

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ
OPTICAL, OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

УДК 539.2:648.75

**ВЫХОДНЫЕ И ДИОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С БАЗОВОЙ p-i-n-СТРУКТУРОЙ
ПРИ ОБЫЧНОМ И СЛАБО КОНЦЕНТРИРОВАННОМ
СОЛНЕЧНОМ ИЗЛУЧЕНИИ**

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

¹Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, +380686140783,
E-mail: kirichenko_mv@mail.ru

²Государственное предприятие “Научно-исследовательский технологический институт
приборостроения”, Украина, 61010, г. Харьков, ул. Примакова, 40/42, +380972170720

Аннотация

**ВЫХОДНЫЕ И ДИОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С БАЗОВОЙ p-i-n-СТРУКТУРОЙ ПРИ ОБЫЧНОМ И СЛАБО КОНЦЕНТРИРОВАННОМ
СОЛНЕЧНОМ ИЗЛУЧЕНИИ**

М. В. Кириченко, Л. П. Шуба, В. Р. Копач, В. А. Антонова, А. М. Листратенко

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. Обнаруженное значение плотности фототока, равное 48,6 мА/см², является рекордным для отечественных монокристаллических кремниевых ФЭП, что обуславливает целесообразность разработки серийных ФЭП с p-i-n структурой. Изучено влияние слабо концентрированного излучения на эффективность работы ФЭП такого типа. Обоснованы предложения по усовершенствованию конструкции ФЭП с p-i-n структурой, обеспечивающему увеличение их КПД до 20 %.

Ключевые слова: фотопреобразователь, p-i-n структура, плотность фототока, КПД

Анотація

ВИХІДНІ ТА ДІОДНІ ПАРАМЕТРИ КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З БАЗОВОЮ p-i-n-СТРУКТУРОЮ ПРИ ЗВИЧАЙНОМУ ТА СЛАБО КОНЦЕНТРОВАНОМУ СОНЯЧНОМУ ОПРОМІНЕННІ

М. В. Кіриченко, Л. П. Шуба, В. Р. Копач, В. А. Антонова, О. М. Листратенко

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. Виявлене значення густини фотоструму, що дорівнює 48,6 мА/см² є рекордним для вітчизняних монокристалічних ФЕП, що обумовлює доцільність розробки серійних ФЕП з p-i-n структурою. Вивчено вплив слабо концентрованого опромінення на ефективність роботи ФЕП такого типу. Обґрунтовано пропозиції по вдосконаленню конструкції ФЕП з p-i-n структурою, що забезпечує збільшення їх ККД до 20 %.

Ключові слова: фотоелектричні перетворювачі, p-i-n структура, густина фотоструму, ККД

Abstract

OUTPUT AND DIODE PARAMETERS OF SILICON SOLAR CELLS WITH p-i-n BASE STRUCTURE AT THE STANDART AND LOW-CONCENTRATED SOLAR RADIATION

M. V. Kirichenko, L. P. Shuba, 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 found out value of photocurrent density equal 48,6 mA/cm² is the record for Ukrainian monocrystalline SC that causes the expediency of serial 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 SC design with p-i-n structure ensuring their efficiency increasing up to 20 % were grounded.

Keywords: solar cells, p-i-n structure, photocurrent density, efficiency

Введение

В настоящее время КПД серийных образцов отечественных кремниевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) космического назначения с n⁺-p-p⁺-структурой при 25 °С и облучении в режиме АМ0 составляет 13-14 % [1], что примерно на 6-7 % ниже КПД лучших зарубежных аналогов [2]. Это, прежде всего, обусловлено сниженной примерно в 1,2 раза плотностью фототока J_{ϕ} отечественных ФЭП. Радикальными способами увеличения J_{ϕ} являются: повышение времени жизни неосновных носителей заряда в базовом кристалле ФЭП, например, путем снижения концентрации легирующей примеси, а также использование ФЭП в условиях концентрированного солнечного излучения [3]. Поэтому задачей работы являлось исследование возможностей

разработки высокоэффективных кремниевых ФЭП с базовой p-i-n-структурой и использования таких ФЭП в условиях слабо концентрированного солнечного излучения.

1. Объекты и методы исследования

В связи с изложенным изготовлены и исследованы тестовые образцы ФЭП такого типа на основе очень слабо легированных фосфором кристаллов кремния i(n⁻)-типа проводимости толщиной 300 мкм с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 4000 Ом·см. Со стороны полированной фронтальной фотоприемной поверхности образцов площадью 1×1 см² параллельно друг другу расположены диффузионные p⁺-слои толщиной 1,5 мкм с концентрацией акцепторной примеси (бора) у поверхности $6 \cdot 10^{19}$ см⁻³, вы-

полненные 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 p^+ -типа шириной 200 мкм, покрытым слоем металлизации. Со стороны полированной тыльной поверхности образцов параллельно друг другу расположены диффузионные n^+ -слои толщиной 1,5 мкм с концентрацией донорной примеси (фосфора) у поверхности $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, выполненные как и p^+ -слои, но развернутые относительно последних под углом 90° . Поверх n^+ -областей нанесена пленочная металлизация. Со стороны фронтальной поверхности нанесено просветляющее покрытие. Технология изготовления диффузионных p^+ - и n^+ -слоев, просветления, а также металлизации указанных выше областей была подобна базовой, используемой при изготовлении серийных монокристаллических кремниевых ФЭП космического назначения с n^+ - p - p^+ -структурой [4].

Определение величины J_ϕ , выходных параметров (плотности тока короткого замыкания $J_{KЗ}$; напряжения холостого хода U_{XX} ; фактора заполнения FF нагрузочной световой вольт-амперной характеристики (НС ВАХ), максимальной электрической мощности, выделяемой в нагрузку P_{HM} ; коэффициента полезного действия η) и диодных параметров (плотности диодного тока насыщения J_0 , последовательного сопротивления R_{II} , шунтирующего сопротивления R_{III} , коэффициента идеальности диода A) исследованных ФЭП проводилось путем измерения и последующей аналитической обработки НС ВАХ.

Режим облучения АМ0 аналогично [5] имитировался ксеноновой лампой вспышкой. Степень концентрации излучения K варьировалась от 1,0 до 2,0 путем изменения расстояния между осветителем и исследуемым образцом. Температура образцов 25°C при измерениях НС ВАХ поддерживалась с помощью термостата. Аналитическая обработка НС ВАХ осуществлялась подобно [6].

2. Результаты и их обсуждение

Экспериментальные НС ВАХ, типичные для всех исследованных ФЭП, приведены на рис. 1. Выходные и диодные параметры исследованных ФЭП представлены в табл. 1

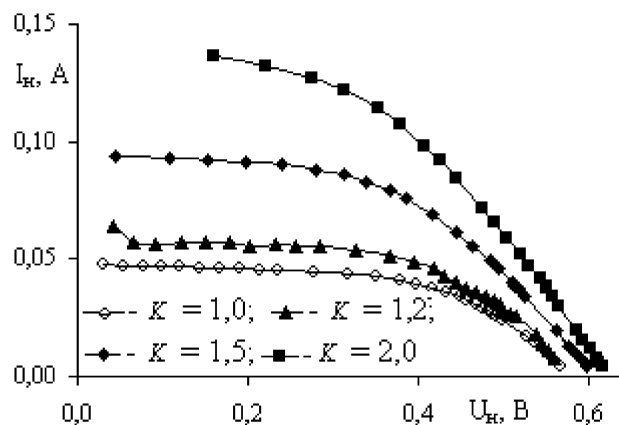


Рис. 1. Типичные для исследованных ФЭП экспериментальные нагрузочные световые ВАХ при различных значениях степени концентрации K излучения на фронтальной поверхности

Таблица 1

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

K , отн. ед.	1,0	1,2	1,5	2,0
J_ϕ , мА/см^2	48,6	58,7	74,2	96,6
$J_{KЗ}$, мА/см^2	47,8	57,8	73,0	94,7
U_{XX} , мВ	581	583	596	602
FF , отн. ед.	0,56	0,56	0,55	0,52
P_{HM} , Вт/м ²	157	191	232	297
η , %	11,5	11,6	11,7	10,6
J_0 , А/см^2	$5 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$
A , отн. ед.	2	2	2	2
R_{III}^* , Ом·см ²	99	99	99	79
R_{II}^* , Ом·см ²	1,7	1,6	1,6	1,6

Как видно из табл. 1, исследованные тестовые образцы ФЭП при $K = 1$ имеют весьма высокие значения плотности фототока, превышающие достигнутые к настоящему моменту значения J_ϕ для серийных отечественных ФЭП более, чем на 4 мА/см^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 рекомбинационной компоненты ($A = 2$). Низкое шунтирующее сопротивление R_{III}^* , приведенное к единице площади ФЭП, обусловлено, вероятнее всего, глубокими мик-

Таблица 2

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

Этапы моделирования		1	2	3	4
Плотность фототока	J_ϕ , мА/см ²	48,6	48,6	48,6	48,6
	J_0 , А/см ²	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
Диодные параметры	A , отн.ед.	2	2	2	2
	$R_{ш}^*$, Ом·см ²	250	360	270	500
	$R_{л}^*$, Ом·см ²	1,7	1,2	0,7	0,5
Выходные параметры	$J_{кз}$, МА/см ²	48,2	48,4	48,5	48,6
	$U_{хх}$, мВ	668	669	669	787
	FF , отн. ед.	0,62	0,65	0,67	0,72
	$P_{нм}$, Вт/м ²	200	212	219	277
	η , %	14,7	15,6	16,1	20,4

ротрещинами (часто образующимися при разделении исходного монокристаллического слитка на пластины, из которых вырезаются базовые кристаллы [7]), пересекающими p-i-n структуру.

Вместе с тем, величина $J_\phi = 48,6$ мА/см² практически равна плотности фототока лучших зарубежных монокристаллических кремневых ФЭП [2], что позволяет прогнозировать реальную возможность создания отечественных ФЭП рассматриваемого типа с рекордно высоким значением КПД при $K = 1,0$. Как следует из изложенного выше, препятствием этому является недостаточно высокое качество диодной структуры исследованных тестовых образцов.

Математическое моделирование p-i-n структуры с различными комбинациями диодных параметров в направлении их улучшения по сравнению с характерными для исследованных образцов при фиксированном значении $J_\phi = 48,6$ мА/см² показало, что при условии достижения параметров диодной структуры, соответствующих критериальным значениям для ФЭП стандартной конструкции ($R_{л}^* = 0,5$ Ом·см², $R_{ш}^* = 500$ Ом·см², $J_0 = 10^{-8}$ А/см² [7]) КПД ФЭП с p-i-n структурой может быть увеличен до 20,4 %. В табл. 2 представлены результаты такого моделирования на ПЭВМ зависимости выходных параметров ФЭП от их диодных параметров. Теоретические нагрузочные световые ВАХ для ФЭП с диодными параметрами, указанными в табл. 2, и $K = 1$ приведены на рис. 2.

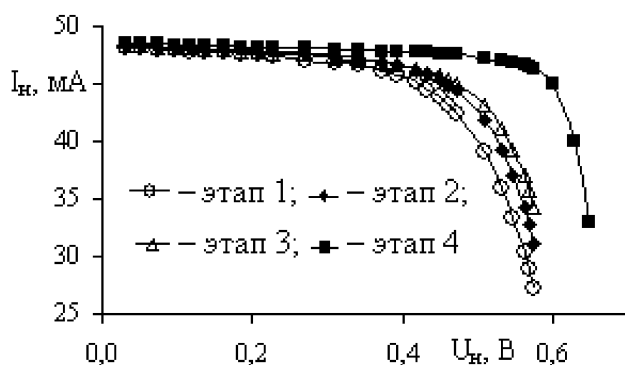


Рис. 2. Нагрузочные световые ВАХ ФЭП с p-i-n структурой, построенные по результатам математического моделирования с учетом значений плотности фототока и диодных параметров, соответствующих этапам моделирования 1 — 4, которые приведены в табл. 2

Как видно из рис. 1 и табл. 1, выходные и диодные параметры исследованного ФЭП по-разному изменяются с ростом K : J_ϕ , и $U_{хх}$ растут с увеличением K , однако, фактор заполнения НС 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_0 ФЭП с ростом K при сравнительно больших значениях J_0 и $R_{л}$ в силу следующего хорошо известного соотношения [7]: $J_{кз} = J_\phi - J_0$.

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 от 0,56 до 0,52 с ростом K , в частности, из-за увеличения J_0 с ростом K , из-за сравнительно больших значений $R_{л}$ и низких значений $R_{ш}$, достигающих, соответственно, $7 \cdot 10^{-7}$ А/см², $1,6$ Ом·см², 79 Ом·см² при $K = 2,0$. Перечисленные обстоятельства приводят к увеличению КПД на 0,2 % (абсолютных) при $K = 1,5$, а затем — к резкому спаду на 1,1 % при $K = 2,0$.

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 297 Вт/м^2 при $K = 2,0$. Это обусловлено преимущественным монотонным ростом произведения выходных параметров J_{K3} и U_{XX} на фоне монотонного и меньшего по удельному вкладу снижения параметра FF в величину $P_{HM} = J_{K3} \cdot U_{XX} \cdot FF$ [7]. Наблюдающийся характер зависимости максимальной электрической мощности, отдаваемой ФЭП во внешнюю резистивную нагрузку, от величины K показан в табл. 1.

Полученные результаты позволяют заключить, что ФЭП с р-і-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 АМ0, значение оптимального коэффициента концентрации солнечного излучения может возрасти [3].

Выводы

Проведена аттестация по фототоку, выходным и диодным параметрам тестовых образцов ФЭП с р-і-n структурой на основе кристаллов кремния, имеющих ориентацию (100), площадь фронтальной поверхности 1 см^2 , толщину 300 мкм и удельное сопротивление $4000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

В условиях облучения АМ0 коэффициент полезного действия исследованных ФЭП составляет $11,6 \%$, что обусловлено недостаточно высоким качеством диодной структуры. Однако рекордно высокие значения плотности фототока, достигающие $48,6 \text{ мА/см}^2$, позволяют, при условии оптимизации диодных параметров, прогнозировать реальную возможность достижения более высокой эффективности работы ФЭП с р-і-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/см^2 при сохранении остальных диодных параметров

таких ФЭП на уровне, соответствующем настоящей стадии разработки. При практической реализации критериальных значений диодных параметров ($J_0 = 10^{-8} \text{ А/см}^2$, $R_{II}^* = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, $R_{III}^* = 500 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, $A = 2$) [7] КПД ФЭП с р-і-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 $K = 2,0$. Обнаружено, что такое изменение КПД обусловлено снижением FF и увеличением J_0 с увеличением K , а также сравнительно большим значением R_{II} и низким R_{III} . Монокристаллические кремниевые ФЭП с р-і-n структурой исследованного уровня качества в условиях концентрированного солнечного излучения наиболее оптимально могут быть использованы при $K = 1,5$. Улучшение диодных параметров р-і-n структуры позволит повысить оптимальное значение K , а, следовательно, и максимальное значение КПД в условиях слабо концентрированного солнечного излучения

Литература

1. Антонова В.А., Боршев В.Н., Копач В.Р., Листратенко А.М., Слипченко Н.И., Тымчук И.Т. Тонкие текстурированные кремниевые фотопреобразователи с улучшенными массоэнергетическими характеристиками // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. — 2004. — Вып. 139. — С. 113-119.
2. Green M.A., Emery K., King D.L., Hisikawa Y., Warta W. Solar cell efficiency tables (Version 27) // Prog. Photovolt: Res. Appl. — 2006. — V.14, No. 1. — P. 45-51.
3. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. — Л.: Наука, 1988. — 310 с.
4. Листратенко А.М. Исследование и разработка малозатратной технологии изготовления высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей космического применения // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. — 2001. — Вып. 121. — С. 121-125.
5. Keogh W., Cuevas A. Simple flashlamp I-V testing of solar cells // Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA, September 30 — October 3. — 1997. — P. 199-202.

6. Kerschaver E., Einhaus R., Szlufcik J., Nijs J., Mertens R. Simple and fast extraction technique for the parameters in the double exponential model for I-V characteristic of solar cells // Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, June 30 — July 4, 1997. — Barcelona, Spain, 1997. — P. 2438-2441.
7. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент. — М.: Энергоиздат, 1987. — 280 с.