

УДК 621.315.592
PACS number(s): 7, 70, 82.17, 84.60

ШЛЯХИ ЗБІЛЬШЕННЯ ККД СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ МУЛЬТИКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

Е. Алієв, О. Яновський

*Запорізький національний університет
вул. Жуковського, 66, 69600 Запоріжжя, Україна
e-mail: studio@aliev-elchin.com, yanovsky@zsu.zp.ua*

Досліджено фізичні процеси, які покладені в основу фотоелектричних систем. Для моделювання фізичних процесів і розрахунків основних параметрів сонячних елементів було використане програмне забезпечення PC1D версії 5.9. Визначено шляхи збільшення ККД сонячних елементів. Було проаналізовано втрати енергії, що надзвичайно корисно при оптимізації конструкцій елементів. Теоретично оцінено значення максимального ККД сонячного елемента.

Ключові слова: сонячні елементи, мультикристалічний кремній, програмне забезпечення PC1D, аналіз втрат енергії сонячного елемента.

Фотоелектроенергетика є простим і елегантним методом використання сонячної енергії. Фотоелектричні пристрої (сонячні елементи) є унікальними в тому плані, що вони перетворюють падаюче сонячне випромінювання в електроенергію безпосередньо, без шуму, забруднень, використання рухомих частин, що робить їх надійним і довговічним джерелом енергії. В основу роботи сонячних елементів покладено ті ж самі принципи і матеріали, завдяки яким сталася революція в засобах комунікації та обчислювальній техніці [1].

Метою роботи є теоретичне дослідження фізичних процесів, які лежать в основі фотоелектричних систем, технологій їх виготовлення і конструкції фотоелектричних перетворювачів.

Наукова і практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що математичні моделі, методики і програмні засоби чисельного моделювання сонячних елементів і технологій їх виготовлення дозволять виробити обґрунтовані рекомендації з розробки технологічних процесів і методів проектування сонячних елементів.

З метою моделювання фізичних процесів і розрахунків основних параметрів сонячних елементів було використане програмне забезпечення, яке розробили дослідницьким центром фотоелектричних систем університету Нового Південного Уелса у Сідней Пауль А. Басоре и Дональд А. Клагстон, під назвою PC1D версія 5.9. Комп'ютерна програма PC1D широко використовується для моделювання кристалічних сонячних елементів. Ця версія програми має низку переваг: інтерактивне графічне середовище для створення моделі сонячного елемента, простота зіставлення експериментальних і теоретичних результатів, дуже висока обчислювальна здатність,

покращена модель ефектів генерації і рекомбінації. Акцент в цій програмі зроблено на достовірних відомостях широкого діапазону параметрів елементів і граничних умов.

Моделювання характеристик сонячного елемента в програмі PC1D полягає в числовому методі розв'язку рівнянь (два рівняння перенесення Больцмана і рівняння Пуассона), керуючись геометрією пристрою і спектра випромінювання. Ці рівняння розв'язуються спільно з використанням схеми дискретизації.

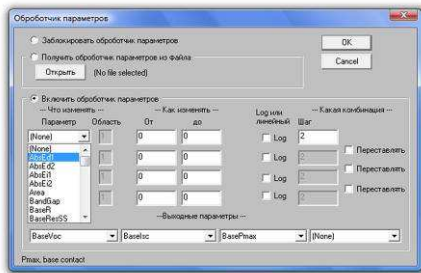


Рис. 1. Интерфейс функции “Обробник параметрів”

Програма PC1D має відкритий код, і тому в ході моделювання було прийнято рішення додати нову процедуру для розрахунків (під назвою “Обробник параметрів”). Процедура “Обробник параметрів” (рис. 1) призначена для швидких підрахунків значень вихідних даних під час варіювання параметрами сонячного елемента.

Унаслідок використання цієї процедури складається таблиця, в якій записані всі значення вхідних параметрів і відповідно для них розраховані вихідні дані. Керуючись цією таблицею, можна легко визначити при яких значеннях вхідних параметрів вихідні є

максимальними.

Окрім створення процедури, програма PC1D була перекладена українською мовою, а також створена детальна інструкція з користування цим програмним забезпеченням.

Для проведення розрахунків був вибраний найраціональніший алгоритм, який мав не лише практичний, але і методичний характер.

Параметри сонячного елемента можна умовно розділити на три групи: параметри пристрою, параметри матеріалу і параметри збудження. Дослідження проводилися на моделі сонячного елемента на основі комерційного мультикристалічного кремнію. Варіюючи параметрами кожної групи, за допомогою процедури “Обробник параметрів” були отримані такі їх комбінації, при яких ефективність сонячного елемента була максимальною.

На моделі сонячного елемента досліджувалися залежності струму короткого замикання, напруги холостого ходу, коефіцієнта заповнення і коефіцієнта корисної дії від таких параметрів: температура, товщина текстурованого шару, площа пристрою, концентрація легуючих домішок, коефіцієнт поглинання і час життя нерівноважних носіїв заряду.

Виходячи з результатів моделювання, високу ефективність фотоелектричних перетворювачів можна досягти варіюючи комбінаціями його параметрів. ККД сонячного елемента можна підвищити, формуючи електричне поле біля тильної поверхні за рахунок градієнта концентрації домішки. За рахунок підвищення часу життя в базовому шарі майже досягнуте граничне оптимальне значення струму короткого замикання J_{SC} , втрати на відбиття світла мінімізовані в текстурованих елементах, зростання J_{SC} поліпшено за рахунок поглинаючих властивостей. Зростання коефіцієнта заповнення ff і напруги холостого ходу V_{OC} досягнуто через оптимізацію концентрацій носіїв заряду і профілів в базовому і дифузійних шарах.

У високоефективних сонячних елементах з метою зниження опору бази R_S і збільшення V_{OC} була збільшена концентрація легуючих домішок N_D в дифузійному шарі; концентрація акцепторних домішок N_A в базі може бути при цьому різною.

Зі зростанням концентрації носіїв заряду по обидві сторони від переходу струм насичення повинен зменшуватися, і при $N_A = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ККД повинен досягати максимального значення близько 22% (при АМ1.5). Звичайно, коли концентрація акцепторів N_A (у випадку бази p -типу) стає дуже високою, зменшення μ_n і τ_n зумовлює зниження J_{SC} при $N_A > 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (питомий опір базового шару p -типу близько 0,05 Ом·см). Ця обставина суттєво відбивається на ККД сонячного елемента.

Аналіз втрат енергії надзвичайно корисний при оптимізації елементів. Оцінивши перспективи зниження втрат енергії кожного виду, оптимізацію приладів можна проводити, усуваючи втрати якого-небудь одного вигляду.



Рис. 2. Аналіз втрат енергії

Втрати енергії (рис. 2) можна розділити на такі основні складові [2]:

1. Фотоактивне поглинання фотонів з енергією більше ширини забороненої зони, що супроводжує подальшу рекомбінацію на фронтальній поверхні і термалізацію гарячих носіїв заряду, які генеруються цими фотонами.
2. Проходження через елемент фотонів низьких енергій, що не супроводжуються генерацією електронно-діркових пар.
3. Неповне збирання носіїв заряду, що генеруються.
4. Рекомбінаційні втрати носіїв заряду в переході, що визначаються діодними параметрами.
5. Омичні втрати потужності на послідовному і шунтуючому опорах (що зазвичай враховуються у коефіцієнті заповнення).
6. Втрати на відбиття.
7. Затінювання поверхні контактною сіткою.

Серед перелічених видів втрат енергії лише два перших є неусувними, якщо лише не застосовуються структури зі змінною шириною забороненої зони або оптичні пристрої з розділенням спектра сонячного випромінювання. Втрати третього і четвертого видів визначаються як законами термодинаміки, що накладають обмеження

на ефективність розділення носіїв заряду, так і власне діодними параметрами. Останні види втрат належать до тих, що можуть бути усуненими.

З урахуванням аналізу втрат енергії були проведені розрахунки за допомогою програмного забезпечення PC1D, з яких видно, що максимальний теоретичний ККД сонячного елемента становить 25,4% (за умови освітлення сонячним випромінюванням зі спектром АМ1.5 з урахуванням всієї площі елемента).

На основі теоретичних досліджень фізичних процесів фотоелектричних систем був створений інформаційний портал, присвячений фотоелектроенергетиці (solar.aliev-elchin.com). Портал створено для людей, що бажають отримати базові уявлення про принципи роботи і конструкції кремнієвих сонячних елементів і фотоелектричних систем на їхній основі.

-
1. Чопра К. Тонкопленочные солнечные элементы. Пер. с англ. с сокращениями / К. Чопра, С. Дасю. – М. : МИФИ, 1996. – 435 с.
 2. Фаренбрух А. Солнечные элементы. Теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 280 с.

WAYS OF INCREASE IN EFFICIENCY OF SOLAR ELEMENTS BASED ON MULTICRYSTAL SILICON

E. Aliev, A. Yanovskyi

Zaporizhzhya national university
Zhukovskogo Str., 66, 69600 Zaporizhzhya, Ukraine
e-mail: studio@aliev-elchin.com, yanovskyi@zsu.zp.ua

Physical processes that determine photoelectric systems characteristics were investigated. For modeling of physical processes and calculations of main parameters of solar elements PC1D software (version 5.9) has been used. Ways of efficiency increase of solar elements are defined. The analysis of energy losses, which is extremely useful for optimization of solar cell design, has been fulfilled. The maximum efficiency of a solar element has been estimated theoretically.

Key words: solar elements, multicrystalline silicon, software PC1D, the analysis of losses of energy of a solar cell.

**ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ КПД СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ
МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ****Э. Алиев, А. Яновский**

*Запорожский национальный университет
ул. Жуковского, 66, 69600 Запорожья, Украина
e-mail: studio@aliev-elchin.com, yanovsky@zsu.zp.ua*

Исследованы физические процессы, которые лежат в основе фотоэлектрических систем. Для моделирования физических процессов и расчетов основных параметров солнечных элементов было использовано программное обеспечение PC1D версии 5.9. Установлены пути увеличения КПД солнечных элементов. Был сделан анализ потерь энергии, который очень полезен при оптимизации конструкции элементов. Теоретически оценено значение максимального КПД солнечного элемента.

Ключевые слова: солнечные элементы, мультикристаллический кремний, программное обеспечение PC1D, анализ потерь энергии солнечного элемента.

Стаття надійшла до редколегії 09.06.2009
Прийнята до друку 07.06.2010