

І. Г. Кирисов¹
П. Ф. Буданов¹
Е. А. Хом'як¹
К. Ю. Бровко¹

ПІДХОДИ ТА ВИМОГИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ШАРУ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

¹Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

Розглянуті та проаналізовані існуючі моделі сонячного елемента. Встановлено, що ці моделі досліджують: залежність нормованої щільності струму від напруги зі зміною товщини фотоелектричного перетворювача, фотоелектричні характеристики фотоелектричного перетворювача в залежності від температурного коефіцієнта та різних умов освітленості. В моделях показано, що з підвищенням температури знижується значення величини коефіцієнта корисної дії, струму, коефіцієнта заповнення вольт-амперної характеристики. Аналіз моделей показав, що розрахунок основних електрофізичних параметрів (струм короткого замикання, напруга холостого ходу) виконується без урахування змін площі активної сприймаючої поверхні рельєфу напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Це істотно впливає на розрахунок величини вихідної потужності та коефіцієнта корисної дії, а також знижує точність та стабільність вольт-амперної та вольт-ватної характеристик сонячного елемента. Для розрахунку величини реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача, запропоновано використати зміни властивостей внутрішньої структури напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Проведено дослідження моделі сонячного фотоелектричного перетворювача з урахуванням загальної геометричної площі поверхневого напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача. Для дослідження впливу властивостей реальної сприймаючої поверхні на вихідні параметри фотоелектричного перетворювача запропоновано використовувати модель, в якій враховується загальна геометрична площа. За результатами моделювання фотоелектричного перетворювача за допомогою програми MathCAD, побудовані вольт-амперні характеристики фотоелектричного перетворювача з геометричною площею та з реальними площами поверхні фотоелектричного перетворювача. Виявлено, що криві вольт-амперної характеристики для реальних площ сприймаючої поверхні відрізняються від кривої для геометричної топологічної площі. Запропоновано розрахунок площі активної сприймаючої поверхні рельєфу напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача проводити на основі моделювання процесів в структурі напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача.

Ключові слова: сонячний елемент, фотоелектричний перетворювач, вольт-амперна характеристика, вихідна потужність, коефіцієнт корисної дії.

Вступ

Аналіз зарубіжної та вітчизняної літератури [1]–[5] показав, що у більшості робіт, досліджуються в основному моделі сонячних елементів (СЕ), в яких вольт-амперні характеристики (ВАХ) та вольт-ватні характеристики (ВВХ) фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), залежать від рівня інтенсивності сонячного випромінювання, кута нахилу до сонця і температури. Для опису основних параметрів ФЕП в таких моделях [1]–[5] досить часто використовуються численні обмеження і припущення щодо реальної сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП. Наслідки цих обмежень і припущень спостерігаються і у відхиленнях, отриманих для значень ВАХ і ВВХ ФЕП, а також впливають на вихідну потужність і коефіцієнт корисної дії (ККД) СЕ. Низька якість і дефекти реальної сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП, впливають на один з

основних параметрів СЕ — коефіцієнт заповнення ВАХ, за яким можна судити про якість ФЕП. Таким чином, в результаті того, що в відомих моделях [1]—[5] не враховується реальна сприймаюча поверхня, значно знижується величина вихідної потужності та ККД, тому запропонована модель сонячного елемента, з урахуванням фізичних процесів у рельєфі напівпровідникового шару ФЕП.

Метою статті є підвищення точності та стабільності ВАХ і ВВХ наявних моделей ФЕП на основі врахування змін площі сприймаючої поверхні з урахуванням рельєфу.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі задачі:

1. Аналіз існуючих моделей сонячних елементів;

2. Розробка нового підходу до розрахунку площі активної сприймаючої поверхні ФЕП на основі використання внутрішніх властивостей структури напівпровідникового шару ФЕП.

У роботі [1] розглядається залежність нормованої щільності струму від напруги у разі зміни товщини ФЕП. Зі зміною значень товщини ФЕП від 1 до 9 мм, максимальному значенню струму відповідає мінімальне значення напруги (за товщини 9 мм) і навпаки. При цьому не спостерігається залежність зміни електрофізичних величин від геометричних параметрів рельєфу напівпровідникового шару ФЕП.

У роботі [2] розглянута математична модель ФЕП, яка дозволяє описати ВАХ тільки за різних умов освітленості, що не дозволяє підвищити стабільність ВАХ та ВВХ. Ця модель вже широко застосовується для моделювання і аналізу СЕ, але все ж вона дає незначні, а іноді небажані відхилення від ВАХ реального СЕ. Одна з причин таких відхилень — це певні складнощі у вимірюванні послідовного опору в сприймаючій поверхні напівпровідникового шару ФЕП.

У роботі [3] досліджуються фотоелектричні характеристики ФЕП в залежності від температурного коефіцієнта, для отримання оптимальних значень потужності, струму, напруги, граничного ККД ФЕП. Показано, що з підвищенням температури в інтервалі від -100 до 250 °С знижується значення величини ККД, струму, коефіцієнта заповнення ВАХ, за різних концентрацій сонячного випромінювання, без урахування змін рельєфу напівпровідникового шару ФЕП.

Необхідно зазначити, що використання концентрованого сонячного випромінювання дозволяє наблизитися до граничного теоретичного ККД напівпровідникових ФЕП, але тільки у разі зміни реальної конструкції і площі СЕ. Це дозволяє істотно підвищити ККД їх реальних конструкцій, а значить необхідно враховувати величину площі сприймаючої поверхні рельєфу напівпровідникового шару ФЕП.

Результати досліджень

Для визначення реальної площі сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП, за наявності ушкоджуючих дефектів, запропоновано використати зміни властивостей внутрішньої структури напівпровідникового шару ФЕП.

В роботі проведено дослідження моделі сонячного ФЕП з урахуванням загальної геометричної площі поверхневого напівпровідникового шару ФЕП. Для дослідження впливу властивостей реальної сприймаючої поверхні на вихідні параметри ФЕП запропоновано використовувати модель для визначення фотоструму (I_F), з урахуванням загальної геометричної площі (S_Σ) поверхневого напівпровідникового шару ФЕП

$$I_{sc} = \frac{F_0 e}{h\nu} (1 - R) \eta K_c S_\Sigma, \quad (1)$$

де F_0 — вхідний світловий потік; e — заряд електрону; h — постійна Планка; ν — частота світлового потоку; R — коефіцієнт відображення світлового потоку від фронтальної поверхні; η — коефіцієнт відбитого світлового потоку фронтальної поверхні; K_c — інтегральний коефіцієнт збирання носіїв; S_Σ — загальна геометрична площа поверхні напівпровідникового шару ФЭП.

Позаяк паралельно до джерела струму включений р-п-перехід, то струм, що проходить через діод I_D , визначається за виразом

$$I_D = I_{rsc} \left[\exp\left(\frac{U}{\phi_T}\right) - 1 \right] = I_{ON} \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

де I_{rsc} — зворотний струм насичення діода; U_V — вихідна напруга; $\phi = \frac{kT}{e}$ — тепловий потенціал; k — постійна Больцмана; T — абсолютна температура; e — заряд електрона.

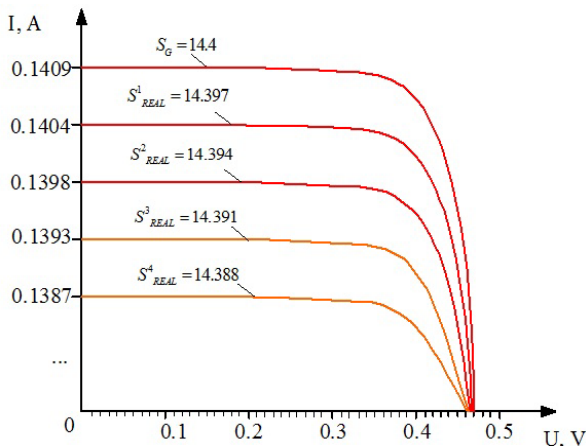
Тоді, з урахуванням виразів (1) і (2), можна записати аналітичні вирази для моделі ФЕП, що зв'язують струм навантаження I_N і вихідну напругу U_N , із загальною площею S_Σ

$$I_N = \frac{F_o e}{h\nu} \cdot (1-R) \eta K_c S_\Sigma - I_{ON} \left[\exp\left(\frac{e(U_V + I_N R_p)}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U_V + I_N}{R_S}; \quad (3)$$

$$U_N = \left(\frac{kT}{e}\right) \cdot \ln\left(\frac{\left[\frac{F_o e}{h\nu} (1-R) \eta K_c S_\Sigma\right] - I_N}{I_0} + 1\right), \quad (4)$$

де A — діодний коефіцієнт; R_p — послідовний опір; R_S — шунтовий опір.

Використовуючи програму MathCAD, за аналітичними виразами (3) і (4) моделі ФЕП побудовані ВАХ ФЕП з геометричною площею та з реальними площами поверхні ФЕП (рисунок).



Вольт-амперна характеристика ФЕП для геометричної площі топологічної поверхні S_G та реальних площ S_{REAL} сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП

Як видно з графіка (рис. 1), криві ВАХ для реальних площ сприймаючої поверхні, відрізняються від кривої для геометричної топологічної площі. Таким чином ВАХ побудовані з урахуванням реальної площі поверхні напівпровідникового шару ФЕП мають вищу точність і стабільність, щодо визначення вихідних параметрів ФЕП.

Обговорення отриманих результатів

Для опису основних параметрів ФЕП в розрахункових моделях [1]—[5] досить часто використовуються численні обмеження і припущення щодо реальної сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП. Обмеження і припущення в наявних моделях, призводять до відхилень, отриманих для значень ВАХ і ВВХ ФЕП, а також впливають на вихідну потужність і ККД СЕ. Дефекти рельєфу поверхні ФЕП, впливають на реальну

площу напівпровідникового шару ФЕП.

Основним результатом проведених досліджень є те, що для вдосконалення існуючих моделей ФЕП, запропоновані нові аналітичні залежності для встановлених вихідних параметрів з урахуванням зміни геометричних параметрів активної сприймаючої площі поверхні напівпровідникового шару ФЕП.

Висновки

1. Проведений аналіз існуючих моделей показав, що для точного розрахунку основних електрофізичних параметрів СЕ, необхідно враховувати реальну площу сприймаючої поверхні напівпровідникового шару ФЕП.
2. Запропонований підхід, щодо розрахунку величини площі активної сприймаючої поверхні, дозволяє отримати стабільнішу та точнішу вольт-амперну характеристику під час визначення величин вихідних параметрів ФЕП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Н. В. Литвин, Н. В. Капустина, и В. Д. Власова, «Моделирование параметров элементов солнечных батарей,» *Мониторинг наука и технологи*, № 1 (43), с. 40-44, 2020.
- [2] А. В. Левшов, А. Ю. Фёдоров, и А. В. Молодиченко, «Математическое моделирование фотоэлектрических солнечных элементов,» *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Електротехніка і енергетика*, № 11 (186), с. 246-249, 2011.
- [3] В. М. Евдокимов, и В. А. Майоров, «Методы расчета и исследование предельных энергетических и тепловых характеристик фотоэлектрических преобразователей солнечного концентрированного излучения,» *Вестник ВИЭСХ*, № 1 (26), с. 111-121, 2017.
- [4] Я. С. Буджак, В. Ю. Срохов, и И. И. Мельник, «Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками,» *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 4/8 (52), с. 24-29, 2011.
- [5] Б. Н. Шарифов, и Т. Р. Тергулов, «Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/SIMULINK,» *Вестник УГАТУ*, т. 19, № 4 (70), с. 77-83, 2015.

Кирисов Ігор Геннадійович — аспірант кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: kirisovuipa1980@gmail.com ;

Буданов Павло Феофанович — канд. техн. наук, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ;

Хом'як Едуард Олександрович — аспірант кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: eakhomiak@gmail.com ;

Бровко Костянтин Юрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, e-mail: brovkokonstantin@gmail.com .

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

I. H. Kyrsov¹
P. F. Budanov¹
E. O. Khomiak¹
K. Yu. Brovko¹

Approaches and Requirement for the Design of Structure of Semiconductor Layer of Sunny Element

¹Ukrainian Engineer-Pedagogical Academy, Kharkiv

The existing models of the solar cell are considered and analyzed. It was established that the existing models investigate: the dependence of the normalized current density on the voltage when the thickness of the photoelectric layer of the photoelectric converter, photoelectric characteristics of the photoelectric converter depending on the temperature coefficient and different light conditions. The models show that with an increase in temperature, the value of the utility coefficient, current, the fill coefficient of the volt-ampere characteristic is reduced. The analysis of models showed that a calculation over of basic electrophysics parameters (current of short circuit, tension of idling) was brought without the account of changes of size of area active to the perceiving surface of relief of semiconductor layer of photo-electric transformer. It substantially influences on the calculation of size of initial power and output-input ratio, and also the volt-ampere u volt of wadding reduces exactness and stability descriptions of sunny element. For the calculation of size of the real area of perceiving surface of semiconductor layer of photo-electric transformer, it offers to use the changes of properties of underlying structure of semiconductor layer of photo-electric transformer. A study of model of sunny photo-electric transformer is undertaken taking into account the general geometrical area of superficial semiconductor layer of photo-electric transformer. For research of influence of properties of the real perceiving surface on the initial parameters of photo-electric transformer, it offered to use a model a general geometrical area is taken into account in that. On results the design of photo-electric transformer by means of the program MathCAD, built by a volt-ampere descriptions of photo-electric transformer with a geometrical area and with the real areas of surface of photo-electric transformer. It is educed, that curves of volt-ampere description for the real areas of perceiving surface, differ from a curve for a geometrical topological area. It is proposed to calculate the area of the active receiving surface of the relief of the semiconductor layer of a photoelectric converter, based on the simulation of processes in the structure of the semiconductor layer of a photoelectric converter.

Keywords: sunny element, photo-electric transformer, volt-ampere description, initial power, output-input ratio.

Kyrsov Ihor H. — Post-Graduate Student of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Electric Power Engineering, e-mail: kirisovuipa1980@gmail.com ;

Budanov Pavlo F. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ;

Khomiak Eduard O. — Post-Graduate Student of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Electric Power Engineering, e-mail: eakhomiak@gmail.com ;

Brovko Kostiantyn Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, e-mail: brovkokonstantin@gmail.com