

## Моделювання вихідних параметрів кремнієвих фотоперетворювачів з базовими кристалами *i*-типу провідності

М.В. Кіріченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Фрунзе, 21, 61002 Харків, Україна

(Одержано 04.06.2014; у відреагованій формі – 26.11.2014; опубліковано online 29.11.2014)

Проведено експериментальне дослідження та моделювання із використанням програми PC1D вихідних параметрів лабораторних зразків фотоелектричних перетворювачів на основі монокристалічного кремнію *i*-типу електропровідності. Встановлено, що використання базових кристалів *i*-типу електропровідності в умовах опромінення АМО дозволяє отримувати рекордно високі значення густини фотоструму, котрі сягають 48,6 мА/см<sup>2</sup>. Проте їх коефіцієнт корисної дії не перевищує 11,6%. Для розробки фізично обґрунтованого підходу до оптимізації конструктивно-технологічних рішень проаналізовано електронну модель кремнієвого фотоелектричного перетворювача з *p*<sup>+</sup>-*i*-*n*<sup>+</sup> структурою. В ході апробації моделі було одержано серію діаграм розподілу значень коефіцієнта корисної дії досліджуваних фотоелектричних перетворювачів з *p*<sup>+</sup>-*i*-*n*<sup>+</sup> структурою залежно від значень послідовного і шунтувального опорів при густині діодного струму насичення 10<sup>-7</sup> А/см<sup>2</sup>, 10<sup>-8</sup> А/см<sup>2</sup> та 10<sup>-9</sup> А/см<sup>2</sup>. Наявність таких діаграм при проведенні розробки високоєфективних фотоперетворювачів зазначеного типу дозволить не тільки суттєво зменшити витрати на пошукові дослідження, але й забезпечить досягнення необхідного у кожному конкретному випадку оптимального співвідношення між витратами на покращення діодної структури та підвищенням рівнем коефіцієнта корисної дії таких приладів.

**Ключові слова:** Фотоперетворювач, Моделювання, Вихідні параметри.

PACS numbers: 89.30.CC, 72.40. + w

### 1. ВСТУП

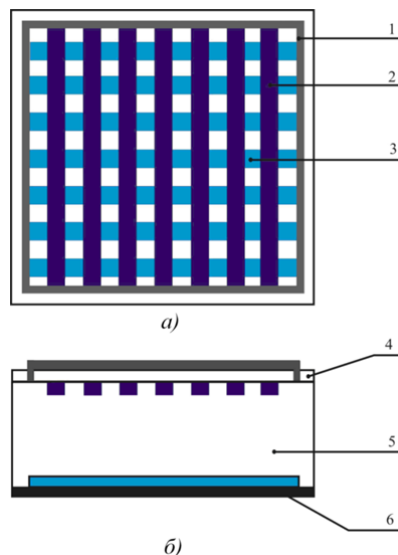
При досягнутому на даний час рівні розвитку вітчизняної електронної промисловості коефіцієнт корисної дії (ККД) кращих зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) вітчизняного виробництва з *n*<sup>+</sup>-*p*-*p*<sup>+</sup>-структурою при 25 °С та опроміненні в режимі АМО досягає 20% [1], що приблизно на 5% нижче за ККД кращих закордонних аналогів [2]. Така обставина обумовлена, перш за все зниженою приблизно у 1,2 рази густиною фотоструму вітчизняних ФЕП. Перспективним способом її збільшення є підвищення часу життя неосновних носіїв заряду в базовому кристалі ФЕП, наприклад, шляхом зниження концентрації легуючої домішки, тобто використання в якості базового кремнію *i*-типу електропровідності. Проте промисловий випуск ФЕП такої конструкції відсутній. В зв'язку з цим перспективною є розробка фізично обґрунтованого підходу до оптимізації конструктивно-технологічних рішень монокристалічних кремнієвих ФЕП з базовою *p*-*i*-*n*-структурою.

### 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження були 20 тестових зразків ФЕП з *p*<sup>+</sup>-*i*-*n*<sup>+</sup> структурою звичайної конструкції, котрі було виготовлено фахівцями Державного підприємства «Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування» (ДП НДТІП, м. Харків). Досліджувані ФЕП являли собою виготовлені в умовах дослідного виробництва ДП НДТІП тестові зразки на основі базових кристалів завтовшки 300 мкм з орієнтацією (100) і площею 1 см<sup>2</sup>, вирізаних з вищого методом зонної плавки монокристалічного зливка кремнію *i*-типу провідності.

Схематичне зображення досліджуваних ФЕП з боку перетину, перпендикулярного до цієї поверхні, та з

боку фронтальної поверхні показано на рис. 1. Загальна площа фотоприймальної поверхні складає 1 см<sup>2</sup>. Базовий шар кремнію *i*-типу провідності (5) товщиною 300 мкм має питомий опір 4000 Ом·см. Розташовані на фронтальній поверхні дифузійні *p*<sup>+</sup>-шари (2) товщиною 1,5 мкм з рівнем легування атомами бору  $N_a = 6 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> виконано у вигляді замкнутої решітки з кроком 100 мкм. Ширина кожної смуги цієї решітки складає 50 мкм, а всього на фронтальній поверхні розташовано 100 таких смуг. Ці смуги електрично



**Рис. 1** – Схематичне зображення тестового зразка ФЕП з *p*<sup>+</sup>-*i*-*n*<sup>+</sup> структурою з боку фронтальної поверхні (а) і з боку перетину (б), перпендикулярного до цієї поверхні

зв'язані між собою дифузійним кільцем (1) завширшки 200 мкм. На тильній поверхні структури розташо-

вано дифузійні  $n^+$ -шари (3) товщиною 1,5 мкм з рівнем легування фосфором  $N_d = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Виконані вони так само, як і  $p^+$ -шари, але розгорнуті відносно останніх під кутом  $90^\circ$ .

До  $p^+$ -областей, як і до  $n^+$ -областей, сформовано алюмінієві контакти (6). На фронтальну поверхню нанесено просвітлююче покриття з  $\text{TiO}_2$  товщиною 0,08 мкм.

Подробиці реалізації технологічних операцій процесу виготовлення тестових зразків ФЕП є предметом "ноу-хау" ДП НДТІП.

Світлові ВАХ тестових зразків ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою, вимірювались методом проти-ЕРС у режимі опромінювання АМО за методикою, реалізованою у [3]. Аналітичне опрацювання світлових ВАХ для розрахунку вихідних та світлових діодних параметрів, проводилося шляхом апроксимації експериментальних ВАХ теоретичною залежністю по розробленій оригінальній комп'ютерній програмі за методикою, описаною у [4].

### 3. ОПИС ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

#### 3.1 Вихідні параметри тестових ФЕП

Було встановлено закономірності у значеннях вихідних параметрів досліджених в ФЕП: з ростом густини струму короткого замикання спостерігалось зменшення напруги холостого ходу та фактора заповнення світлової ВАХ. Експериментальні світлові ВАХ тестових зразків з найбільшою різницею у значеннях вихідних параметрів ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою наведено на рис. 2. Розраховані на основі експериментальних даних вихідні і діодні параметри тестових зразків ФЕП, представлено у таблиці 1.

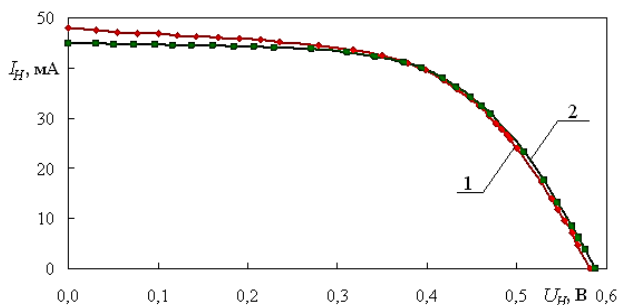


Рис. 2 – Експериментальні навантажувальні світлові ВАХ ФЕП з базовою  $p^+i-n^+$  структурою: 1 – зразок 1; 2 – зразок 2

Як видно з таблиці 1, досліджені тестові зразки ФЕП мають досить високі значення густини фотоструму, котрі перевищують досягнуті до сьогодні значення  $J_\phi$  для серійних вітчизняних ФЕП більш, ніж на  $4 \text{ мА/см}^2$  [1], що повинно було б призвести до помітного зростання їх ККД. Проте ККД досліджуваних ФЕП не перевищує 11,6 %, що пов'язано з високими значеннями густини діодного струму насичення і послідовного опору, а також з низьким шунтувальним опором. Високе значення густини діодного струму насичення обумовлене, в першу чергу, переважанням його рекомбінаційної компоненти. Низький шунтувальний опір ФЕП, обумовлено, найімовірніше, краєвими дислокаціями з хмарами Катрелла, що перегинають  $p-i-n$  структуру.

Таблиця 1 – Фотострум, вихідні та діодні параметри ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою

Номер ФЕП	1	2
$J_\phi$ , мА/см <sup>2</sup>	48,6	45,4
$J_{КЗ}$ , мА/см <sup>2</sup>	47,8	45,1
$U_{ХХ}$ , мВ	581	588
$FF$ , відн. од.	0,56	0,60
$P_{НМ}$ , Вт/м <sup>2</sup>	156,3	157,7
$J_{НМ}$ , мА/см <sup>2</sup>	38,3	38,0
$U_{НМ}$ , мВ	409	415
$\eta$ , %	11,5	11,6
$J_0$ , А/см <sup>2</sup>	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$
$A$ , відн. од.	2	2
$R_{П^*}$ , Ом·см <sup>2</sup>	1,7	1,7
$R_{Ш^*}$ , Ом·см <sup>2</sup>	99	249

Слід зазначити, що густина фотоструму ФЕП №1 складає  $48,6 \text{ мА/см}^2$  і практично дорівнює  $J_\phi$  кращих зарубіжних монокристалічних кремнієвих ФЕП [2]. Це дозволяє стверджувати про перспективу досягнення для ФЕП такого типу рекордно високих значень ККД. Проте, хоча густина фотоструму зразка №1 більше, ніж у зразка №2 на  $3,2 \text{ мА/см}^2$ , підвищене значення  $J_0$  і знижене значення  $R_{Ш^*}$  даного ФЕП призводять до пониженого значення його ККД на 0,1 % у порівнянні зі зразком № 2.

Таким чином, низька якість діодної структури досліджених тестових зразків ФЕП призводить до зниження значення ККД, який не перевищує 11,6 %. Проте високі значення  $J_\phi$  дозволяють прогнозувати реальну можливість досягнення вищої ефективності роботи ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою.

#### 3.2 Моделювання вихідних параметрів ФЕП із використанням програми PC1D

З викладеного вище випливає, що покращення якості діодної структури є необхідним етапом вдосконалення ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою. Проте, підхід, який полягає у експериментальному пошуку шляхів підвищення ефективності роботи ФЕП, є пов'язаним зі значними витратами матеріальних ресурсів і часу на створення удосконалених ФЕП та проведення комплексного кількісного аналізу їх рівня якості. Можливість моделювання ФЕП за допомогою ПЕОМ істотно розширює можливості комплексної атестації і прогнозування еволюції параметрів монокристалічних кремнієвих ФЕП, дозволяє ефективніше шукати шляхи оптимізації їх КТР та значно зменшує вартість досліджень.

Завдяки появі у вільному доступі у мережі Інтернет програми PC1D 5.9, спеціально розробленої в Університеті Нового Південного Уельсу (Австралія) [5] для моделювання роботи ФЕП та після вивчення досвіду її застосування [6] з'явилась можливість створити вельми точну електронну модель ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою та провести за її допомогою уточнення раніше отриманих результатів.

Програма PC1D 5.9 дозволяє задавати усі необхідні параметри, які визначають роботу ФЕП та

обумовлюють його ефективність. За допомогою цього програмного забезпечення було створено електронну модель ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою. Такі параметри базового кремнієвого кристалу ФЕП, як ширина забороненої зони, відносна діелектрична проникність, власна концентрація носіїв заряду, значення рухливості електронів і дірок, входили до складу програмного забезпечення PC1D 5.9. На рис. 3 зображено отриману електронну модель досліджуваного ФЕП з боку перетину, перпендикулярного до освітлюваної поверхні. При моделюванні враховувались такі характеристики досліджуваних ФЕП:

- рівень легування базового кристалу  $i$ -типу (2) –  $1,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , що відповідає його питомому опору  $4000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;
- товщини  $p^+$  (1) та  $n^+$  (3) шарів –  $1 \text{ мкм}$ , середній рівень їх легування при  $\text{erfc}$ -розподілі –  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  та  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , відповідно;
- товщина просвітлюючого покриття з  $\text{TiO}_2$  –  $53 \text{ нм}$ ;
- товщина пасивуючого шару з  $\text{SiO}_2$  –  $97 \text{ нм}$ ;
- швидкості рекомбінації на фронтальній та тильній поверхнях  $S_n = S_p = 10^3 \text{ м/с}$ , відповідно;
- час життя нерівноважних неосновних носіїв заряду  $\tau_n = \tau_p = \tau = 40 \text{ нс}$ ;
- опори шунтувальних елементів (5) в області  $p^+$ -і переходу та в області  $n^+$ -і переходу, відповідно,  $R_{ш1} = 90 \text{ Ом}$  і  $R_{ш2} = 250 \text{ Ом}$ ;
- послідовний опір (4)  $R_{л1} = 1,8 \text{ Ом}$ .

Моделювання роботи ФЕП проводилось при значенні його температури  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  і енергетичній освітленості його фронтальної поверхні  $P = 1360 \text{ Вт/м}^2$ , що відповідає одній сонячній сталій у режимі опромінення АМ0.

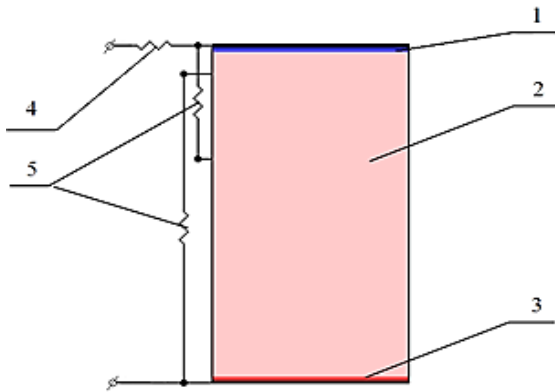


Рис. 3 – Схематичне зображення змодельованого ФЕП, що має  $p^+i-n^+$  структуру, з боку перетину, перпендикулярного до освітлюваної поверхні

Узагальненими результатами проведених досліджень впливу діодних параметрів на ККД приладів розглянутого типу є наведені на рисунках 4 та 5 діаграми розподілу значень ККД ФЕП з  $p^+i(n)-n^+$  структурою залежно від значень послідовного і шунтувального опорів при густині діодного струму насичення  $10^{-7} \text{ А/см}^2$ ,  $10^{-8} \text{ А/см}^2$  та  $10^{-9} \text{ А/см}^2$ .

Вказані діаграми дозволяють продемонструвати наочний зв'язок між заданим значенням одного або декількох діодних параметрів та максимально можливим при їх реалізації значенням ККД. Зауважи-

мо, що такі параметри як  $R_{л1}$ ,  $R_{ш}$  та  $J_0$  перш за все характеризують рівень досконалості діодної структури ФЕП, а отже, і технології виготовлення таких приладів та безпосередньо пов'язані з цим технологічним процесом. Тому у разі започаткування вітчизняним виробником розробки високоефективних ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою наявність таких діаграм дозволить суттєво зменшити витрати на пошукові дослідження та забезпечити досягнення необхідної у кожному конкретному випадку рівноваги між витратами на покращення діодної структури ФЕП та підвищенням рівнем ККД, який відповідатиме її параметрам.

Наведені результати демонструють можливість підвищення ККД досліджуваного ФЕП до  $14,0 \%$  при досягненні  $J_0 = 10^{-7} \text{ А/см}^2$  та підвищенні шунтувального опорів до  $190 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$  і до  $15,2 \%$  у разі наближення діодних параметрів досліджуваного ФЕП до  $R_{л1}^* = 0,88 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$  та  $R_{ш}^* = 270 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$  при збереженні  $J_0$  на рівні  $10^{-7} \text{ А/см}^2$ .

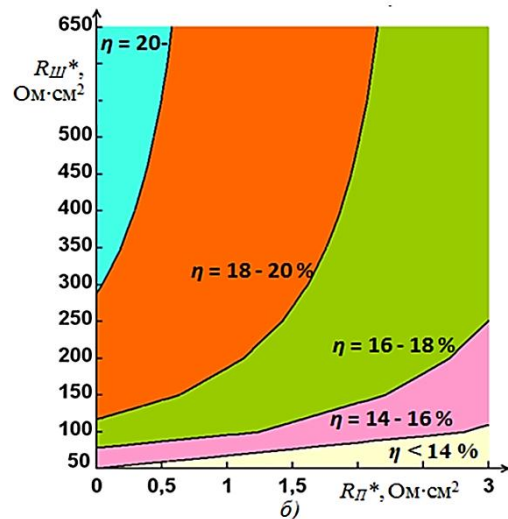
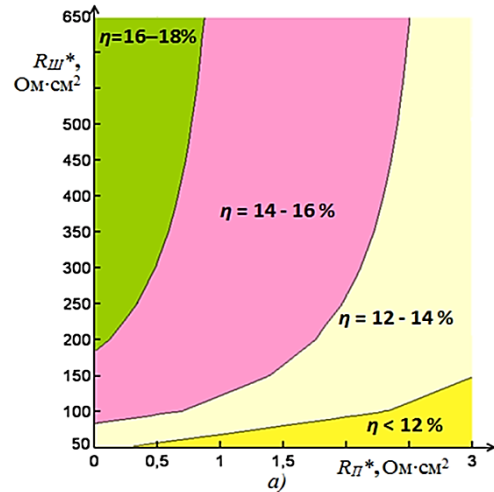


Рис. 4 – Діаграми розподілу значень ККД ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою залежно від значень послідовного і шунтувального опорів при густині діодного струму насичення  $10^{-7} \text{ А/см}^2$  (а) і  $10^{-8} \text{ А/см}^2$  (б)

Проведені розрахунки підтверджують також раніше вказану можливість збільшення ККД ФЕП з

$p^+i-n^+$  структурою до 19,9 % за умови досягнення параметрами діодної структури критеріальних значень для ФЕП стандартної конструкції ( $R_{II}^* = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ,  $R_{III}^* = 500 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ,  $J_0 = 10^{-8} \text{ А/см}^2$  [7]) та до 23,9 % у разі зменшення  $J_0$  до  $10^{-9} \text{ А/см}^2$ , що є цілком реальним для сучасної промисловості відповідного профілю.

Оптимізація параметрів діодної структури може бути проведена наступним чином. Зменшення числа рекомбінаційних центрів у одиниці об'єму кремнієвого кристала призведе до зниження густини діодного струму насичення. Підвищення шунтувального опору можна забезпечити за рахунок зменшення кількості мікротріщин, що пронизують базовий кристал (після попередніх операцій механічної поліровки і шліфівки), шляхом його потоншення методом глибокого хімічного травлення [7].

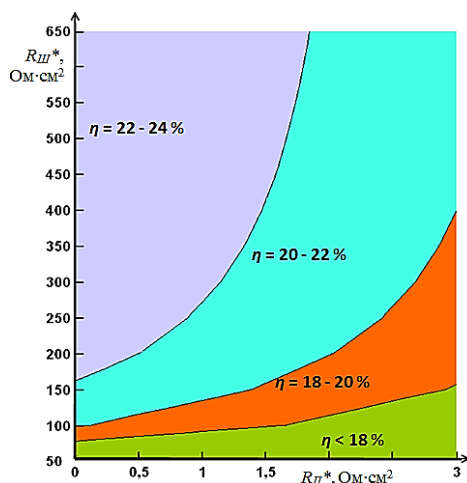


Рис. 5 – Діаграма розподілу значень ККД ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою залежно від значень послідовного і шунтувального опорів при густині діодного струму насичення  $10^{-9} \text{ А/см}^2$

А нанесення гребінчастої або сітчастої металізації поверх усієї площі фотоприймальної поверхні дозволить зменшити послідовний опір ФЕП, хоча у цьому випадку слід проводити додаткові розрахунки, спрямовані на досягнення рівноваги між мінімально можливими величиною послідовного опору ФЕП та рівнем затінення фотоприймальної поверхні ФЕП металевим електродом.

#### 4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що обмеження коефіцієнту корисної дії тестових зразків ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою, які мають рекордно високі значення густини фотоструму, на рівні 11,5-11,6 % обумовлено малим шунтувальним опором у  $249 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$  та високими густини діодного струму у  $10^{-7} \text{ А/см}^2$  та послідовним опором у  $1,7 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ .

Комп'ютерне моделювання коефіцієнту корисної дії ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою показало, що при досягненні густини діодного струму насичення  $10^{-9} \text{ А/см}^2$ , шунтувального і послідовного електроопорів  $500 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$  і  $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ , відповідно, та при збереженні густини фотоструму  $48,6 \text{ мА/см}^2$  можливо досягнення рекордного значення ККД у 24 %.

Вперше одержано серію діаграм розподілу значень ККД фотоелектричних перетворювачів з  $p^+i-n^+$  структурою залежно від значень послідовного і шунтувального опорів та густини діодного струму насичення. Наявність таких діаграм з урахуванням реальних в умовах вітчизняного виробника можливостей подальшого удосконалення ФЕП з  $p^+i-n^+$  структурою дозволить не тільки суттєво зменшити витрати на пошукові дослідження, але й забезпечить досягнення необхідного у кожному конкретному випадку оптимального співвідношення між витратами на покращення діодної структури ФЕП та підвищеним рівнем ККД таких приладів, який відповідатиме її удосконаленим діодним параметрам.

### Моделирование выходных параметров кремниевых фотопреобразователей с базовыми кристаллами $i$ -типа проводимости

М.В. Кириченко

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

Проведено експериментальне дослідження і моделювання з використанням програми PC1D вихідних параметрів лабораторних образців фотоелектричних преобразователей на основі монокристалічного кремнію  $i$ -типа електропровідності. Установлено, що використання базових кристаллів  $i$ -типа електропровідності в умовах облучення АМО дозволяє отримувати рекордно високі значення густини фототока, досягаючи  $48,6 \text{ мА/см}^2$ . Однак їх коефіцієнт корисної дії не перевищує 11,6 %. Для розробки фізически обґрунтованого підходу к оптимізації конструктивно-технологіческес рішень проаналізована електронна модель кремнієвого фотоелектрического преобразователя з  $p^+i-n^+$  структурою. В ході апробації моделі була отримана серія діаграм розподілу значень коефіцієнта корисної дії досліджуваних фотоелектрических преобразователей з  $p^+i-n^+$  структурою в залежності від значень послідовного і шунтувального опорів при густині діодного струму насичення  $10^{-7} \text{ А/см}^2$ ,  $10^{-8} \text{ А/см}^2$  і  $10^{-9} \text{ А/см}^2$ . Наявність таких діаграм при проведенні розробки висококоefficientивних фотопреобразователей указанного типа дозволить не тільки суттєво зменшити витрати на пошукові дослідження, але й забезпечити досягнення необхідного в кожному конкретному випадку оптимального співвідношення між витратами на покращення діодної структури та підвищеним рівнем коефіцієнта корисної дії таких приладів.

**Ключевые слова:** Фотопреобразователь, Моделирование, Выходные параметры.

## Modeling of Output Parameters of the Silicon Solar Cells with *i*-Type Conductivity Base Crystals

M.V. Kirichenko

*National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", 21, Frunze Str., 61002 Kharkiv, Ukraine*

It was carried out the experimental investigation and modeling of the solar cells based on single crystal silicon with *i*-type conductivity laboratory samples output parameters using PC1D program. It has been found that use of *i*-type conductivity base crystals under AM0 irradiation allows to reach the record high photocurrent density values up to 48.6 mA/cm<sup>2</sup>. However, their efficiency does not exceed 11.6 %. To develop the physically based approach to optimize construction-technological solutions it has been analyzed the electronic model of silicon solar cells with *p*<sup>+</sup>-*i*-*n*<sup>+</sup> structure. During the testing of the model we have obtained a series of diagrams with distribution of the investigated solar cells with *p*<sup>+</sup>-*i*-*n*<sup>+</sup> structure efficiency values, depending on the values of series and shunt resistances at the diode saturation current density of 10<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup> and 10<sup>-8</sup> A/cm<sup>2</sup> 10<sup>-9</sup> A/cm<sup>2</sup>. Availability of these diagrams during the development of such type highly effective solar cells will not only significantly reduce the cost of exploratory research but also will produce the required in each particular case an optimum ratio between the costs of diode structure improving and increased level of such devices efficiency.

**Keywords:** Solar cell, Modeling, Output parameters.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. А.П. Оксанич, В.А. Тербан, С.О. Волохов, та ін., *Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії* (Кривий Ріг: Мінерал: 2010).
2. M.A. Green, K. Emery, Y. Hisikawa, W. Warta, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **22**, 1 (2014).
3. Р.В. Зайцев, М.В. Кириченко, Н.М. Харченко, Е.А. Лукьянов, *III Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ-2014)*, 107 (Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського: 2014).
4. E. Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens, *Proc. 14th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, 2438 (Belgium: Leuven, 1997).
5. D.A. Clugston, P.A. Basore, *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 207 (USA: Anaheim: 1997).
6. S. Sepeai, S.H. Zaidi, M.K.M. Desa, M.Y. Sulaiman, N.A. Ludin, M.A. Ibrahim, K. Sopian, *J. Energy Technol. Policy* **3** No 5, 1 (2013).
7. М.М. Колтун, *Оптика и метрология солнечных элементов*, (Москва: Наука: 1985).