

*В.А. АНТОНОВА, канд. техн. наук, В.Н. БОРЩЕВ, д-р. техн. наук,
В.Р. КОПАЧ, канд. техн. наук, Н.П. КЛОЧКО, канд. техн. наук, А.М. ЛИСТРАТЕНКО,
Е.В. РОГОЖКИН, д-р. физ.-мат. наук, Н.И. СЛИПЧЕНКО, канд. техн. наук, И.Т. ТЫМЧУК*

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Среди большого количества различных энергетических проектов значимое место занимает гелиоэнергетика, основными аргументами в пользу которой являются экологическая безопасность, практическая неисчерпаемость источника, возможность применения как в космосе, так и на Земле. Однако кажущаяся простота преобразования солнечной энергии в электрическую с использованием фотоэффекта на p-n-переходе скрывает существенные технологические сложности при создании фотопреобразователей (ФП), в силу чего коэффициент полезного действия (КПД) реального ФП не превышает 17-20%. Широкое использование ФП в силовой энергетике сдерживается их низким КПД и, соответственно, высоким уровнем стоимости одного ватта генерируемой мощности. В связи с этим актуальными являются исследования влияния конструктивно-технологических факторов на максимальную мощность, выделяемую ФП на согласованную полезную нагрузку.

Украина обладает мощной промышленностью по производству полупроводниковых материалов, приборов и изделий микроэлектроники. Работы по совершенствованию конструкторско-технологических решений (КТР) фотопреобразователей космического назначения (ФПКН) проводятся Государственным предприятием Научно-исследовательский технологический институт приборостроения (ГП НИТИП, г. Харьков), Харьковским национальным университетом радиоэлектроники (ХНУРЭ), Национальным техническим университетом „Харьковский политехнический институт”. В конечном счете это привело к созданию и внедрению базового варианта серийноспособной технологии изготовления радиационностойких ФПКН со структурой n^+p-p^+ типа для комплектации солнечных батарей украинских космических аппаратов серии „Микроспутник” [1-5].

В качестве исходных полупроводниковых пластин для таких ФПКН применяется монокристаллический кремний марки КДБ-10, выращенный методом Чохральского. Структуры изготовлены с использованием процессов одновременной комбинированной диффузии из жидкорастворных композиций (ЖРК) и твердых источников и процессов внешнего геттерирования. С целью минимизации потерь солнечного излучения, связанных с рекомбинацией на фронтальной поверхности, со стороны фронтальной поверхности n^+ -слой пассивирован термическим тонким (10-15нм) окисным слоем в окнах между металлическими полосками токосъемного контакта. Поверх SiO_2 из жидкорастворной композиции нанесено просветляющее покрытие, материалом которого является TiO_2 . Слои металлизации для фронтального и тыльного токосъемных электродов выполнены, соответственно, на основе Ti/Al и Al . При $25^\circ C$ и режиме облучения АМ0 [6] образцы кремниевых ФПКН с габаритными размерами $46,05 \times 15,20 \times 0,35$ мм, изготовленные в условиях экспериментального производства ГП НИТИП согласно

базовому варианту разработанной технологии, имеют следующие выходные параметры [5]: напряжение холостого хода $U_{xx} \approx 0,60\text{В}$, плотность тока короткого замыкания $j_{кз} = 39\text{--}40\text{мА/см}^2$, коэффициент заполнения нагрузочной световой вольтамперной характеристики $FF = 0,73\text{--}0,75$, максимальная выходная мощность $P_{ном} \approx 170\text{--}180\text{Вт/м}^2$. Применение ГП НИТИП усовершенствованной технологии [7], позволяющей реализовать специфический „клювообразный” концентрационный профиль атомов фосфора в диффузионном p^+ -слое у фронтальной поверхности ФПКН, обеспечивает параметры: $U_{xx} = 0,61\text{--}0,62\text{В}$, $j_{кз} = 40\text{--}42\text{мА/см}^2$, $FF = 0,75\text{--}0,78$ и $P_{ном} \approx 185\text{--}200\text{Вт/м}^2$. Вместе с тем для лучших зарубежных аналогов ФПКН при указанных выше условиях аттестации КПД = 17,4–18,3%, $P_{ном} \approx 235\text{--}245\text{Вт/м}^2$, что обусловлено повышенными значениями остальных выходных параметров: $U_{xx} = 0,63\text{--}0,65\text{В}$, $j_{кз} = 48\text{мА/см}^2$, $FF = 0,77\text{--}0,79$ [8]. Приведенное сопоставление выходных параметров указывает на потенциальную возможность существенного повышения эффективности работы отечественных ФПКН.

Как следует из количественных соотношений соответствующих параметров, определяющих величину $P_{ном}$, наиболее сильно в процентном отношении различаются значения $j_{кз}$, в то время как параметры U_{xx} и FF различаются незначительно. Согласно [9] указанное сочетание отличий обусловлено пониженной плотностью фототока $j_{ф}$ наряду с большей затененностью β освещаемой поверхности фронтальным электродом, а также с повышенными значениями диодных параметров (плотности диодного тока насыщения j_0 , коэффициента идеальности диода A и последовательного сопротивления R_p).

Анализ состояния проблемы позволил сделать вывод о том, что, несмотря на существенный прогресс в области создания фотопреобразователей, предельные возможности ФП на основе монокристаллического кремния далеко не реализованы. С привлечением современных наиболее передовых концепций [8,10], относящихся к проблеме повышения КПД и $P_{ном}$ за счет увеличения $j_{ф}$ и снижения β , j_0 , A , R_p , а также результатов собственных исследований в данном направлении [1-5,7] при разработке перспективных КТР для ФПКН были поставлены следующие задачи:

- увеличение составляющей фототока, генерированного как в базовой области, так и в легированном p^+ -слое;
- снижение рекомбинационных потерь на фронтальной поверхности p^+ -слоя;
- уменьшение сопротивления растекания R_p , сопротивления металлизации R_m для снижения последовательного сопротивления фронтального токосъемного электрода;
- оптимизация геометрии фронтальной контактной гребенки и снижение величины β .

При поэтапном решении этих задач для увеличения составляющей фототока, генерированного в базовой области, в технологический маршрут был включен процесс внешнего геттерирования [3,4]. Для увеличения составляющей фототока, генерированного в легированном слое, использованы процессы двухэтапной диффузии, обеспечивающие специфический „клювообразный” профиль распределения примеси со стороны фронтальной поверхности [7]. Благодаря такому концентрационному профилю уменьшается вклад легированного слоя непосредственно под контактной гребенкой в R_p

без возрастания скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда (особенно по механизму Оже), что способствует повышению фоточувствительности ФП в коротковолновой области солнечного излучения.

Ниже изложены результаты исследований, связанных с дальнейшей оптимизацией конструкции и технологии изготовления ФПКН.

Прежде всего исследована проблема корректировки спектрального состава излучения, поступающего на фронтальную поверхность базового кристалла ФПКН. Как известно [6,9], потери солнечной энергии (~50% от поступающей на поверхность ФП) обусловлены отражением света от поверхности ФП, прохождением через базовый кристалл фотонов с энергией $h\nu < \Delta E_0$ (h – постоянная Планка, ν – частота излучения, ΔE_0 – ширина запрещенной зоны кремния), не сопровождающимся генерацией электронно-дырочных пар, а также фотоактивным поглощением фотонов с $h\nu > \Delta E_0$, сопровождающимся последующей рекомбинацией на фронтальной поверхности и термализацией в объеме кремния генерированных этими фотонами горячих носителей заряда. При этом около 29% потерь энергии приходится на фотоны с $h\nu > \Delta E_0$. Разработка отечественных ФПКН осуществляется, в первую очередь, согласно КТР, обеспечивающим частичное снижение первого из перечисленных выше видов потерь за счет оптимизации просветляющих покрытий [1,3,4].

Реализуемая в ГП НИТИП жидкорастворная технология нанесения TiO_2 , подобная одной из описанных в [11], позволяет легко управлять толщиной просветляющего покрытия из этого материала на поверхности n^+ -Si в диапазоне от 0,04-0,05 до 0,2мкм. При однократном нанесении центрифугированием (2000-3000 оборотов в минуту) 10%-го раствора тетрабутилоксититана в изопропиловом спирте и последующей термообработке пленка TiO_2 имеет толщину 0,04-0,05мкм, удельное сопротивление 10^{11} Ом·см, относительную высокочастотную диэлектрическую проницаемость 4-5, плотность поверхностных состояний 10^{11} - 10^{12} см⁻²эВ⁻¹, плотность полного заряда на границе раздела $(1-6) \cdot 10^{-7}$ Кл/см². Для устранения обнаруженных токов утечки в слое TiO_2 и уменьшения плотности заряда на поверхности раздела “Si-просветляющее покрытие” до $(1-6) \cdot 10^{-8}$ Кл/см² использовано введение термически выращенного подслоя SiO_2 толщиной около 0,01мкм.

Исследования зависимости коэффициента отражения R от длины волны света λ для ФПКН с просветляющим покрытием TiO_2 толщиной 0,07-0,09мкм показали, что минимальное значение $R(\lambda) \approx 3-4\%$ достигается при управлении спектральным положением этого значения в диапазоне $0,55 < \lambda < 0,73$ мкм за счет толщины слоя TiO_2 . Расчетным путем по зависимости минимума $R(\lambda)$ от толщины слоя TiO_2 было установлено, что коэффициент преломления последнего $n \approx 2,0 \div 2,1$.

В настоящее время при достигнутом для отечественных ФПКН значениях КПД и $R_{ном}$ наряду с дальнейшей оптимизацией просветления крайне актуальным становится снижение потерь солнечной энергии, обусловленных фотонами $h\nu > \Delta E_0$. Концепция разработки для решения данной задачи состоит в использовании эффекта фотолюминесценции [12] для подгонки спектрального состава излучения на поверхности просветляющего покрытия к максимуму чувствительности ФПКН и в оптимизации

толщины однослойного просветляющего покрытия или двухслойного просветляющего покрытия, например, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, TiO_2/ITO , с учетом модифицированного спектрального состава излучения.

Для ФП на основе монокристаллического кремния р-типа максимум спектральной чувствительности располагается, как правило, в области $0,7 < \lambda < 1,0 \text{ мкм}$ [5,6,12]. В данном случае для реализации описанного выше способа подгонки спектрального состава излучения к максимуму спектральной чувствительности ФП, согласно [12], подходящими могут оказаться ионы Yb^{3+} , поглощающие фотоны из спектральных полос с максимумами при $\lambda=0,28 \text{ мкм}$ или $\lambda=0,36 \text{ мкм}$, а испускающие излучение с максимумом при $\lambda=0,7 \text{ мкм}$. Более того, оптимальным является использование не одного вида центров фотолюминесценции, а такого их ассортимента, который позволил бы с максимально возможной эффективностью преобразовать большую часть спектральной области солнечного излучения, соответствующую $h\nu > \Delta E_0$, в излучение с узким диапазоном значений λ , лежащих как можно ближе к максимуму λ_{max} внутренней спектральной чувствительности (со стороны $\lambda \leq \lambda_{\text{max}}$) разрабатываемых ФПКН. Центры фотолюминесценции можно ввести в наружное защитное покрытие из Al_2O_3 или из оптического кварцевого стекла. Прорабатывается и другой вариант корректировки спектрального состава излучения, состоящий в использовании органических люминофоров [13], с помощью которых значительно легче обеспечить требуемый спектральный состав излучения. В данном случае оптически прозрачная среда, содержащая люминесцентные центры необходимого ассортимента, может помещаться между наружным защитным покрытием с добавкой ионов Yb^{3+} и просветляющим покрытием.

Для решения второй проблемы – существенного снижения рекомбинационных потерь на фронтальной поверхности p^+ -слоя – предполагается применять ее пассивирование путем смачивания на протяжении нескольких секунд в 0,1М-водном растворе KCN, последующего кипячения в воде в течение 10 минут и окисления при 450°C . Наличие тонкого пассивирующего слоя термического окисла SiO_2 на поверхности p^+ -Si фотопреобразователей, изготовленных в ГП НИТИП, обеспечивает лишь частичное снижение рекомбинационных потерь неосновных носителей заряда, генерируемых из коротковолновой области солнечного спектра. Остаточная плотность N_s поверхностных состояний на границе раздела p^+ -Si/ SiO_2 продолжает выступать одной из причин сниженной величины $j_{\text{ф}}$ и повышенной величины j_0 . Уменьшение N_s на межфазной поверхности может быть достигнуто за счет насыщения оборванных валентных связей в кремнии группами CN [14].

Заметим, что система Si-O-C-N перспективна не только для снижения рекомбинационных потерь на фронтальной поверхности слоя p^+ -Si. Пленки переменного состава на основе этой системы с коэффициентом преломления, увеличивающимся в направлении от их внешней поверхности к границе раздела со слоем p^+ -Si, могут быть использованы и как высокоэффективные просветляющие покрытия, снижающие интегральный коэффициент отражения в диапазоне длин волн 0,4-1,1 мкм до значений ниже 3,3%, а в диапазоне 0,60-0,95 мкм – до значений ниже 1,8% [15].

Для комплексного решения проблемы уменьшения последовательного сопротивления ФПКН ($R_{\text{п}} \approx R_{\text{р}} + R_{\text{м}}$), снижения затенения фронтальной поверхности и повышения технологичности сборки модулей солнечных батарей из ФПКН прямоугольной формы наиболее предпочтительной является гребенчатая геометрия фронтального токосъемного электрода, обсуждавшаяся ранее в [7]. Однако расчет оптимальных размеров фронтального токосъемного электрода, выполненный в [7] согласно известной методике [16], базировался на комбинации исходных данных о ФПКН, которая отличается от реальных параметров ФП, разработанных и изготовленных в ГП НИТИП на современной стадии совершенствования их КТР. Так, в [7] ширина t параллельных полос гребенчатого электрода задана равной 0,1мм. Предполагалось, что ширина W шины гребенки, перпендикулярной полосчатым элементам и соединяющей их концы вдоль одной из больших сторон прямоугольного ФП, имеет ту же величину, что и t . Поверхностное сопротивление R_{s} для n^+ -слоя принималось равным 15 Ом/кв, в то время, как плотность фототока $j_{\text{ф}}$ отождествлялась с $j_{\text{кз}} = 40 \text{ мА/см}^2$, а $j_0 = 10^{-12} \text{ А/см}^2$ при коэффициенте идеальности диода $A = 1$.

В настоящее время реализована возможность изготовления гребенчатого электрода с $t = 0,04 \text{ мм}$ и $W = 0,4 \text{ мм}$, достигнуто воспроизводимое значение $j_{\text{кз}} = 42 \text{ мА/см}^2$, однако при $R_{\text{s}} = 50 - 100 \text{ Ом/кв}$, $j_0 = 10^{-10} \text{ А/см}^2$ и $A = 1,2$. Результаты расчета параметров гребенчатого токосъемного электрода для ФП с размерами $24 \times 15 \text{ мм}$ приведены в таблице. Параметры рассчитаны по методике [16] при $j_{\text{кз}} = 42 \text{ мА/см}^2$, $T = 300 \text{ К}$ для различных комбинаций j_0/A и R_{s} . Здесь: $l_1 = l + t$ – период гребенки фронтального токосъемного электрода (l – расстояние между внутренними сторонами параллельных полосчатых элементов); N – количество полосчатых элементов; δ – расстояние от наружных крайних полосок гребенки до меньших сторон ФП.

$j_0/A, \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$	$10^{-10}/1,2$		$10^{-11}/1,1$		$10^{-12}/1,0$	
$R_{\text{s}}, \text{ Ом/кв}$	50	100	50	100	50	100
$l_1, \text{ мм}$	2,37	1,88	2,40	1,90	2,40	1,90
$N, \text{ шт}$	10	13	10	13	10	13
$\delta, \text{ мм}$	1,32	0,70	1,18	0,58	1,18	0,58
$R_{\text{р}}, \text{ Ом}$	0,076	0,090	0,077	0,090	0,077	0,090

Данные таблицы определяют оптимальные значения l_1 , N и δ при указанных размерах ФПКН, а также $t = 0,04 \text{ мм}$ и $W = 0,4 \text{ мм}$, на стадиях разработки, соответствующих достижению более низких значений j_0 и A . При всех значениях l_1 и N затенение освещаемой поверхности ФП гребенчатым фронтальным электродом, рассчитанное по отношению площади этого электрода к площади освещенной поверхности, не превышает 4,8%.

Сопротивление растекания $R_{\text{р}}$ при длине полосчатых элементов $l_2 = 14,5 \text{ мм}$ рассчитано по формуле [16]:

$$R_{\text{р}} = \left\{ 1 / [12(N - 1)] \right\} R_{\text{s}} l_1 / l_2.$$

Из таблицы видно, что $R_{\text{р}} \leq 0,09 \text{ Ом}$. В пересчете на единицу поверхности ФПКН удельное сопротивление растекания $\sim 0,32 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, что не превышает критериального

значения $R_{\text{пкр}}^* = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ [9], на котором при облучении в режиме АМ0 теряется не более 3% полной электрической мощности, вырабатываемой фотопреобразователем.

Реальные значения $R_{\text{п}}$ разработанных в ГП НИТИП фотопреобразователей составляют $\sim 2,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ при толщине алюминиевой металлизации $h=1\text{мкм}$ и $\sim 1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ при $h=2\text{мкм}$. Таким образом, величина $R_{\text{п}}$ исследованных ФПКН практически полностью определяется сопротивлением металлизации $R_{\text{м}}$ гребенчатого электрода. Для исключения влияния $R_{\text{м}}$ на величину $R_{\text{п}}$ толщину алюминиевой металлизации следует увеличить до $\sim 5\text{мкм}$.

В последнее время в конструкции солнечных батарей широкое распространение получил модульный подход [17]. В качестве перспективного КТР нами предложена конструкция модуля ФПКН на алюминий-полиимидном носителе для отечественных батарей фотопреобразователей космических аппаратов (БФ КА), в состав которого входят 10 ФП (2 группы соединенных параллельно, по 5 ФП в каждой, соединенных последовательно). При модульной конструкции солнечных батарей повышается ее надежность, создаются обходные параллельные цепи для прохождения тока при отказе типа „обрыв”, происходящего у одного или нескольких ФП вследствие механических повреждений, отслоения контактов или неисправностей в межэлементных соединениях.

В условиях АМ0 и при температуре 25°C разработанная нами группа из 5 ФП обеспечивает $I_{\text{опт}}=260\text{мА}$, $U_{\text{опт}}=2,5\text{В}$, $U_{\text{хх}}=3,15\text{В}$, $I_{\text{кз}}=275\text{мА}$, $P_{\text{ном}}=182\text{Вт}/\text{м}^2$. Вольтамперная характеристика разработанной группы приведена на рисунке.

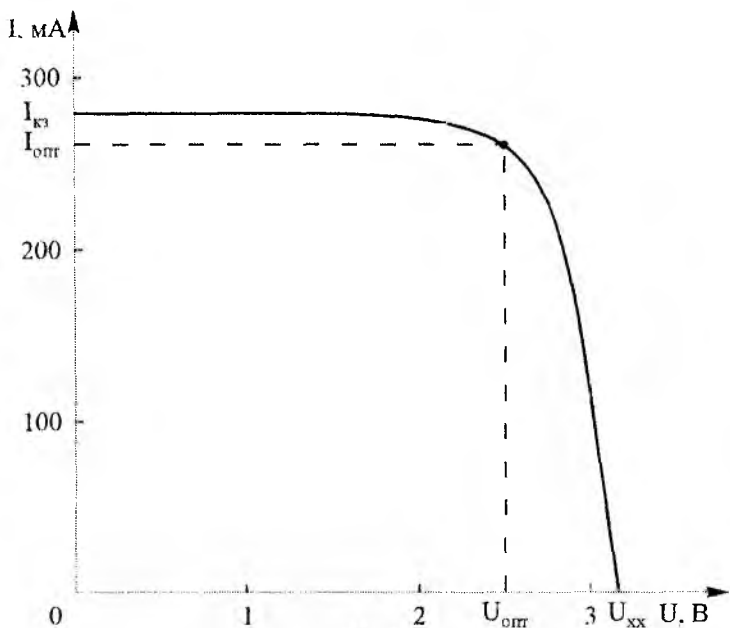


Рис. 1

Разработанная конструкция модуля имеет достаточно высокие массогабаритные показатели: коэффициент заполнения модуля не менее 0,95, вес модуля без защиты $0,5\div 0,8\text{кг}/\text{м}^2$, габаритные размеры модуля $46,5\times 80,2\text{мм}$ (при размерах отдельного ФП $46,05\times 15,20\text{мм}$), вес полиимидного носителя 0,35г.

В заключение следует отметить, что, исходя из сложившихся к настоящему времени физических представлений о зависимости выходных параметров от фототока и диодных параметров ФП, а также из опыта ГП НИТИП по разработке при-

боров рассматриваемого типа, предложены наиболее рациональные пути дальнейшего повышения эффективности работы ФП в режиме АМ0.

Список литературы: 1. Антонова В.А., Листратенко А.М., Слипченко Н.И. Высокоэффективные солнечные элементы на основе жидкорастворной технологии // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып.115. С. 90-94. 2. Зависимость электрических параметров и спектрального отклика кремниевых фотопреобразователей от условий диффузионного легирования и морфологии поверхности их базовых кристаллов / В.Р. Копач, А.М. Листратенко, Г.С. Хрипупов, Е.П. Черных // Вестник Харьк. гос. политехн. ун-та (Новые решения в современных технологиях). 1998. Вып.17. С. 76-77. 3. Твердотельные солнечные фотопреобразователи на основе жидкорастворных композиций / В.А. Антонова, А.М. Листратенко, Б.И. Макаренко, Н.И. Слипченко // Технология приборостроения. 1999. №3. С. 54-57. 4. Листратенко А.М. Исследование и разработка малозатратной технологии изготовления высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей космического применения // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып.121. С. 121-125. 5. Gorban A.P., Kostylev V.P., Borschev V.N., Listratenko A.M. State and prospects of a development of silicon photoconductors and batteries for the space use // Telecommunications and Radio Engineering. 2001. V.55. №9. P. 94-100. 6. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985. 200с. 7. Оптимизация кремниевых солнечных элементов на основе n^+-p-p^+ -структур / В.А. Антонова, В.Н. Борщев, В.А. Золотарев, А.М. Листратенко, Н.И. Слипченко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып.120. С. 155-161. 8. Crotty G.T., Verlinder P.J., Cudzinovic M., Swanson R.M. and Crane R.A. 18,3% efficient solar cells for space applications // 26th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Anaheim, C.A. 1997. P.1035-1038. 9. Фаренбрух А. Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.: Энергоиздат. 1987. 280с. 10. Development of high end-of-line efficiency silicon space solar cell / Tomomura Y., Washio H., Nakamura K., Kawano K., Kaneiwa M., Saga T., Matsutani T., Aburaya T., Hisamatsu T. and Matsuda S. // 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria. 1998. P.3511-3514. 11. Сауйковская Н.В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок. Л.:Химия, 1971. 200с. 12. Kawano K., Sado T., Nishikawa M. and Nakata R. Conversion efficiency of solar cell with ion-implanted rare earth into anti-reflection film // 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria. 1998. P. 334-357. 13. Красовицкий Б.М. Органические люминофоры и их применение // Функциональные материалы для науки и техники / Под ред. В.П. Семиноженко. Харьков: „Институт монокристаллов”, 2001. С. 338-354. 14. Kobayashi H., Asano A., Asada S., Kanazaki E., Nakato Y., Yoneda K., Todokoro Y. Decrease in the interface state density by cyanide treatments and improvement of electrical characteristics of <ITO/Silicon Oxide/n-Si> solar cells // 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria. 1998. P. 1456-1459. 15. Faur M., Faur M., Bailey S.G., Flood D.I., Brinker D.I., Faur H.M., Alterovitz S.A., Wheeler D.R., Boyd D.L. Room temperature wet chemical growth of passivating /antireflections coating for Si-based solar cell // 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria. 1998. P. 1574-1578. 16. А.М. Васильев, А.П. Ландсман Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 248 с., 17. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1983. 360с.

Харьковский ГП НИТИ Приборостроения
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
Национальный технический университет
„Харьковский политехнический институт”

Поступила в редколлегию 20.03.2002