский и др. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2001. №2. С. 21 – 30. 8. Антонова В.А., Листратенко А.М., Слипенченко Н.И. Высокоэффективные солнечные элементы на основе жидкорастворной технологии. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып. 115. С. 90 - 94. 9. Ace Designs: The Beauty of Rear Contact Solar Cells/A. Schönecker, D.W.K. Eikelboom, P. Manshanden et al // 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA. 2002. 10. Оптимизация кремниевых солнечных элементов на основе  $n^+p-p^+$ -структур / В.А. Антонова, В.Н. Борщев, В.А. Золотарев, А.М. Листратенко и др // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 120. С. 155 – 161. 11. Перспективные конструкторско-технологические решения монокристаллических кремниевых фотопреобразователей космического назначения / В.А. Антонова, В.Н. Борщев, В.Р. Копач и др. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 125. С. 110 – 116. 12. Comprehensive optimization on the frontal structure elements of solar cells for space application / V.A. Antonova, V.N. Borshchov, V.R. Kopach and al // Functional materials. 2003. Vol. 10, №1. P. 168 – 175. 13. Твердотельные солнечные фотопреобразователи на основе жидкорастворных композиций / В.А. Антонова, А.М. Листратенко, Б.И. Макаренко, Н.И. Слипенченко // Технология приборостроения. 1999. Вып. 3. С. 54 – 57. 14. Антонова В. А., Слипенченко Н. И. Алгоритм расчета режимов импульсной фотонной обработки (ИФО) при формировании в кремнии диффузионных слоев с требуемыми параметрами // Сб. науч. тр. (по материалам 4-й междунар. конфер. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации. Новые информационные технологии»). Харьков: ХТУРЭ, 1999. С. 442 – 444.

Харьковский ГП НИТИ Приборостроения

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Национальный технический университет

Харьковский политехнический университет»

Поступила в редколлегию 26.02.2004