

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

## ТОНКИЕ ТЕКСТУРИРОВАННЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С УЛУЧШЕННЫМИ МАССОМОЩНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Солнечные батареи (СБ) из фотопреобразователей (ФП) на основе монокристаллического кремния и арсенида галлия являются в настоящее время и останутся в обозримом будущем основными источниками электроэнергии для большинства космических аппаратов (КА) [1], в том числе – для отечественных КА серии «Микроспутник» [2]. Поэтому разработка и производство высокоэффективных монокристаллических кремниевых ФП относятся к разряду приоритетных задач космической отрасли Украины, на решение которых направлены комплексные теоретические и экспериментальные исследования, проводимые Государственным предприятием «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения» (ГП НИТИП, г. Харьков) совместно с Харьковским национальным университетом радиоэлектроники и Национальным техническим университетом «Харьковский политехнический институт».

Результатами предшествующих этапов таких исследований [2] стали разработка конструкции и создание с последующим внедрением в условиях производства ГП НИТИП базового варианта простой, ресурсосберегающей промышленной технологии изготовления радиационностойких ФП  $n^+ - p - p^+$  типа с площадью  $\sim 7 \text{ см}^2$  на основе дешевого монокристаллического кремния марки КДБ-10 с двусторонней полировкой, выращенного методом Чохральского, с толщиной  $t_K = 350 \pm 50 \text{ мкм}$ , ориентацией (111) и (100) и временем жизни неосновных носителей заряда  $\tau_n \approx 100 \text{ мкс}$ . При  $25^\circ \text{C}$  в режиме облучения АМ0 коэффициент полезного действия  $\eta$  серийных образцов ФП составляет 12-15 %, вырабатываемая ими максимальная полезная мощность, отнесенная к площади (удельная мощность),  $P_{\text{отт}}^* = 165-200 \text{ Вт/м}^2$ , а к массе (массомощностная характеристика) –  $P_{\text{отт}}^{**} = 200-245 \text{ Вт/кг}$ . Это обеспечило возможность использования разработанных ФП для компоновки СБ космического аппарата КС5МФ2 «Микрон» – первого в Украине из КА серии «Микроспутник».

Однако в связи с необходимостью повышения мощности систем энергоснабжения космических аппаратов и уменьшения их веса актуальной проблемой становится уменьшение массы СБ и повышение КПД, что может быть обеспечено уменьшением толщины ФП, увеличением их площади, а также совершенствованием конструкции.

Целью очередного этапа исследований, результаты которого представлены в настоящей работе, является разработка конструктивно-технологических решений (КТР) тонких (толщиной  $\sim 200 \text{ мкм}$ ) кремниевых ФП с текстурированной фотоприемной поверхностью, которые значительно превосходят ранее разработанные ФП по показателю  $P_{\text{отт}}^{**}$ .

При решении поставленных задач в качестве материала исходных пластин, аналогично базовым КТР, использован кремний марки КДБ-10 с ориентацией (100) и  $\tau_n \approx 100 \text{ мкс}$ . Одна из планарных поверхностей таких пластин – полированная (14 класс чистоты обработки), другая – шлифованная (8 класс чистоты обработки), что в сравнении с использованием подобных пластин, имеющих двустороннюю полировку, упрощает технологический маршрут изготовления пластин и уменьшает их стоимость.

Отличительными особенностями новых КТР фотопреобразователей являются:

1) новая конструкция гребенчатого фронтального электрода, оптимизированная для достижения требуемых значений  $P_{\text{отт}}^{**}$  и  $\eta$ , а также для повышения технологичности коммутации ФП при сборке СБ и надежности их работы при эксплуатации СБ (рис. 1);

2) введенная в базовый технологический маршрут [2] дополнительная операция по утонению исходных кремниевых пластин до  $t_K = 200 \pm 20$  мкм и одновременному текстурированию их фронтальной (фотоприемной) поверхности для снижения потерь солнечной энергии на отражение и повышения эффективного коэффициента фотоактивного поглощения солнечного излучения объемом полупроводника [3];

3) оптимизированная операция диффузионного легирования фосфором кремниевой пластины со стороны текстурированной поверхности из жидкорастворной кремний-фосфорной композиции (ЖРК) типа КФК-15-15, обеспечивающая необходимые для решения поставленной задачи значения плотности фототока  $j_\Phi$  и диодных параметров: плотности диодного тока насыщения  $j_0$ , коэффициента идеальности диода  $A$ , последовательного  $R_{II}$  и шунтирующего  $R_{III}$  сопротивлений.

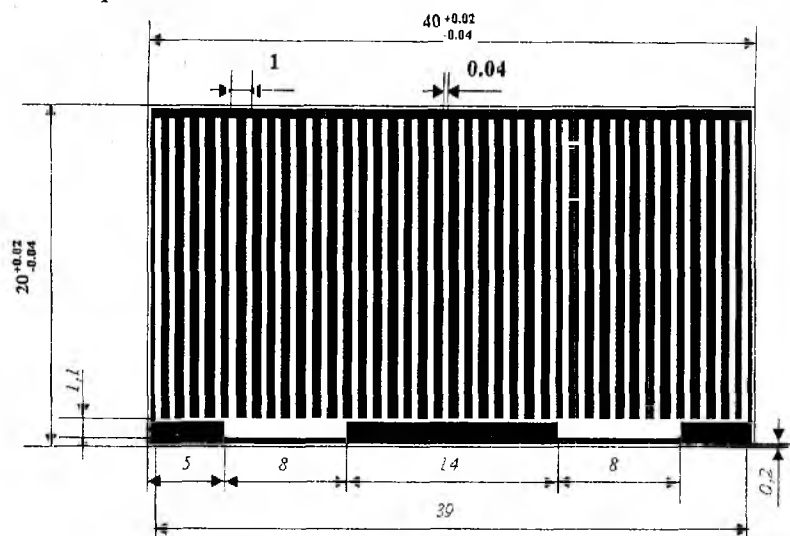


Рис. 1

Как известно [3], наиболее простым и технологичным способом однородного утонения пластин из кремния с ориентацией (100) является их глубокое химическое травление в горячем водном растворе KOH или NaOH. Существенным достоинством этого способа является отсутствие в приповерхностных областях пластины после ее утонения структурно нарушенных слоев.

В случае исходных пластин кремния с обеими полированными планарными поверхностями особенностью химического трав-

ления является четкая зависимость получаемого микрорельефа поверхности от температуры и концентрации раствора. Если концентрация щелочи выше 18 % и раствор имеет температуру не менее 100°C, то поверхности остаются гладкими и блестящими. Если концентрация щелочи менее 15-18 % или температура раствора ниже 100°C, поверхности оказываются текстурированными с преимущественным возникновением хаотического пирамидального рельефа, высота микронеровностей которого достигает нескольких микрометров. Эта особенность существенно усложняет процесс изготовления тонких кремниевых пластин с текстурированной фронтальной поверхностью и полированной тыльной, хотя такие пластины требуются для многих КТР фотопреобразователей, в том числе и для тыльноконтактных ФП [4,5].

Исследование рассматриваемого способа применительно к задачам настоящей работы показало, что возможен выбор таких условий его реализации, при которых химическое утонение кремниевых пластин сопровождается текстурированием только одной из поверхностей без специальной защиты противоположной. Эти условия можно создать, если в качестве исходных пластин использовать пластины с односторонней полировкой. Для использованных пластин указанный эффект достигается при их травлении в (20 – 25) %-м водном растворе KOH, имеющем температуру  $90 \pm 5$  °C. В результате такого двустороннего травления, протекающего со скоростью 4,5–5,0 мкм/мин, текстурированию подвергалась исходно шлифованная сторона пластины, а исходно полированная оставалась без изменений

Для проведения этой операции пластины помещались в специальную фторопластовую кассету партиями по три штуки, где размещались параллельно друг другу на расстоянии 5 мм. Затем кассета с пластинами опускалась в стальной ковш емкостью 1 л с разогретым до указанной выше температуры травителем. Длительность последующего процесса утонения пластин с 300-350 мкм до  $200 \pm 20$  мкм и их одновременного текстурирования не превышала 15-16 мин.

Характер получаемой при этом текстуры показан на рис. 2, где планарный размер фигур на текстурированной поверхности, отдаленно напоминающих пирамиды, составляет 200 – 400 мкм.



Рис. 2

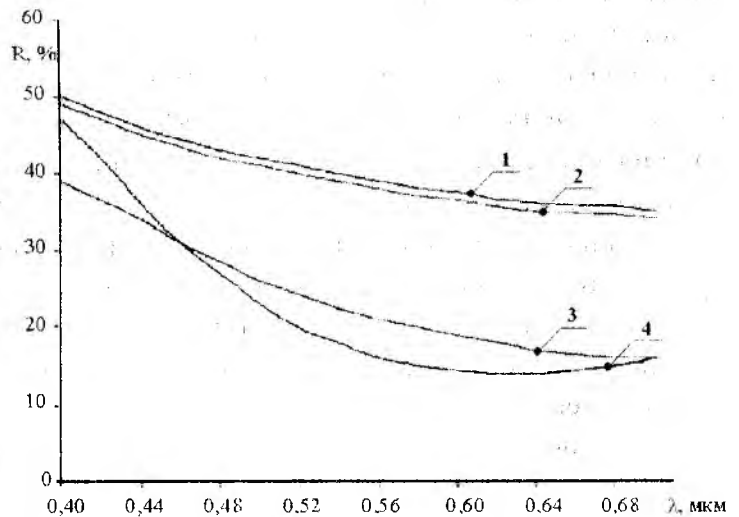


Рис. 3

Высота этих фигур, измеренная прибором МИИ-494.2, колеблется в пределах от 0.5 до 1.5 мкм.

возрастая по мере утонения пластины.

На рис. 3 представлена спектральная зависимость коэффициента отражения  $R$  для планарных поверхностей (100) кристаллов кремния марки КДБ-10, подвергнутых различным видам обработки: 1 – после химической полировки; 2 – после механической шлифовки и химического текстурирования; 3 – после полировки и просветления; 4 – после текстурирования и просветления.

Из рис. 3 следует, что после текстурирования описанным выше способом величина  $R$  во всем спектральном диапазоне незначительно уменьшается по сравнению с ее значением для полированной поверхности. Однако после нанесения просветляющего покрытия из  $TiO_2$  на каждую из таких поверхностей эффект просветления в диапазоне длин волн 0.50-0.65 мкм, соответствующем области повышенной спектральной чувствительности ФП, заметно увеличивается в случае текстурированной поверхности.

Одновременное образование анизотипного  $n^+$ -р и изотипного  $p^+$ -р гомопереходов с противоположных сторон пластины кремния марки КДБ-10 в результате синхронной диффузии фосфора из ЖРК и бора из твердотельного источника нитрида бора является одной из ключевых операций технологического маршрута, используемого в ГП НИТИП при изготовлении ФП  $n^+$ -р- $p^+$  типа [2]. Базовая технология легирования пластины фосфором состоит в нанесении пленки ЖРК толщиной  $t_{Ж} = 0,1$  мкм с последующим проведением диффузии при температуре  $T_{д} = 1000$  °С в течение  $\tau_{д} = 60$  мин. В случае полированной поверхности (100) под пленкой ЖРК это приводит к получению  $n^+$ -слоя однородной толщины  $t_{n^+} \approx 0,9$  мкм с концентрацией донорных атомов фосфора непосредственно у поверхности  $N_D \approx 5 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Для таких ФП характерна достаточно высокая плотность фототока  $J_{\phi} \approx 42$  мА/см<sup>2</sup>, обусловленная исключительно малыми рекомбинационными потерями в р-области и на тыльной поверхности кристалла, а также в обедненной области  $n^+$ -р гомоперехода.

Изготовление ФП на тонких ( $200 \pm 20$  мкм) текстурированных пластинах по базовой технологии диффузии фосфора из ЖРК в текстурированную поверхность привело к существенному ухудшению всех параметров, что стало основанием для предположения о существенной неоднородности толщины  $n^+$ -слоя, приводящей к возникновению внутри последнего островковых участков р-типа проводимости, локализованных в областях наиболее высоких пирамидальных выступов текстурированной поверхности утоненной кремниевой пластины, по мере приближения к которым  $t_{n^+} \rightarrow 0$ . Наличие таких участков на непокрытой металлизацией фронтальной поверхности кристалла должно приводить к увеличению сопротивления растекания фронтального электрода, что экспериментально проявляется в значительном росте последовательного сопротивления, а закорачивание  $n^+$ -р гомоперехода металлом при наличии таких участков под фронтальным электродом обуславливает заметное снижение шунтирующего сопротивления ФП.

Наиболее вероятными причинами указанной неоднородности толщины  $n^+$ -слоя являются недостаточность как толщины наносимой пленки ЖРК для покрытия диффузантом всех пирамидальных выступов на текстурированной поверхности пластины, так и времени проведения диффузии. Поэтому оптимизация операции диффузионного легирования фосфором кремниевой пластины со стороны текстурированной поверхности из жидкорастворной композиции типа КФК-15-15 осуществлялась варьированием толщины слоя ЖРК в пределах от 0,2 мкм (табл. 1; ФП № Т2М<sub>1</sub> и № Т3М<sub>1</sub>; М<sub>1</sub> – первый вариант модернизации технологии изготовления  $n^+$ -слоя) до 0,3 мкм (табл. 1; ФП № Т4М<sub>2</sub> и № Т5М<sub>2</sub>; М<sub>2</sub> – второй вариант модернизации технологии изготовления  $n^+$ -слоя) при увеличенном времени диффузии до  $\tau_D = 120$  мин. Согласно проведенным расчетам последнее обеспечивает повышение  $t_{n^+}$  до 1,2-1,3 мкм по сравнению с  $t_{n^+} = 0,90$  мкм при  $\tau_D = 60$  мин.

Характеристики базовых кристаллов исследованных ФП с площадью  $8 \text{ см}^2$  и условий проведения диффузионных процессов со стороны их фронтальной поверхности из слоев полимеризующейся жидкорастворной композиции (ЖРК) типа КФК-15-15 даны в табл. 1. В табл. 2 приведены данные о фототоках, фотоэлектрических и диодных параметрах, полученных при аналитической обработке в однодиодном и двухдиодном приближениях [6,7] нагрузочных световых вольт-амперных характеристик исследованных ФП.

Таблица 1

Номер ФП	Толщина и масса кристалла		Состояние поверхностей кристалла		Толщина слоя ЖРК $t_{ж}$ , мкм	Температура и время диффузии фосфора	
	$t_k$ , мкм	$m_k$ , г	Фронтальная	Тыльная		$T_D$ , °C	$\tau_D$ , мин
П1Б	300	0,56	Полировка	Шлифовка	0,1	1000	60
Т1Б	220	0,41	Текстура	Полировка	0,1	1000	60
Т2М <sub>1</sub>	220	0,41	Текстура	Полировка	0,2	1000	120
Т3М <sub>1</sub>	200	0,373	Текстура	Полировка	0,2	1000	120
Т4М <sub>2</sub>	210	0,39	Текстура	Полировка	0,3	1000	120
Т5М <sub>2</sub>	190	0,354	Текстура	Полировка	0,3	1000	120

Таблица 2

Номер ФП	П1Б	Т1Б	Т2 М <sub>1</sub>	Т3 М <sub>1</sub>	Т4 М <sub>2</sub>	Т5 М <sub>2</sub>
$J_{\Phi}$ , $mA/cm^2$	41,6	35,8	36,8	35,0	37,8	36,5
$J_{K3}$ , $mA/cm^2$	41,5	33,2	36,7	34,9	37,6	36,4
$U_{XX}$ , $mB$	621	454	614	602	614	616
$FF$ , <i>отн. ед.</i>	0,74	0,31	0,72	0,72	0,71	0,73
$P_{opt}^*$ , $Bm/m^2$	191	47	161	151	164	164
$P_{opt}^{**}$ , $Bm/kg$	273	92	314	325	336	371
$J_{opt}$ , $mA/cm^2$	37,6	19,8	33,3	31,0	33,0	32,5
$U_{opt}$ , $mB$	509	240	487	488	496	505
$\eta$ , %	14,0	3,5	11,9	11,2	12,0	12,0
$J_{O1}$ , $A/cm^2$	$9,3 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$8,6 \cdot 10^{-13}$	$9,8 \cdot 10^{-13}$
$J_0$ , $A/cm^2$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$8,1 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$8,0 \cdot 10^{-12}$
$J_{O2}$ , $A/cm^2$	$6,1 \cdot 10^{-9}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$
$A_1$ , <i>отн. ед.</i>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$A$ , <i>отн. ед.</i>	1,18	1,89	1,12	1,14	1,11	1,09
$A_2$ , <i>отн. ед.</i>	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$R_{\Pi}$ , $Om \cdot cm^2$	0,88	8,80	1,04	1,12	1,20	0,96
$R_{\Pi}$ , $Om \cdot cm^2$	270	77	195	255	202	255

Анализ результатов табл. 2 показывает, что ФП, изготовленные по базовой технологии и имеющие толщину 300 мкм (ФП № П1Б; П – полированная фронтальная поверхность, Б – базовая технология изготовления  $n^+$ -слоя), характеризуются низкими значениями диффузионной ( $J_{O1} = 9,3 \cdot 10^{-13} A/cm^2$ ) и рекомбинационной ( $J_{O2} = 6,1 \cdot 10^{-9} A/cm^2$ ) компонент диодного тока насыщения. При указанных  $J_{O1}$  и  $J_{O2}$  результирующее значение плотности диодного тока насыщения  $J_0 \sim 10^{-11} A/cm^2$ , а коэффициент идеальности диода  $A = 1,18$ . Наряду с достаточно низким значением  $R_{\Pi} = 0,88 Om \cdot cm^2$  и сравнительно высоким значением  $R_{\Pi} = 270 Om \cdot cm^2$  это приводит к практически не отличающемуся от  $J_{\Phi}$  значению плотности тока короткого замыкания  $J_{K3}$ , а также к высоким значениям напряжения холостого хода  $U_{XX} = 621 mB$ , фактора заполнения нагрузочной световой ВАХ –  $FF = 0,74$ , тока  $J_{opt} = 37,6 mA/cm^2$ , отдаваемого единицей площади ФП в оптимальную по величине сопротивления нагрузку, и напряжения  $U_{opt} = 509 mB$  на оптимальной нагрузке. В целом такие параметры обуславливают коэффициент полезного действия  $\eta = 14\%$  и  $P_{opt}^* = 191 Bm/m^2$ , однако из-за массы кристалла  $m_k = 0,56 г$  при его толщине 300 мкм (табл. 1) массомощностная характеристика ФП не превышает  $P_{opt}^{**} = 273 Bm/kg$ .

Для ФП № Т1Б (Т – текстурированная фронтальная поверхность, Б – базовая технология изготовления  $n^+$ -слоя) наблюдается катастрофическое возрастание диодного тока ( $J_0 > 10^{-7} A/cm^2$ ,  $A = 1,89$ ), которое связано в основном с резким усилением рекомбинационных процессов в обедненной области  $n^+$ -р гомоперехода ( $J_{O2} > 10^{-6} A/cm^2$ ), а также увеличение на порядок последовательного сопротивления и уменьшение в 3,5 раза шунтирующего сопротивления

(см. табл. 2). При сниженной примерно на 14 % плотности фототока это приводит к  $J_{КЗ} \approx 33 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{ХХ} = 454 \text{ мВ}$ ,  $FF = 0,31$ ,  $J_{ОПТ} \approx 20 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{ОПТ} = 240 \text{ мВ}$ , что обуславливает  $P_{онт}^* < 50 \text{ Вт/м}^2$  и  $\eta < 4 \%$ . Поэтому, несмотря на уменьшение толщины кристалла с 300 мкм до 220 мкм и соответственно его массы до  $m_K = 0,41 \text{ г}$ ,  $P_{онт}^{**}$  оказывается менее  $100 \text{ Вт/кг}$ . Аномальные значения диодных параметров, обнаруженные при исследовании ФП категории Т1Б и привели к выводу о существенной неоднородности толщины  $p^+$ -слоя из-за недостаточной толщины пленки ЖРК.

Как видно из табл. 1 и 2, ФП № Т1Б и № Т2М<sub>1</sub>, имеющие одинаковые значения  $t_K = 220 \text{ мкм}$ , существенно различаются по исследованным параметрам. Так, у ФП № Т2М<sub>1</sub> величина  $R_{Ш}$  примерно в 2,5 раза выше, а  $R_{П}$  в 8,5 раза ниже, что при меньшем почти на пять порядков значении  $J_0$  и повышенной на  $1 \text{ мА/см}^2$  величине  $J_{Ф}$  приводит к  $J_{КЗ} \approx 37 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{ХХ} = 614 \text{ мВ}$ ,  $FF = 0,72$ ,  $J_{ОПТ} \approx 33 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{ОПТ} \approx 490 \text{ мВ}$ . При  $\eta = 11,9 \%$  это обуславливает  $P_{онт}^{**} = 314 \text{ Вт/кг}$ , что превосходит (примерно в 3,5 раза) соответствующий параметр не только по сравнению с ФП № Т1Б, но и с ФП № П1Б (почти на 15 %).

Однако первый вариант модернизации технологии изготовления  $p^+$ -слоя оказался недостаточно оптимальным. При уменьшении  $t_K$  до 200 мкм (ФП № Т3М<sub>1</sub>) плотность фототока таких ФП снижается примерно на  $2 \text{ мА/см}^2$ , а величина  $J_0$  возрастает в два раза. Указанные изменения являются основной причиной снижения КПД при практически сохраняющемся значении  $P_{онт}^{**}$ . Поскольку уменьшение  $t_K$  при используемом способе утонения кремниевых пластин сопровождается усилением амплитуды рельефа текстурируемой поверхности, отмеченные обстоятельства мы связываем с тем, что в случае  $t_K = 0,2 \text{ мкм}$  отдельные наиболее высокие покатые участки этой поверхности, расположенные преимущественно в областях, не затронутых фронтальной металлизацией, остаются не покрытыми пленкой ЖРК. Увеличение  $t_K$  до 0,3 мкм при  $t_K = 190\text{-}210 \text{ мкм}$  (ФП № Т4М<sub>2</sub> и № Т5М<sub>2</sub>) приводит к возрастанию  $J_{Ф}$  до  $37\text{-}38 \text{ мА/см}^2$ , снижению плотности диодного тока насыщения до  $J_0 \approx 10^{-11} \text{ А/см}^2$ , что при  $R_{Ш}$  и  $R_{П}$ , приближающихся по величине к соответствующим параметрам для ФП № П1Б, обуславливает достижение  $36 < J_{КЗ} < 38 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{ХХ} = 614\text{-}616 \text{ мВ}$ ,  $FF = 0,71\text{-}0,73$ ,  $J_{ОПТ} \approx 33 \text{ мА/см}^2$ ,  $U_{ОПТ} \approx 500 \text{ мВ}$ . При  $\eta = 12 \%$  это обуславливает  $P_{онт}^{**} = 336\text{-}371 \text{ Вт/кг}$ , что превосходит соответствующий параметр для ФП № П1Б на 23-36 %.

В результате применения химико-динамической полировки, доработки технологических процессов формирования металлических электродов и формирования изолирующих канавок получены тонкие ФП (200 мкм) с довольно близкими к базовым ФП выходными параметрами:  $I_{КЗ} = 320 \text{ мА}$ ;  $J_{КЗ} = 40 \text{ мА/см}^2$ ;  $U_{ХХ} = 0,621 \text{ В}$ ;  $U_{онт} = 0,488 \text{ В}$ ;  $FF = 0,76$ ;  $I_{онт} = 309 \text{ мА}$ ;  $J_{онт} = 38,6 \text{ мА/см}^2$ ;  $P_{онт}^* = 188 \text{ Вт/м}^2$ , откуда следует, что массомощностная характеристика этих фотопреобразователей  $P_{онт}^{**} = 403 \text{ Вт/кг}$ , т. е. при близких значениях фотоэлектрических и выходных параметров массомощностная характеристика по сравнению с базовыми ФП улучшена на 48 %.

В заключение следует отметить, что изменение конструкции и технологического маршрута изготовления ФП неоднозначно влияет на его параметры и характеристики. С одной стороны, уменьшение толщины ФП приводит к снижению эффективности фотопреобразования, а с другой, – создание на фронтальной поверхности текстуры увеличивает коэффициент поглощения солнечного излучения, что в свою очередь приводит к повышению выходных параметров.

Установлено, что совместное применение этих решений при выборе условий процесса травления, для которых утонение кремниевых пластин сопровождается текстурированием только одной из поверхностей, при модернизации диффузионных процессов легирования из ЖРК обеспечивает для тонких ФП с текстурированной поверхностью выходные параметры,

близкие к параметрам базовых, а массопрочностные характеристики лучше, чем у базовых, на  $\sim 30 \div 48 \%$ .

На основе проведенных разработок предполагается дальнейшее усовершенствование КТР текстурированных тонких ФП, которые в первую очередь связаны с применением вместо спонтанной текстуры фронтальной поверхности упорядоченной текстуры с геометрией перевернутых пирамид и с использованием эффекта тыльного рефлектора.

**Список литературы:** 1. *Pes P.* From Vanguard to Pathfinder: forty years of solar cells in space // 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria. 1998. P. 67-72. 2. *Листратенко А.М.* Исследование и разработка малозатратной технологии изготовления высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей космического применения // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2001. Вып. 121. С. 121-125. 3. *Колтун М.М.* Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. 280 с. 4. *The range of high efficiency silicon solar cells fabricated at Fraunhofer ISE* // S.W. Glunz, J. Knobloch, C. Hebling, W. Wettling // 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference. Anaheim, CA. 1997. P. 231-237. 5. *Физико-технологические особенности формирования тыльноконтактных фотопреобразователей* / В.А. Антонова, В.Н. Борщев, В.Р. Копач, А.М. Листратенко, Н.И. Слипченко, И.Т. Тымчук // Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2004. Вып. 137. С. 148-152. 6. *Möller H.J.* Semiconductors for solar cells. Boston: Artech House, 1993. 375 p. 7. *Simple and fast extraction technique for the parameters in the double exponential model for the I-V characteristic of solar cells* / E. Van Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens // 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference. Barcelona, Spain. 1997. P 2438-2441.

*Харьковский ГП НИТИ Приборостроения,  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники,  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»*

*Поступила в редколлегию 09.09.2004*