

УДК 539.2:648.75

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТИПА ПРОВОДИМОСТИ БАЗОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

*М. В. Кириченко<sup>1</sup>, Р. В. Зайцев<sup>1</sup>, В. Р. Копач<sup>1</sup>,  
В. А. Антонова<sup>2</sup>, А. М. Листратенко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, +380686140783,  
E-mail: kirichenko\_mv@mail.ru

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

### **Аннотация**

#### **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТИПА ПРОВОДИМОСТИ БАЗОВЫХ КРЕМНИЕВЫХ КРИСТАЛЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

*М. В. Кириченко, Р. В. Зайцев, В. Р. Копач, В. А. Антонова, А. М. Листратенко*

Приведены результаты исследований выходных и диодных параметров фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), изготовленных на основе базовых кристаллов кремния р- и n-типа проводимости толщиной от 190 до 375 мкм. Путем сопоставления выходных и диодных параметров ФЭП с базовыми кристаллами различной толщины и типа проводимости последних обоснована целесообразность создания высокоэффективных отечественных ФЭП наземного применения на основе кристаллов кремния n-типа проводимости с толщиной не более 200 мкм.

**Ключевые слова:** фотопреобразователь, кремний, тип проводимости, толщина, параметры.

### **Анотація**

#### **ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ТИПУ ПРОВІДНОСТІ БАЗОВИХ КРЕМНІЄВИХ КРИСТАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

*М. В. Кіріченко<sup>1</sup>, Р. В. Зайцев<sup>1</sup>, В. Р. Копач<sup>1</sup>, В. А. Антонова<sup>2</sup>, О. М. Лістратенко<sup>2</sup>*

Наведено результати досліджень вихідних та діодних параметрів фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), виготовлених на основі базових кристалів кремнію р- та n-типу провідності товщиною від 190 до 375 мкм. Шляхом зіставлення вихідних та діодних параметрів ФЕП з базовими кристалом різної товщини та типу провідності обґрунтована доцільність створення вискоелективних вітчизняних ФЕП наземного призначення на основі кристалів кремнію n-типу провідності з товщиною не більше 200 мкм.

**Ключові слова:** фотоперетворювач, кремній, тип провідності, товщина, параметри.

## Abstract

### INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS AND TYPE OF CONDUCTIVITY OF SILICON BASE CRYSTALS ON THE SOLAR CELLS EFFICIENCY

*M. V. Kirichenko<sup>1</sup>, R. V. Zaytsev<sup>1</sup>, V. R. Kopach<sup>1</sup>, V. A. Antonova<sup>2</sup>, A. M. Listratenko<sup>2</sup>*

The investigated values of solar cells (SC) output and diode parameters made on the basis of p- and n-type of conductivity silicon base crystals with a thickness from 190 to 375  $\mu\text{m}$  are presented. By comparison of SC output and diode parameters with base crystals of various thickness and type of conductivity the expediency of high efficiency Ukrainian SC creation for terrestrial application with the single crystals of n- type conductivity and thickness no more then 190-200  $\mu\text{m}$  is grounded.

**Key words:** solar cells, silicon base crystals, type of conductivity, thickness, parameters.

## Введение

Лучшие зарубежные монокристаллические кремниевые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) при 25 °С и облучении в режиме АМ0 имеют КПД ( $\eta$ ) на уровне 19-20 % [1], что на 6-7 % превышает КПД серийных образцов отечественных кремниевых ФЭП космического назначения с  $\text{p}^+\text{-p-p}^+$ -структурой [2]. Повысить  $\eta$  и массомощностную характеристику  $P_M^*$  (вырабатываемую ФЭП максимальную полезную мощность, отнесенную к его массе) отечественных ФЭП можно за счет увеличения плотности фототока  $J_\phi$  и напряжения холостого хода  $U_{\text{хх}}$ . Заметного повышения  $J_\phi$  достигают оптимизируя толщину базового кристалла при одновременном текстурировании его фронтальной поверхности [3,4]. Для повышения  $U_{\text{хх}}$  и долговечности ФЭП необходимо уменьшить рекомбинационные потери в объеме, на тыльной и фронтальной поверхностях базовых кремниевых кристаллов ФЭП в исходном состоянии, а также при последующих радиационном и фотонном воздействиях. При этом на уровень рекомбинационных потерь в базовых кристаллах кремния существенно влияет тип и концентрация основной легирующей примеси [5-7].

Поэтому задачей работы являлось исследование влияния типа проводимости, толщины и состояния фронтальной поверхности базовых кристаллов на выходные и диодные параметры отечественных монокристаллических кремниевых ФЭП.

## 1. Объекты и методы исследования

В связи с изложенным исследовались образцы ФЭП с базовыми кристаллами р-типа проводимости, ориентировкой (100) и толщиной 190-380 мкм, легированными бором и имеющими удельное сопротивление  $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , а также с базовыми кристаллами n-типа проводимости, ориентировкой (111) и толщиной 350 мкм, легированными фосфором и имеющими  $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Образец ФЭП № 1 с базовым кристаллом р- типа проводимости толщиной 370 мкм имел полированную фронтальную поверхность площадью 8  $\text{см}^2$ . Внешний вид исследованных ФЭП такого типа со стороны фронтальной поверхности показан на рис. 1а. Базовый кристалл р- типа проводимости площадью 8  $\text{см}^2$  для образца ФЭП № 2 утонялся от исходной толщины 370 мкм до 190 мкм путем глубокого химического травления в 20 %-ном водном растворе КОН, причем одновременно на его фронтальной поверхности формировалась хаотическая текстура, характер которой показан на рисунке 1б. Образцы ФЭП № 3 и № 4 с базовыми кристаллами р- и n-типа проводимости толщиной 350 мкм имели полированную фронтальную поверхность площадью 2,25  $\text{см}^2$ . Образцы ФЭП с номерами 1, 2 и 3 имели  $\text{p}^+\text{-p-p}^+$  диодную структуру, а ФЭП с номером 4 —  $\text{p}^+\text{-n-p}^+$  диодную структуру.

Диффузионные  $\text{n}^+$ - и  $\text{p}^+$ -слои ФЭП были легированы фосфором и бором, соответственно, до уровня  $10^{19}\text{-}10^{20} \text{ см}^{-3}$ , а их толщины составляли 0,6-0,8 мкм. Токосборный электрод ФЭП со стороны  $\text{n}^+$ -слоя состоял из контактирующего с ним слоя титана толщиной около 0,1 мкм, поверх которого находился слой алюминия толщиной около 2 мкм. Со стороны  $\text{p}^+$ -слоя

токосборный электрод выполнен из алюминия толщиной около 2 мкм. Тылный электрод являлся сплошным. Со стороны фронтальной поверхности нанесено просветляющее покрытие. Технология изготовления диффузионных p<sup>+</sup>- и n<sup>+</sup>-слоев, просветления, а также металлизации указанных выше областей для образцов № 1, 3 и 4 соответствует базовой, используемой при изготовлении серийных монокристаллических кремниевых ФЭП космического назначения с n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-структурой [2]. Для образца № 2 технология изготовления диффузионного n<sup>+</sup>-слоя отличалась, согласно [2], повышенной концентрацией фосфора в его источнике на фронтальной поверхности базового кристалла и увеличенным временем термодиффузионного формирования этого слоя.

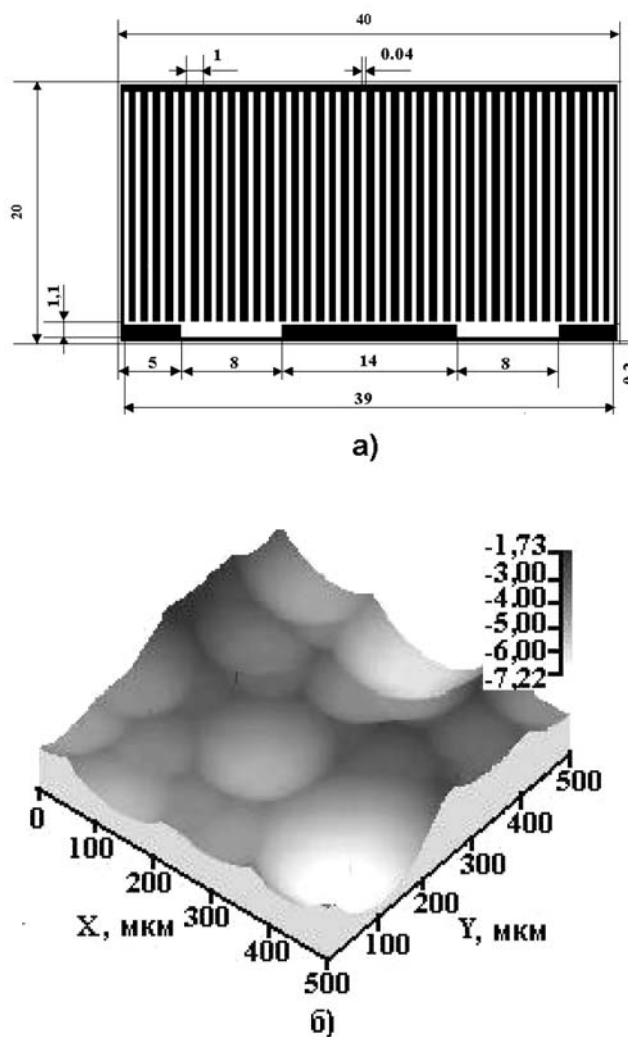


Рис. 1. Внешний вид исследованных ФЭП со стороны фронтальной поверхности (а) и характер рельефа поверхности текстурированной кремниевой пластины (б)

Определение величины  $J_{\phi}$ , выходных параметров (плотности тока короткого замыкания  $J_{KЗ}$ ; напряжения холостого хода  $U_{ХХ}$ ; мощностной характеристики  $P_M^*$ ; коэффициента полезного действия  $\eta$ ) и диодных параметров (плотности диодного тока насыщения  $J_0$  и коэффициента идеальности диода  $A$ ) исследованных ФЭП проводилось путем измерения и последующей аналитической обработки нагрузочной световой вольт-амперной характеристики (НС ВАХ).

Измерения НС ВАХ проводились подобно [8] при 25 °С в условиях энергетической освещенности фронтальной поверхности образцов 1360 Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует режиму облучения АМ0. Выходные и диодные параметры ФЭП определялись при аналитической обработке измеренных НС ВАХ с помощью ЭВМ по методике, аналогичной описанной в [9].

## 2. Результаты и их обсуждение

Экспериментальная НС ВАХ, типичная для всех исследованных ФЭП после их предварительного неоднократного длительного облучения в режиме АМ0, приведена на рис. 2. Значения выходных параметров:  $J_{KЗ} \approx J_{\phi}$ ,  $U_{ХХ}$ , КПД и  $P_M^*$ , а также диодных параметров:  $J_0$  и  $A$ , типичные для исследованных ФЭП с различной толщиной  $t$  и рельефом фронтальной поверхности базовых кристаллов, представлены в табл. 1.

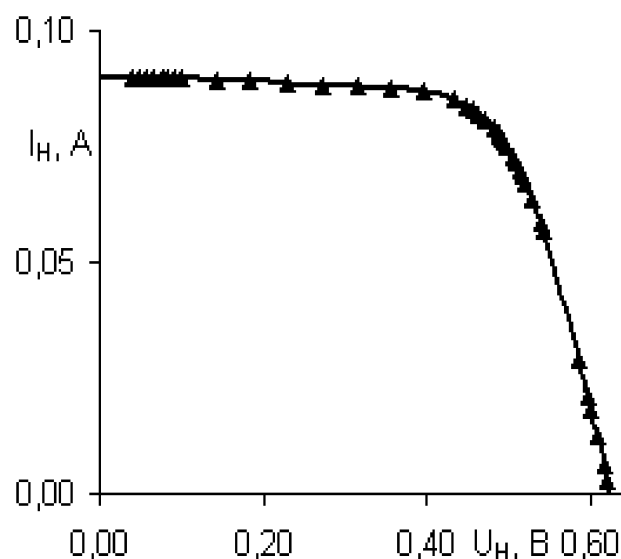


Рис. 2. Типичная для исследованных ФЭП экспериментальная нагрузочная световая ВАХ

Таблица 1

Параметры исследованных ФЭП с различной толщиной  $t$  и рельефом фронтальной поверхности базовых кристаллов

| Номер ФЭП                     | 1                    | 2                    |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| $t$ , мкм                     | 375                  | 190                  |
| $J_{кз}$ , мА/см <sup>2</sup> | 40,0                 | 36,4                 |
| $U_{xx}$ , мВ                 | 610                  | 616                  |
| $\eta$ , %                    | 12,6                 | 12,0                 |
| $P_M^*$ , Вт/кг               | 180                  | 374                  |
| $J_0$ , А/см <sup>2</sup>     | $2,1 \cdot 10^{-11}$ | $7,5 \cdot 10^{-12}$ |
| $A$ , отн. ед.                | 1,15                 | 1,09                 |

Сопоставление приведенных в табл. 1 выходных и диодных параметров исследованных ФЭП свидетельствует о следующем.

Заметное снижение величины  $J_\phi$  до 36,4 мА/см<sup>2</sup> образца № 2 по сравнению с образцом № 1 вызвано уменьшением толщины базового кристалла до 190 мкм, что в целом и привело к понижению КПД до 12,0 %.

Отмеченное снижение  $J_\phi$  не может быть скомпенсировано даже с учетом того, что при утонении кристалла путем глубокого химического травления ликвидируются глубокие микротрещины, распространяющиеся согласно [10-11] от обеих планарных поверхностей вглубь на 100-150 мкм и обуславливающие появление в запрещенной зоне кремния глубоких рекомбинационных уровней с большим сечением захвата носителей заряда. В результате такое утонение способствует снижению плотности диодного тока насыщения более, чем на порядок, приближая диодную структуру к идеальному по  $A$  диоду Шокли. Однако из-за излишне высокого уровня легирования  $n^+$ -слоя ФЭП отечественного производства практически все носители заряда, генерируемые квантами света в объеме этого слоя, рекомбинируют, не добираясь до  $n^+$ -р перехода. Поэтому  $J_\phi$  таких ФЭП практически определяется количеством носителей заряда, собираемых  $n^+$ -р переходом только из  $p$ -области базового кристалла. Уменьшение же  $t$  без одновременного создания эффективной системы захвата света приводит к существенному снижению числа неравновесных носителей заряда из-за уменьшения объема фотоактивного поглощения света. А использование текстуры, рельеф которой показан на рис. 1б, позволяет снизить коэффициент отражения солнечного

излучения в области максимальной спектральной чувствительности ФЭП лишь примерно на 5% [2], что не обеспечивает создания эффективной системы захвата света и приводит к потерям в величине фототока таких ФЭП. Вместе с тем, повышенное до 374 Вт/кг значение массомощностной характеристики ФЭП № 2 и уже упомянутое снижение плотности диодного тока насыщения являются дополнительными экспериментальными аргументами в пользу применения базовых кремниевых кристаллов с толщиной 190 мкм и менее. Однако при этом неотъемлемой составляющей разработки по совершенствованию отечественных кремниевых ФЭП с тонкими базовыми кристаллами должно являться формирование эффективной системы захвата света базовым кристаллом, аналогичной реализованной в [3].

Значения выходных параметров:  $J_{кз} \approx J_\phi$ ,  $U_{xx}$  и КПД, а также диодных параметров:  $J_0$  и  $A$ , типичные для исследованных образцов ФЭП с базовыми кристаллами различного типа проводимости, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры исследованных ФЭП с базовыми кристаллами различного типа проводимости

| Номер ФЭП                     | 3                    | 4                    |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| $J_{кз}$ , мА/см <sup>2</sup> | 42,0                 | 40,0                 |
| $U_{xx}$ , мВ                 | 592                  | 625                  |
| $\eta$ , %                    | 12,0                 | 13,0                 |
| $J_0$ , А/см <sup>2</sup>     | $9,4 \cdot 10^{-10}$ | $2,7 \cdot 10^{-10}$ |
| $A$ , отн. ед.                | 1,4                  | 1,3                  |

Сопоставление приведенных в табл. 2 выходных и диодных параметров исследованных ФЭП с базовыми кристаллами кремния различного типа проводимости свидетельствует о следующем. Так как согласно [4]  $\eta \sim J_{кз} U_{xx}$ , и  $U_{xx} \approx \frac{AkT}{e} \ln \frac{J_\phi}{J_0}$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $e$  — заряд электрона, то большее значение КПД ФЭП с базовым кристаллом  $n$ -типа проводимости обусловлено большим значением  $U_{xx}$ , которое в свою очередь вызвано сниженным значением  $J_0$ . Заметим, что для ФЭП с базовыми кристаллами  $n$ -типа проводимости величина  $J_0$  примерно в 3,5 раза меньше, чем для ФЭП с базовыми кристаллами  $p$ -типа проводимости.

Это достаточно хорошо согласуется с тео-

ретическим обоснованием конкурентоспособности кремниевых ФЭП, имеющих базовые кристаллы n-типа проводимости, обусловленной примерно в 3 раза меньшим значением  $J_0$  по сравнению с кремниевыми ФЭП, имеющими базовые кристаллы p-типа проводимости [5]. В [5] указанный эффект связывается с уменьшением скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда в случае базовых кристаллов n-типа проводимости. Как видно из табл. 2, коэффициент идеальности диода для ФЭП, имеющих базовые кристаллы n-типа проводимости, меньше, чем для ФЭП, имеющих базовые кристаллы p-типа проводимости. Указанное обстоятельство является дополнительным экспериментальным аргументом в пользу снижения скорости поверхностной рекомбинации при переходе от базовых кристаллов p-типа проводимости к базовым кристаллам n-типа проводимости.

### Выводы

Анализ установленной зависимости  $J_\phi$ , диодных параметров и КПД исследованных ФЭП от особенностей конструктивно-технологического решения позволяет заключить, что текстурирование и утонение базовых кристаллов с ориентировкой (100) до  $t \leq 190$  мкм путем глубокого химического травления в водном растворе щелочи должны являться неотъемлемыми составляющими нового конструктивно-технологического решения отечественных монокристаллических кремниевых ФЭП с существенно повышенными значениями КПД и массомощностной характеристики.

Экспериментально подтверждено, что переход от легированных бором базовых кристаллов кремния p-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см к легированным фосфором базовым кристаллам кремния n-типа проводимости с удельным сопротивлением 2 Ом·см при неизменности остальных элементов конструктивно-технологического решения

монокристаллических кремниевых ФЭП приводит к заметному снижению плотности диодного тока насыщения, в связи с чем удается повысить напряжение холостого хода, а следовательно и КПД рассматриваемых приборов.

### Литература

1. 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.
2. Антонова В.А., Борщев В.Н., Копач В.Р., Листратенко А.М., Слипченко Н.И., Тымчук И.Т. Тонкие текстурированные кремниевые фотопреобразователи с улучшенными массомощностными характеристиками // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. — 2004. — Вып. 139. — С. 113-119.
3. Zhao J., Wang A., Campbell P., et al. Proceedings of the 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 30-October 3, 1997; Anaheim, CA, P. 1133.
4. Fahrenbruch A.L., Bube R.H. Fundamentals of solar cells. Photovoltaic solar energy conversion. Academic Press, New York (1983).
5. Waver P., Schmidt A., Wagemann H. — G. Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, June 30-July 4, 1997; Barcelona, Spain, P. 2450.
6. Glunz S.W., Rein S., Warta W., et al. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, July 6-10, 1998; Vienna, Austria, P. 1343.
7. Schmidt J., Aberle A.G., Hezel R. Proceedings of the 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 30-October 3, 1997; Anaheim, CA, P. 13.
8. Keogh W., Cuevas A. Proceedings of the 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 30-October 3, 1997; Anaheim, CA, P. 199.
9. Kerschaver E., Einhaus R., Szlufcik J. Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, June 30-July 4, 1997; Barcelona, Spain, P. 2438.
10. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. — М.: Наука, 1985. — 280 с.
11. Möller H.J. Semiconductors for solar cells. — Boston: Artech House, 1993. — 426 p.