

К. ф.-м. н. В. В. ЧЕРНЕНКО, д. ф.-м. н. В. П. КОСТИЛЬОВ, к. т. н. Р. М. КОРКІШКО,
Б. Ф. ДВЕРНІКОВ, PhD Д. В. ПЕКУР, к. т. н. Ю. В. КОЛОМЗАРОВ,
к. т. н. В. І. КОРНАГА, д. т. н. В. М. СОРОКІН

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: vvch1988@gmail.com

КОНЦЕНТРАТОРНИЙ ФОТОНЕРГЕТИЧНИЙ МОДУЛЬ НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Представлено конструкторсько-технологічні рішення щодо виготовлення сонячного фотоенергетичного модуля (ФМ) на основі кремнієвих фотоперетворювачів із тиловим розміщенням колекторного р–n-переходу та обох контактних електродів. Розроблений ФМ призначений для використання в сонячній електростанції з концентратором. Проведено експериментальні та теоретичні дослідження фотоелектричних характеристик виготовленого ФМ в умовах неконцентрованого та слабкоконцентрованого сонячного випромінювання. Встановлено, що використані сонячні фотоперетворювачі мають досить низький послідовний опір, а сонячний ФМ — високу ефективність фотоелектричного перетворення.

Ключові слова: кремнієвий фотоперетворювач, контактні електроди, тилове розташування, фотоенергетичний модуль, сонячне випромінювання, концентратор.

Актуальність досліджень екологічно чистих, поновлюваних фотовольтаїчних джерел енергії не викликає сумніву. Але ані високі темпи зростання виробництва промислових фотоелектричних модулів (ФМ) для прямого перетворення енергії Сонця в електричну, ані зниження їх вартості поки що не можуть забезпечити суттєві конкурентні переваги ФМ порівняно з традиційними методами отримання енергії. Одним зі шляхів розвитку тут є підвищення ефективності процесів фотоелектричного перетворення для зменшення вартості виробництва одиниці енергії [1, 2].

Одним з ефективних методів зменшення вартості виробництва одиниці енергії є використання геліоенергетичних установок з концентраторами, які фокусують на фотоперетворювач (ФП) невеликої площі сонячне випромінювання, зібране з більшої площі, та забезпечують значно вищий рівень енергетичної освітленості, ніж при використанні натурального неконцентрованого сонячного випромінювання. При цьому збільшується вихідна потужність фотоперетворювача та знижується вартість отриманої енергії, адже не потрібно використовувати багато відносно дорогих фотоперетворювачів, біля половини вартості яких складає вартість напівпровідникового матеріалу, з якого вони виготовляються. В таких геліоенергетичних установках можуть використовуватися концентратори різного типу: параболо-циліндричні, сферичні, на основі лінз, дзеркал тощо [3, 4].

При створенні концентраторних геліоенергетичних установок необхідно розв'язати дві важливі зада-

чі: мінімізувати послідовний опір та ефективно відвести тепло від напівпровідникового фотоперетворювача. Важливість охолодження фотоперетворювача обумовлюється надмірним його нагрівом при освітленні концентрованим сонячним опроміненням, що призводить до зниження ефективності фотоелектричного перетворення в цілому [5–7]. Крім того, для забезпечення якісної концентрації сонячного випромінювання та фокусування його на фотоприймальну поверхню фотоперетворювача вкрай важливо забезпечити точну орієнтацію установки на Сонце, що зазвичай досягається використанням автоматичних систем орієнтації.

Метою цієї роботи було розроблення необхідних конструктивно-технологічних рішень і виготовлення спеціалізованого фотоенергетичного модуля, призначеного для використання в складі геліоенергетичної установки з параболо-циліндричним концентратором, та дослідження параметрів і характеристик цього модуля.

Конструктивно-технологічні особливості фотоенергетичного модуля

Для досягнення поставленої мети було розроблено та створено [8, 9] геліоенергетичну установку з параболо-циліндричним концентратором, показано на **рис. 1**. Установка має систему автоматичної орієнтації на Сонце і забезпечує приблизно 20-кратну концентрацію сонячного випромінювання в робочій зоні, де має розміщуватись фотоенергетичний модуль.

Для ефективної роботи в складі концентраторного ФМ фотоперетворювач повинен мати не лише високе значення коефіцієнта корисної дії, але й низький послідовний опір, негативний вплив якого зна-

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України в рамках грантового дослідницького проекту №2022.01/0037.



Рис. 1. Концентраторна геліоенергетична установка (1) з місцем для встановлення фотоенергетичного модуля (2)

чно зростає при збільшенні величини струму короткого замикання ФП внаслідок концентрації сонячного випромінювання. Дослідження наявних на ринку фотоперетворювачів різних типів показали, що зазначеним критеріям відповідають кремнієві ФП фірми SunPower з тилowym розміщенням колекторного переходу та обох контактних електродів [10]. Завдяки розташуванню робочого колекторного переходу біля тилової поверхні дещо зменшиться його нагрів при концентрованому сонячному опроміненні, а монтаж на металевий радіатор забезпечить кращий відвід тепла від зони розташування робочого переходу. Оскільки для зменшення негативного впливу послідовного опору необхідно зменшувати величину струму через ФП, було запропоновано та використане таке конструктивне рішення: кілька фотоперетворювачів розміром $125 \times 125 \text{ мм}^2$ розрізали на смужки розміром $125 \times 16,7 \text{ мм}^2$, з яких вибирали дев'ять, і послідовно з'єднували їх для виготовлення ФМ.

Фотоенергетичний модуль для концентраторної геліоенергетичної установки був зібраний на ребристому алюмінієвому радіаторі, який додатково охолоджувався вентилятором. На плоску поверхню цього радіатора кріпилася алюмінієва оксидована пластина з дев'ятьма з'єднаними методом пайки фотоперетворювачами. Для зменшення теплового опору кріплення ФП до алюмінієвої пластини, як і кріплення цієї пластини до плоскої поверхні радіатора, здійснювалось через тонкий шар теплопровідної пасти. Зазори між ФП після розміщення на алюмінієвій пластині були не більше 0,5 мм.

Площа фронтальної поверхні виготовленого ФМ складала $0,42 \times 0,05 = 0,021 \text{ м}^2$, а його фронтальної фотоприймальної (заповненої фотоперетворювачами) поверхні — $0,375 \times 0,05 = 0,01875 \text{ м}^2$. Створення фотоенергетичного модуля саме з такими розмірами обумовлювалося розмірами зони концентрації сонячного випромінювання геліоенергетичної установки (рис. 1). Контактні площадки ФМ формувались на його периферії поза межами ділянки розташування фотоперетворювачів. З фронтальної сторони поверх-



Рис. 2. Фотоенергетичний модуль для геліоенергетичної установки

ня ФМ з фотоперетворювачами була захищена склом товщиною 2 мм, яке кріпилося за допомогою клею СКТН і додатково фіксувалося на краях притискними пластинами. Фото виготовленого фотоенергетичного модуля наведено на рис. 2.

Фотоелектричні характеристики створеного модуля

Фотоелектричні характеристики виготовленого ФМ в умовах АМ1,5 досліджувалися на базі сертифікованого Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України. Результати вимірювань світлових вольт-амперних характеристик (ВАХ) виготовленого ФМ наведено на рис. 3, а визначені з них параметри — в таблиці.

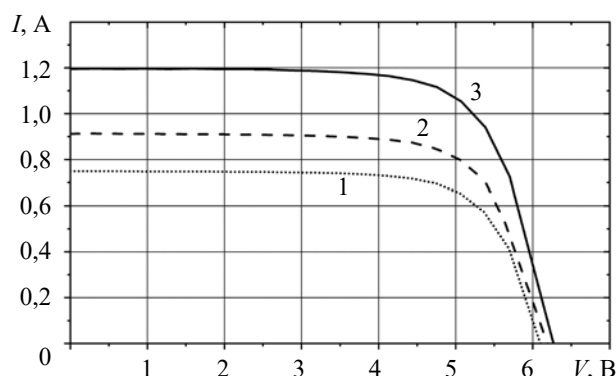


Рис. 3. Світлові ВАХ виготовленого фотоенергетичного модуля за різного рівня енергетичної освітленості P_L (у Вт/м^2):

1 — 924; 2 — 1135; 3 — 1543

Фотоелектричні параметри виготовленого модуля площею $S = 0,021 \text{ м}^2$ в умовах різного рівня енергетичної освітленості P_L

Параметр	$P_L, \text{ Вт/м}^2$		
	924	1135	1543
Струм короткого замикання $I_{КЗ}, \text{ А}$	0,749	0,912	1,195
Напруга розімкненого кола $V_{РК}, \text{ В}$	6,100	6,190	6,270
Максимальна вихідна електрична потужність $P_M, \text{ Вт}$	3,310	4,040	5,340
Фотострум в точці максимальної потужності $I_M, \text{ А}$	0,653	0,798	1,053
Напруга в точці максимальної потужності $V_M, \text{ В}$	5,060	5,060	5,070
Коефіцієнт форми ВАХ K_Φ	0,730	0,730	0,720
Ефективність $\eta, \%$	17,06	16,95	16,48

Для визначення параметрів еквівалентної схеми фотоперетворювача отримані експериментально результати були промодельовані з використанням одно- та двоекспоненціальної моделей опису світлових ВАХ [11, с. 15, 20], а саме:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A \cdot kT} \right) - 1 \right] - \frac{I \cdot R_s + V}{R_{sh}}; \quad (1)$$

$$I = I_{\phi} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A_1 \cdot kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A_2 \cdot kT} \right) - 1 \right] - \frac{I \cdot R_s + V}{R_{sh}}, \quad (2)$$

де I , I_{ϕ} — струм та фотострум відповідно;
 I_0 , I_{01} , I_{02} — струми насичення зворотно-зміщеного p - n -переходу;
 q — заряд електрона;
 V — напруга;
 R_s , R_{sh} — послідовний і шунтувальний опір відповідно;
 A , A_1 , A_2 — фактори неідеальності p - n -переходу;
 k — стала Больцмана;
 T — температура.

Для випадків якісного узгодження експериментальних і теоретичних світлових ВАХ двоекспоненціальна модель (2) дає такі параметри еквівалентної схеми фотоперетворювача: $A_1 = 1$, $A_2 = 2$, $R_{sh} = 525$ Ом, $R_s = 0,3$ Ом, $I_{01} = 1,1 \cdot 10^{-12}$ А, $I_{02} = 7,8 \cdot 10^{-7}$ А, тоді як однокспоненціальна модель дає значення $A = 2$ (рис. 4).

Визначене значення фактора неідеальності ВАХ фотоенергетичного модуля свідчить про реалізацію високого рівня збудження, за якого концентрація надлишкових носіїв заряду значно вища, ніж концентрація легувальної домішки, і про високі значення часу життя неосновних носіїв у базі фотоперетворювача. Такий результат узгоджується з наданими компанією SunPower параметрами ФП, які виготовляються на основі високоякісного кремнію зонної плавки n -типу провідності з часом життя 1–2 мс.

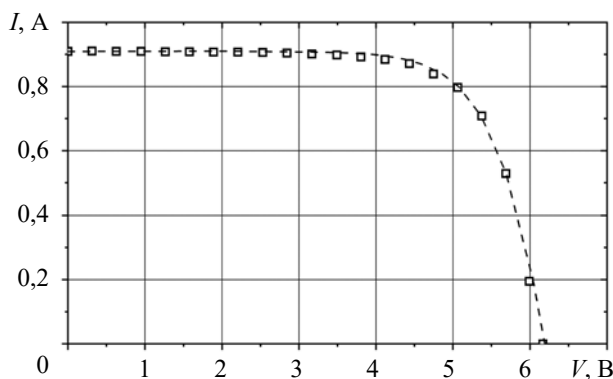


Рис. 4. Експериментальна (точки) та отримана теоретично на основі однокспоненціальної моделі (лінія) світлові ВАХ виготовленого фотоенергетичного модуля

Таким чином, проведені дослідження дозволили розробити необхідні конструктивно-технологічні рішення та виготовити фотоенергетичний модуль для використання у складі геліоенергетичної установки з параболо-циліндричним концентратором.

Результати, отримані на першому етапі досліджень в умовах неконцентрованого і слабо (1,5-кратно) концентрованого сонячного опромінення, показали, що використані фотоперетворювачі мають досить низькі значення послідовного опору, а виготовлений сонячний модуль — достатньо високу ефективність фотоелектричного перетворення.

Надалі планується провести випробування виготовленого фотоенергетичного модуля в умовах концентрованого до 20-кратної величини натурального сонячного опромінення з подальшим визначенням напрямків поліпшення його характеристик.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Green M.A. Photovoltaic technology and visions for the future. *Progress in Energy*, 2019, vol. 1, no. 1, p. 1–13. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab0fa8>
- Augusto A., Karas J., Balaji P. et al. Exploring the practical efficiency limit of silicon solar cells using thin solar-grade substrates. *Journal of Material Chemistry A*, 2020, vol. 8, p.16599–16608. <https://doi.org/10.1039/D0TA04575F>
- Willeke G. High concentration photovoltaics — state-of-the-art and novel concepts. *Proceedings of 3-rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Japan, Osaka, 2003, vol. 3, S30-A5-04.
- Lovegrove K., Stein W. *Concentrating solar power technology: principles, developments, and applications, 2nd Edition*. Elsevier Science, Woodhead Publ., 2020, 832 p.
- Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Korkishko R.M. et al. Peculiarities of the temperature dependences of silicon solar cells illuminated with light simulator. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2015, vol. 18, no. 3, p. 259–266. <https://doi.org/10.15407/spqeo18.03.259>
- Singh P., Ravindra N.M. Temperature dependence of solar cell performance — an analysis. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, vol. 101, p. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019>
- Sharaf M., Yousef M.S., Huzayyin A.S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, p. 26131–26159. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
- Костильов В.П., Дверніков Б.Ф., Коркішко Р.М. та ін. Конструктивно-технологічні особливості і фотоенергетичні характеристики сонячного модуля для геліоенергетичної установки з параболо-циліндричним концентратором. *IX Міжнародна наукова конференція „Функціональна база наноелектроніки“: збірник наукових трудов*. Україна, Харків — Одеса, 2017, с. 141–144.
- Коркішко Р.М. *Удосконалення технології виготовлення кремнієвих сонячних елементів для роботи при підвищених рівнях збудження*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, Інститут фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова НАН України, 2018, 22 с.
- De Ceuster D., Cousins P., Rose D. et al. Low cost, high volume production of >22% efficiency silicon solar cells. *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2007)*, Italy, Milan, 2007, p. 816–819.
- Раушенбах Г.С. *Справочник по проектированию солнечных батарей*. Москва, Энергоатомиздат, 1983, 360 с.

Дата надходження рукопису до редакції 21.11 2023 р.

CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC MODULE
BASED ON SILICON PHOTOCONVERTERS

The task of reducing the cost of an energy unit obtained by the photovoltaic method remains relevant. One of the effective methods of reducing the production cost of energy units is to use installations that concentrate solar irradiation. In this study, the authors develop design and technological solutions and use silicon backside contact photoconverters with a rear placement of the collector p - n -junction and both contact electrodes to make a solar photovoltaic module of the required size. This photovoltaic module with front surface dimensions of $0.42 \times 0.05 \text{ m}^2$ is intended for use in a solar power plant with the parabola-cylindrical concentrator.

The first stage of experimental and theoretical research of photovoltaic characteristics of the solar module is carried out in the conditions of unconcentrated and weakly concentrated solar irradiation. It is established that the used solar photoconverters have fairly low values of the series resistance and the solar photovoltaic module has a sufficiently high efficiency of the photovoltaic conversion. It is planned to further test the developed solar module in the conditions of natural sunlight irradiation concentrated 20-fold, which will allow determining the ways to improve its characteristics.

Key words: silicon backside contact photoconverters, solar photovoltaic module, concentrated solar irradiation.

REFERENCES

1. Green M.A. Photovoltaic technology and visions for the future. *Progress in Energy*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab0fa8>
2. Augusto A., Karas J., Balaji P. et al. Exploring the practical efficiency limit of silicon solar cells using thin solar-grade substrates. *Journal of Material Chemistry A*, 2020, vol. 8, pp.16599–16608. <https://doi.org/10.1039/D0TA04575F>
3. Willeke G. High concentration photovoltaics — state-of-the-art and novel concepts. *Proceedings of 3-rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion*, Japan, Osaka, 2003, vol. 3, S30-A5-04.
4. Lovegrove K., Stein W. *Concentrating solar power technology: principles, developments, and applications, 2nd Edition*. Elsevier Science, Woodhead Publ., 2020, 832 p.
5. Sachenko A.V., Kostylyov V.P., Korkishko R.M. et al. Peculiarities of the temperature dependences of silicon solar cells illuminated with light simulator. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 259–266. <https://doi.org/10.15407/spqeo18.03.259>
6. Singh P., Ravindra N.M. Temperature dependence of solar cell performance — an analysis. *Solar Energy Materials & Solar*

Cells, 2012, vol. 101, pp. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019>

7. Sharaf M., Yousef M.S., Huzayyin A.S. Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, vol. 29, pp. 26131–26159. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18719-9>
8. Kostylyov V.P., Dvernikov B.F., Korkishko R.M. et al. [Design and technological features and photovoltaic characteristics of a solar module for a solar energy installation with a parabolic-cylindrical concentrator]. *Proceedings of the IX International scientific conference “Functional basis of nanoelectronics”*, Ukraine, Kharkov — Odesa, 2017, pp. 141–144. (Rus)
9. Korkishko R.M. [Improving of the technology of silicon solar cell manufacturing to work at increased levels of excitation] Cand. tech. sci. diss. abstr. Kyiv, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine, 2018, 22 p. (Ukr)
10. De Ceuster D., Cousins P., Rose D. et al. Low cost, high volume production of >22% efficiency silicon solar cells. *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2007)*, Italy, Milan, 2007, p. 816–819.
11. Rauschenbach H.S. *Solar cell array design handbook*. New York, Van Nostrand Reinhold Company publ., 1980, 549 p.

Опис статті для цитування:

Черненко В. В., Костильов В. П., Коркішко Р. М., Дверніков Б. Ф., Пекур Д. В., Коломзаров Ю. В., Корнага В. І., Сорокін В. М. Концентраторний фотоенергетичний модуль на основі кремнієвих фотоперетворювачів. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3–4, с. 20–23. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.20>

Cite the article as:

Chernenko V. V., Kostylyov V. P., Korkishko R. M., Dvernikov B. F., Pekur D. V., Kolomzarov Yu. V., Kornaga V. I., Sorokin V. M. Concentrator photovoltaic module based on silicon photoconverters. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 3–4, pp. 20–23. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.20>