

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С БАЗОВОЙ *p-i-n* СТРУКТУРОЙ

Л. П. Шуба¹, М. В. Кириченко¹, В. Р. Копач¹, В. А. Антонова², А. М. Листратенко²

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
21, ул. Фрунзе, г. Харьков, 61002, Украина

E-mail: Lshuba@mail.ru

²Государственное предприятие

«Научно-исследовательский технологический институт приборостроения»,
40/42, ул. Примакова, г. Харьков, 61010, Украина

Изготовлены и исследованы тестовые образцы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с *p-i-n* структурой на основе очень слабо легированных фосфором кристаллов кремния (*i(n)*-типа проводимости толщиной около 300 мкм с удельным сопротивлением 4000 Ом см. Слои *p*- и *n*-типа толщиной 1,5 мкм с концентрацией бора и фосфора $\sim 10^{20}$ см⁻³ соответственно образованы согласно технологии, используемой в серийном производстве отечественных монокристаллических Si-ФЭП. Плотность фототока $J_{\text{ф}}$, выходные и диодные параметры ФЭП определялись по нагрузочным световым вольт-амперным характеристикам, измеренным при 25 °С в условиях заатмосферного солнечного излучения (режим AM0 - атмосферная масса равна нулю). Обнаруженное значение $J_{\text{ф}} = 48,6$ мА/см² является рекордным для отечественных монокристаллических Si-ФЭП, что обуславливает целесообразность разработки серийных Si-ФЭП с *p-i-n* структурой. Изучено влияние слабоконцентрированного излучения на эффективность работы ФЭП такого типа. Обоснованы предложения по усовершенствованию конструкции Si-ФЭП с *p-i-n* структурой, обеспечивающему увеличение их КПД до 20%. Ил. 5. Табл. 3. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, *p-i-n* структура, КПД.

В настоящее время фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной энергии находят широкомасштабное применение для энергообеспечения космических аппаратов и автономного питания разнообразных наземных электронных устройств. К современным ФЭП предъявляются следующие требования: высокая эффективность работы; технологичность и относительно низкая стоимость изготовления; а также надлежащая радиационная стойкость. Такие характеристики присущи лучшим зарубежным ФЭП на основе монокристаллического кремния, КПД которых достигает $\sim 20\%$ [1,2]. Однако серийные ФЭП отечественного производства не отвечают в полной мере приведенным выше требованиям (КПД приборов на основе монокристаллического кремния марки КДБ-10 с *n⁺-p* гомопереходом составляет 13-14% при 25°C в условиях заатмосферного солнечного излучения - режим AM0 - атмосферная масса равна нулю), а поэтому остаются низкорентабельными для широкомасштабного космического и наземного применения [3]. Указанное побуждает разработчиков постоянно совершенствовать конструктивно-технологическое решение отечественных ФЭП на основе монокристаллического кремния.

Ключевой причиной сложившейся ситуации является различие в плотностях фототока $J_{\text{ф}}$ таких ФЭП: 40-42 мА/см² у отечественных и 48-49 мА/см² у зарубежных. Так как одним из радикальных способов увеличения $J_{\text{ф}}$ является повышение времени жизни неосновных носителей заряда в базовом полупроводниковом слое ФЭП, которое, как известно, растет со снижением кон-

центрации легирующей примеси, целесообразным представляется исследование возможности разработки высокоэффективных кремниевых ФЭП с базовой *p-i-n* структурой. Указанные обстоятельства инициировали проведение настоящих исследований.

1. Объекты исследования. В работе исследовались тестовые образцы фотоэлектрических преобразователей с *p-i(n)-n* структурой, изготовленные Государственным предприятием «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения» (ГП НИТИП, г. Харьков) на основе кристаллов кремния *n*-типа проводимости, характеризующихся удельным сопротивлением 4000 Ом см, ориентацией (100) и толщиной 300 мкм. Схематическое изображение конструкции исследуемых ФЭП приведено на рис. 1.

Суммарная площадь фотоприемной поверхности составляет 100 мм². Со стороны фронтальной фотоприемной поверхности расположены диффузионные *p⁺*-слои толщиной 1,5 мкм с концентрацией акцепторной примеси $N_a = 6 \cdot 10^{19}$ см⁻³, выполненные в виде замкнутой решетки, имеющей шаг 100 мкм. Всего на фронтальной поверхности в составе указанной решетки присутствует 100 таких полос шириной 50 мкм. Эти полосы электрически связаны между собой диффузионным кольцом шириной 200 мкм. От периферийного *p⁺*-кольца фотоприемной области на расстоянии 50 мкм расположено охранное полевое кольцо шириной 50 мкм. Фотоприемная поверхность вместе с охранным полевым кольцом окружена стопорным противоионверсионным кольцом *n⁺*-типа шириной 1000 мкм, которое отстоит от охранный полевого

кольца на 200 мкм. На тыльной поверхности структуры расположены диффузионные n^+ -слои толщиной 1,5 мкм с концентрацией донорной примеси $N_d = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, выполненные также, как и p^+ -слои, но развернутые относительно последних под углом 90° . Поверх p^+ -колец и n^+ -областей нанесены пленочные металлические электроды.

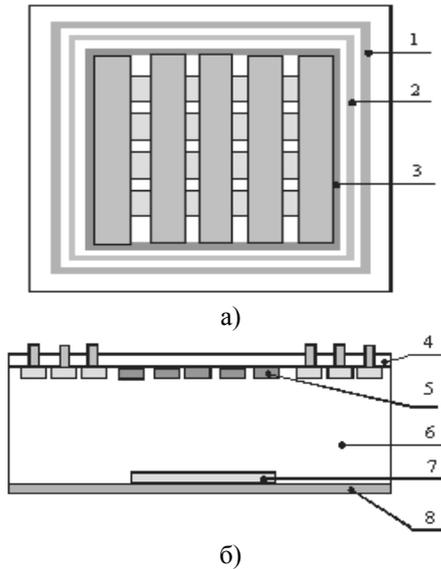


Рис. 1. Схематическое изображение фронтальной поверхности (а) и сечения, перпендикулярного этой поверхности (б) тестовых образцов ФЭП: 1 - стопорное противоионное кольцо n^+ -типа проводимости, покрытое слоем металлизации; 2 - периферийное охранное кольцо p^+ -типа проводимости, покрытое слоем металлизации; 3 - диффузионное кольцо p^+ -типа проводимости, покрытое слоем металлизации; 4 - просветляющее покрытие; 5 - диффузионный слой кремния p^+ -типа проводимости толщиной 1,5 мкм; 6 - монокристаллический кремний i -типа проводимости; 7 - диффузионный слой кремния n^+ -типа проводимости толщиной 1,5 мкм; 8 - пленочный сплошной металлический электрод толщиной 1 мкм

2. Параметры ФЭП в режиме облучения АМ0. Определение плотности фототока J_ϕ , выходных параметров (плотности тока короткого замыкания $J_{кз}$; напряжения холостого хода $U_{хх}$; фактора заполнения FF нагрузочной световой вольт-амперной характеристики (НС ВАХ); максимальной электрической мощности, выделяемой в нагрузку $P_{нм}$; коэффициента полезного действия η) и диодных параметров (плотности диодного тока насыщения J_0 ; последовательного сопротивления R_p ; шунтирующего сопротивления $R_{ш}$; коэффициента идеальности диода A); исследованных ФЭП проводилось путем измерения и последующей аналитической обработки НС ВАХ.

Экспериментальные НС ВАХ приведены на рис. 2. Выходные и диодные параметры исследованных ФЭП в режиме облучения АМ0 при температуре 25°C представлены в табл. 1.

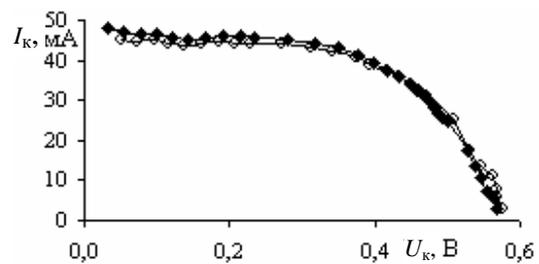


Рис. 2. Экспериментальные НС ВАХ тестовых образцов ФЭП: \bullet - №1; \circ - №2

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, с очевидностью указывает на следующую тенденцию зависимости их КПД от плотности фототока и диодных параметров: КПД увеличивается с ростом J_ϕ и $R_{ш}$, и с уменьшением J_0 и R_p .

Таблица 1

Плотность фототока, выходные и диодные параметры тестовых образцов ФЭП, рассчитанные по приведенным на рис. 2 НС ВАХ

Образцы ФЭП	J_ϕ , mA/cm^2	$J_{кз}$, mA/cm^2	$U_{хх}$, мВ	FF , отн. ед.	$P_{нм}^*$, Вт/кг	$P_{нм}$, Вт/м ²	η , %	J_0 , A/cm^2	A , отн. ед.	R_p^* , Ом·см ²	$R_{ш}^*$, Ом·см ²
№ 1	48,6	47,8	581	0,56	224	156	11,5	$5,0 \cdot 10^{-7}$	2	1,7	99
№ 2	45,4	45,1	588	0,60	226	158	11,6	$4,6 \cdot 10^{-7}$	2	1,7	251

Как видно из табл. 1, исследованные тестовые образцы ФЭП имеют весьма высокие значения плотности фототока, превышающие достигнутые к настоящему моменту значения J_ϕ для серийных отечественных ФЭП более, чем на 4 mA/cm^2 , что должно было бы привести к заметному росту их КПД. Однако КПД исследованных ФЭП не превышает 11,6%, что связано с высокими значениями плотности диодного тока насыщения и последовательного сопротивления, а также с низким

шунтирующим сопротивлением. Высокое значение J_0 обусловлено, в первую очередь, преобладанием его рекомбинационной компоненты ($A = 2$). Низкое шунтирующее сопротивление $R_{ш}^*$, приведенное к единице площади ФЭП, обусловлено, вероятнее всего, краевыми дислокациями с облаками Коттрелла либо глубокими микротрещинами (иногда образующимися при вырезании базового полупроводникового слоя из исходного монокристаллического слитка), пересекающими p - i - n структуру.

Следует отметить, что величина J_{ϕ} образца №1 составляет 48,6 мА/см² и практически равна плотности фототока лучших зарубежных ФЭП. Это позволяет говорить о перспективе создания ФЭП такого типа с рекордно высоким значением КПД. Однако, хотя плотность фототока образца №1 больше, чем у образца №2 на 3,2 мА/см², повышенное значение J_0 и пониженное значение шунтирующего сопротивления $R_{ш}^*$, приведенного к единице площади фронтальной поверхности данного ФЭП, обуславливают снижение его КПД на 0,1% по сравнению с образцом №2.

Таким образом, при достигнутом высоком значении J_{ϕ} к пониженному значению КПД исследованных ФЭП привело недостаточно высокое качество их диодной структуры. Однако достигнутые рекордно высокие значения J_{ϕ} позволяют прогнозировать реальную возможность

обеспечения существенно более высокой эффективности работы ФЭП с *p-i-n*-структурой.

Расчеты, результаты которых представлены в табл. 2, показывают, что если бы величина J_{ϕ} образца №2 была повышена до величины J_{ϕ} образца №1, величина J_0 снижена до 10⁻⁷ А/см², то КПД образца №2 повысился бы на 3,1% и достигал бы 14,7%. Это превышает КПД лучших отечественных ФЭП стандартной конструкции, который составляет 14%. При снижении $R_{п}^*$ до 1,20 Ом·см², увеличении $R_{ш}^*$ до 360 Ом·см² возможно достижение КПД на уровне 15,6%. В случае приближения некоторых диодных параметров тестовых образцов к диодным параметрам лучших отечественных ФЭП, а именно: $R_{п}^* = 0,88$ Ом·см² и $R_{ш}^* = 270$ Ом·см² при сохранении J_0 на уровне 10⁻⁷ А/см², ФЭП с *p-i-n*-структурой позволят получить КПД около 16,1% и $P_{нм}^*$ около 313 Вт/кг.

Таблица 2

Результаты математического моделирования на ПЭВМ зависимости выходных параметров ФЭП от их диодных параметров

Этапы моделирования	Плотность фототока J_{ϕ} , мА/см ²	Диодные параметры				Выходные параметры					
		J_0 , А/см ²	A , отн.ед.	$R_{ш}^*$, Ом·см ²	$R_{п}^*$, Ом·см ²	$J_{кз}$, мА/см ²	$U_{хх}$, мВ	FF , отн.ед.	$P_{нм}$, Вт/м ²	$P_{нм}^*$, Вт/кг	η , %
1	48,6	1·10 ⁻⁷	2	251	1,7	48,2	668	0,62	200	286	14,7
2	48,6	1·10 ⁻⁷	2	360	1,2	48,4	669	0,65	212	303	15,6
3	48,6	1·10 ⁻⁷	2	270	0,7	48,5	669	0,67	219	313	16,1
4	48,6	1·10 ⁻⁸	2	500	0,5	48,6	787	0,72	277	397	20,4

Оптимизировать параметры диодной структуры можно следующим образом. Снижение плотности диодного тока насыщения реально за счет уменьшения на порядок толщины областей p^+ -типа, соответствующих позиции 5 на рис. 1. Понижение последовательного сопротивления возможно за счет нанесения металлизации толщиной не менее 5 мкм поверх этих областей. Для повышения шунтирующего сопротивления целесообразно утонение исходного кристалла методом глубокого химического травления [4], что обеспечит устранение микротрещин, проникающих в исходный базовый кристалл со стороны планарных поверхностей на глубину 100-150 мкм и не устраняемых в результате его механической полировки и шлифовки, а также большей части краевых дислокаций в этом кристалле.

При условии достижения параметров диодной структуры, соответствующих критериальным значениям для ФЭП стандартной конструкции ($R_{п}^* = 0,5$ Ом·см², $R_{ш}^* = 500$ Ом·см², $J_0 = 10^{-8}$ А/см² [5]) КПД ФЭП с *p-i-n* структурой может быть увеличен до 20,4%.

Теоретические НС ВАХ для фотопреобразователей с различными диодными параметрами и значениями J_{ϕ} приведены на рис. 3. Изменение коэффициента полезного действия в зависимости от диодных параметров схематически показано в виде соответствующих диаграмм на рис. 4.

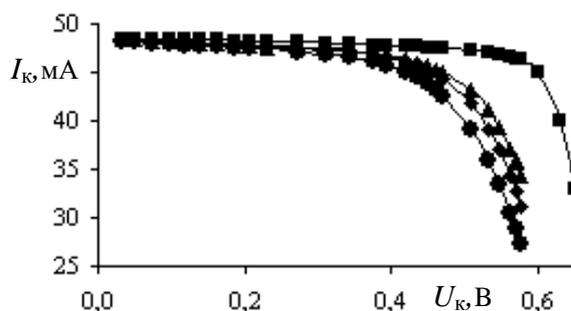


Рис. 3. НС ВАХ ФЭП с *p-i-n* структурой, построенные по результатам математического моделирования с учетом значений плотности фототока и диодных параметров, соответствующих этапам моделирования 1 - 4, которые приведены в табл. 2: ■ - этап 1; ◆ - этап 2; ▲ - этап 3; ■ - этап 4

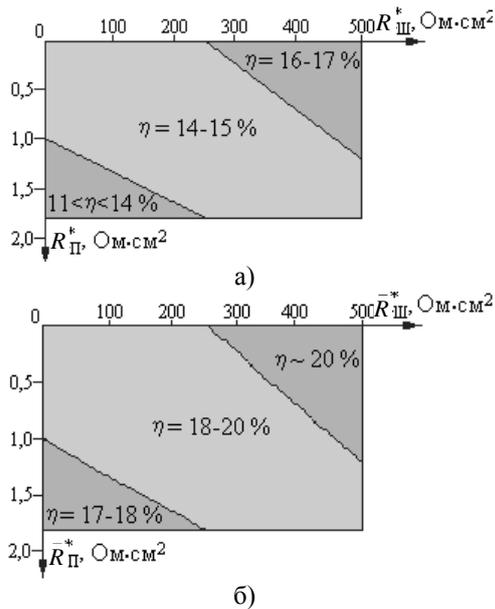


Рис. 4. Диаграммы распределения значений КПД ФЭП с *p-i-n* структурой в зависимости от значений последовательного и шунтирующего сопротивлений при плотности диодного тока насыщения 10^{-7} А/см² (а) и 10^{-8} А/см² (б)

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о перспективности использования монокристаллических кремниевых ФЭП с *p-i-n*-структурой для космического и наземного применения.

3. Параметры ФЭП в условиях концентрированного излучения. Основные результаты исследований по изучению влияния концентрированного солнечного излучения на выходные и диодные параметры ФЭП с *p-i-n*-структурой могут быть обобщены в виде семейства зависимостей выходных параметров и плотности фототока от величины степени концентрации излучения K , представленного на рис. 5. Выходные и диодные параметры тестового образца ФЭП №1 при различных значениях K приведены в табл. 3.

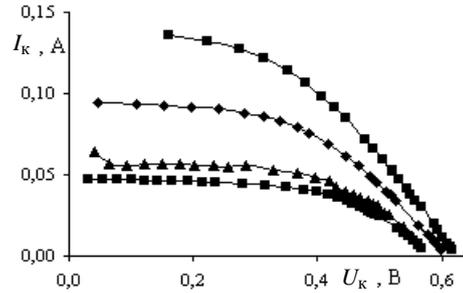


Рис. 5. Экспериментальные ИС ВАХ, соответствующие различным уровням освещенности тестового образца ФЭП №1: ■ - $K = 1$; ▲ - $K = 1,2$; ◆ - $K = 1,5$; ▣ - $K = 2$

Как видно из рис. 5 и табл. 3, выходные и диодные параметры исследованного ФЭП по-разному изменяются с ростом K : J_{ϕ} и U_{xx} растут с увеличением K . Однако фактор заполнения ИС ВАХ уменьшается с ростом K , начиная со значений этой величины, близких к единице.

Последнее обстоятельство хорошо коррелирует с увеличением разницы между J_{ϕ} и $J_{кз}$ при росте K , которая может быть обусловлена только ростом плотности диодного тока J_d ФЭП с ростом K при сравнительно больших значениях J_0 и $R_{п}$ в силу следующего хорошо известного соотношения [5]: $J_{кз} = J_{\phi} - J_d$.

Существенной причиной снижения фактора заполнения FF с ростом K может являться значительное увеличение потерь вырабатываемой ФЭП электрической мощности на выделение джоулева тепла в относительно высоком последовательном и в сравнительно низком шунтирующем сопротивлениях ФЭП. Поэтому можно заключить, что величина FF уменьшается с ростом K от 0,56 до 0,52, в частности, из-за увеличения J_0 с ростом K сравнительно больших значений $R_{п}$ и низких значений $R_{ш}$, достигающих соответственно $7 \cdot 10^{-7}$ А/см², 1,6 Ом·см², 79 Ом·см² при $K = 2$.

Таблица 3

Плотность фототока, выходные и диодные параметры тестового образца ФЭП № 1 в зависимости от степени концентрации излучения на его фронтальной поверхности

K , отн. ед.	J_{ϕ} , мА/см ²	$J_{кз}$, мА/см ²	U_{xx} , мВ	FF , отн. ед.	$P_{нм}$, Вт/м ²	$P_{нм}^*$, Вт/кг	η , %	J_0 , А/см ²	A , отн. ед.	$R_{ш}^*$, Ом·см ²	$R_{п}^*$, Ом·см ²
1,0	48,6	47,8	581	0,56	157	224	11,5	$5 \cdot 10^{-7}$	2	99	1,7
1,2	58,7	57,8	583	0,56	191	243	11,6	$6 \cdot 10^{-7}$	2	99	1,6
1,5	74,2	73,0	596	0,55	232	341	11,7	$6 \cdot 10^{-7}$	2	99	1,6
2,0	96,6	94,7	602	0,52	297	423	10,6	$7 \cdot 10^{-7}$	2	79	1,6

Перечисленные обстоятельства приводят к увеличению КПД на 0,2% (абсолютных) при $K = 1,5$, а затем - к резкому спаду на 1,1% при $K = 2$. Вместе с тем, проведенный анализ экспериментальных данных показывает, что при указанном выше спаде КПД максимальная электрическая мощность, отдаваемая ФЭП

во внешнюю резистивную нагрузку, монотонно растет с увеличением степени концентрации излучения во всем диапазоне использованных значений K , достигая 423 Вт/кг при $K = 2$. Это обусловлено преимущественным монотонным ростом произведения выходных параметров $J_{кз}$ и U_{xx} на фоне монотонного и меньшего

по удельному вкладу снижения параметра FF в величину $P_{\text{нм}} = J_{\text{кз}} U_{\text{кк}} FF$ [5]. Наблюдающийся характер зависимости максимальной электрической мощности, отдаваемой ФЭП во внешнюю резистивную нагрузку, от величины K показан в табл. 3.

Полученные результаты позволяют заключить, что ФЭП с $p-i-n$ -структурой исследованного уровня качества в условиях концентрированного солнечного излучения наиболее оптимально могут быть использованы при $K = 1,5$. При улучшении диодных параметров, обеспечивающих рост КПД в режиме облучения AM0, значение оптимального коэффициента концентрации солнечного излучения может возрасти.

Выводы. Проведена аттестация по фототоку, выходным и диодным параметрам тестовых образцов ФЭП с $p-i-n$ структурой на основе кристаллов кремния толщиной 300 мкм с площадью фронтальной поверхности 1 см².

В условиях облучения AM0 КПД исследованных ФЭП составляет 11,5 - 11,6%, что обусловлено недостаточно высоким качеством диодной структуры. Однако рекордно высокие значения плотности фототока, достигающие 48,6 мА/см², позволяют при условии оптимизации диодных параметров прогнозировать реальную возможность достижения более высокого качества ФЭП с $p-i-n$ -структурой.

Математическое моделирование на ПЭВМ зависимости выходных параметров ФЭП от их диодных параметров показало, что КПД равный 14,7% достижим при снижении плотности диодного тока насыщения до 10^{-7} А/см² при сохранении остальных диодных параметров таких ФЭП на уровне, соответствующем настоящей стадии разработки. При практической реализации достижения критериальных значений диодных параметров ($J_0 = 10^{-8}$ А/см², $R_{\text{п}}^* = 0,5$ Ом·см², $R_{\text{ш}}^* = 500$ Ом·см², $A = 2$) [5] КПД ФЭП с $p-i-n$ структурой может быть увеличен до 20,4%.

Установлено, что в условиях концентрированного солнечного излучения КПД ФЭП исследованного типа растет с повышением степени его концентрации, достигая максимума 11,7% при $K = 1,5$, а затем резко спадает при $K = 2$. Обнаружено, что такое изменение КПД обусловлено снижением FF и увеличением J_0 с увеличением K , а также сравнительно большим значением $R_{\text{п}}$ образца и низким $R_{\text{ш}}$. Монокристаллические кремниевые ФЭП с $p-i-n$ структурой исследованного уровня качества в условиях концентрированного солнечного излучения наиболее оптимально могут быть использованы при $K = 1,5$.

1. Hoffmann W. PV solar electricity: one among the new millennium industries // Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, (October 22-26, 2001). - Munich, Germany, 2001. - P.-851-861.
2. Green M. A., Emery K., King D. L. et al. Solar cell efficiency tables (Version 27) // Prog. Photovolt: Res. Appl. - 2006. - 14, N1. - P.45-51.

3. Антонова В. А., Борщев В. Н., Копач В. Р. и др. Перспективные конструктивно-технологические решения монокристаллических кремниевых фотопреобразователей космического назначения // Радиотехника. - 2002. - Вып. 125. - С.110-116
4. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. - М.: Наука, 1985. - 280 с.
5. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент. - М.: Энергоиздат, 1987. - 280 с.

INVESTIGATION OF THE DEVELOPMENT CAPABILITY OF HIGH EFFICIENCY SILICON SOLAR CELLS WITH P-I-N BASE STRUCTURE

L. P. Shuba, M. V. Kirichenko, V. R. Kopach,
V. A. Antonova, A. M. Listratenko

Test samples of solar cells (SC) with p-i-n structure on the basis of very poorly phosphorus doped silicon crystals of i (n)-type conductivity by thickness about 300 μm with resistivity of 4000 Ohm cm were manufactured and investigated. The p- and n-type layers by thickness 1,5 μm with boron and phosphorus concentration $\sim 10^{20}$ cm⁻³ were prepared according to technology used in serial production of Ukrainian monocrystalline Si-SC. Photocurrent density J_p , output and diode parameters of SC were determined from the loading illuminated current-voltage characteristics measured at 25°C and in conditions of extra-atmospheric solar radiation (AM0 regime – air mass equals zero). The found out value $J_p = 48,6$ mA/cm² is the record for Ukrainian monocrystalline Si-SC that causes the expediency of serial Si-SC development with p-i-n structure. The influence of weakly concentrated radiation on the efficiency of such type SC was investigated. The proposals on improvement of Si-SC design with p-i-n structure ensuring their efficiency increasing up to 20% were grounded.

Key words: solar cells, p-i-n structure, efficiency.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З БАЗОВОЮ P-I-N СТРУКТУРОЮ

Л. П. Шуба, М. В. Кіріченко, В. Р. Копач,
В. А. Антонова, О. М. Лістратенко

Виготовлені та досліджені тестові зразки фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) з $p-i-n$ структурою на основі дуже слабо легованих фосфором кристалів кремнію $i(n)$ -типу провідності товщиною близько 300 мкм з питомим опором 4000 Ом·см. Шари p - та n -типу товщиною 1,5 мкм з концентрацією бору та фосфору $\sim 10^{20}$ см⁻³ відповідно сформовані згідно до технології, що використовується при серійному виробництві вітчизняних монокристалічних Si-ФЕП. Густина фотоструму J_p , вихідні та діодні параметри ФЕП визначалися за навантажувальними світловими вольт-амперними характеристиками, виміряними при 25°C в умовах заатмосферного сонячного опромінення (режим AM0 - атмосферна маса дорівнює нулю). Виявлене значення $J_p = 48,6$ мА/см² є рекордним для вітчизняних монокристалічних Si-ФЕП, що обумовлює доцільність розробки серійних Si-ФЕП з $p-i-n$ структурою. Вивчено вплив слабоконцентрованого опромінення на ефективність роботи ФЕП такого типу. Обґрунтовано пропозиції по вдосконаленню конструкції Si-ФЕП з $p-i-n$ структурою, що забезпечує збільшення їх ККД до 20%.

Ключові слова: фотоелектричні перетворювачі, $p-i-n$ структура, ККД.

Рукопись поступила 28 декабря 2006 г.