

УДК 621.311.171

Р.В.Зайцев¹, канд.техн.наук, **М.В.Кіріченко**², канд.техн.наук, **Г.С.Хрипунов**³, докт.техн.наук
(Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків), **Л.В.Зайцева**⁴,
канд.техн.наук (Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків)

Вплив робочої температури на ефективність промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва

Досліджено вплив робочої температури на ефективність кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Показано, що, не дивлячись на високу вихідну ефективність, при підвищенні робочої температури в досліджуваних фотоелектричних перетворювачах спостерігається істотне зниження вихідних параметрів у порівнянні з промисловими аналогами європейського виробництва. При зростанні робочої температури був встановлений нехарактерний спад щільності струму короткого замикання. Методом комп'ютерного моделювання було показано, що це обумовлено не лише традиційним зростанням щільності діодного струму насичення, а й зниженням шунтуючого опору. Бібл. 9, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: фотоелектричні перетворювачі на основі кристалічного кремнію, робоча температура, коефіцієнт корисної дії, вихідні параметри, світлові діодні характеристики.

ORCID: ¹0000-0003-2286-8452; ²0000-0002-4847-506X; ³0000-0002-6448-5938; ⁴0000-0003-4405-1531

1. Вступ. У даний час в результаті підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) промислових зразків монокристалічних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) до 17-18% при істотному зниженні їх вартості китайські виробники стали найбільшими імпортерами фотоелектричної продукції в світі [1]. Значна частина підприємств, що займаються промисловим виробництвом фотоелектричних модулів, як вихідні фотоелектричні перетворювачі використовують ФЕП китайського виробництва. Крім того, на ринку найбільший сегмент імпортованих фотоелектричних модулів також займають вироби китайських виробників. При продажі ФЕП китайські виробники окрім ККД вказують і вихідні параметри: напругу холостого ходу U_{xx} , щільність струму короткого замикання $J_{кз}$, чинник заповнення світлової вольт-амперної характеристики (ВАХ) FF , які вимірюються при кімнатній температурі 25°C.

Проте в процесі експлуатації Si-ФЕП згідно з величиною ККД лише незначна частина сонячної енергії використовується для вироблення електричної енергії. Велика частина сонячного випромінювання перетворюється в приладових структурах у тепло. Це призводить до підвищення робочої температури Si-ФЕП, що відповідно при-

зводить до зниження їх ефективності. У значному числі робіт проаналізовано вплив температури на ефективність монокристалічних Si-ФЕП, які виготовлялися в європейських країнах і Росії (див., наприклад, [2–4]). При цьому були встановлені фізичні механізми, що призводять до зниження ККД. У той же час аналогічні дослідження Si-ФЕП китайського виробництва не проводяться за рідким винятком [5]. Таким чином, дослідження впливу температури на ефективність фотоелектричних процесів у промислових зразках Si-ФЕП китайського виробництва слід вважати актуальним науково-дослідним завданням, яке має велике практичне значення.

2. Постановка завдання. Виходячи з викладеного вище, метою цієї роботи було дослідження впливу температури на ефективність фотоелектричних процесів у промислових зразках Si-ФЕП китайського виробництва.

3. Методика проведення експерименту. Згідно з еквівалентною схемою ФЕП, кількісними характеристиками фотоелектричних процесів, які спостерігаються в таких приладових структурах, є світлові діодні характеристики: щільність фотоструму $J_{ф}$, щільність діодного струму насичення J_0 , коефіцієнт ідеальності діода A , послідо-

вний опір R_n і шунтуючий опір $R_{ш}$, що розраховуються на одиницю площі сонячного елемента (СЕ). Зв'язок ефективності ФЕП зі світловими діодними характеристиками в неявному вигляді описується теоретичною світловою ВАХ СЕ [6]:

$$J_H = -J_\phi + J_o \left\{ \exp \left[\frac{e(U_H - J_H R_n)}{AkT} \right] - 1 \right\} + (U_H - J_H R_n) / R_{ш}, \quad (1)$$

де J_n – щільність струму, який протікає крізь навантаження; e – заряд електрона; k – стала Больцмана; T – температура сонячного елемента; U_n – падіння напруги на навантаженні.

Аналізуючи вираз (1), видно, що зі зростанням J_ϕ , $R_{ш}$ та зі зменшенням J_o , A , R_n ефективність ФЕП зростає. Величина щільності фотоструму, яка кількісно характеризує ефективність процесів генерації та дифузії нерівноважних носіїв заряду, визначається кількістю фотонів, що поступають у базовий шар, квантовим виходом фотоелектру і часом життя нерівноважних носіїв заряду в базовому шарі. Значення коефіцієнта ідеальності та величина щільності діодного струму насичення, які кількісно характеризують ефективність процесу розділення нерівноважних носіїв заряду в Si-ФЕП, контролюються швидкістю рекомбінації в області просторового заряду і енергетичною структурою сепаруючого бар'єру. Шунтуючий опір включений в еквівалентну схему ФЕП, щоб врахувати вплив на ефективність фотоелектрич-

них процесів низького електроопору локальних частин приладової структури і торцевих поверхонь. Величина послідовного опору ФЕП визначає ефективність збирання нерівноважних носіїв заряду і залежить від електропровідності базового і шарів ФЕП, що сполучаються, контактного опору і швидкості рекомбінації нерівноважних носіїв заряду на тильних та фронтальних контактах.

Визначення вихідних параметрів і світлових діодних характеристик Si-ФЕП у роботі здійснювалося шляхом апроксимації і використанням розробленої програми експериментальних світлових вольт-амперних характеристик за допомогою теоретичного виразу (1). Світлові ВАХ СЕ вимірювалися за допомогою лабораторного стенду (рис. 1) при опроміненні приладових структур імітатором сонячного випромінювання в наземних умовах з потужністю світлового потоку 100 мВт/см².

Як джерело, що імітує сонячне випромінювання, була використана галогенова лампа потужністю 50 Вт, підключена до стабілізованого блоку живлення. Вимір світлових ВАХ здійснювався шляхом подачі на контактні системи деякої різниці потенціалу з подальшою реєстрацією індукованого струму. Напруга, що зазвичай подається, змінювалася від 0,6 В до 1,0 В з кроком в 0,01 В. На виході вимірювальної системи формується залежність струму від напруги, що подається.

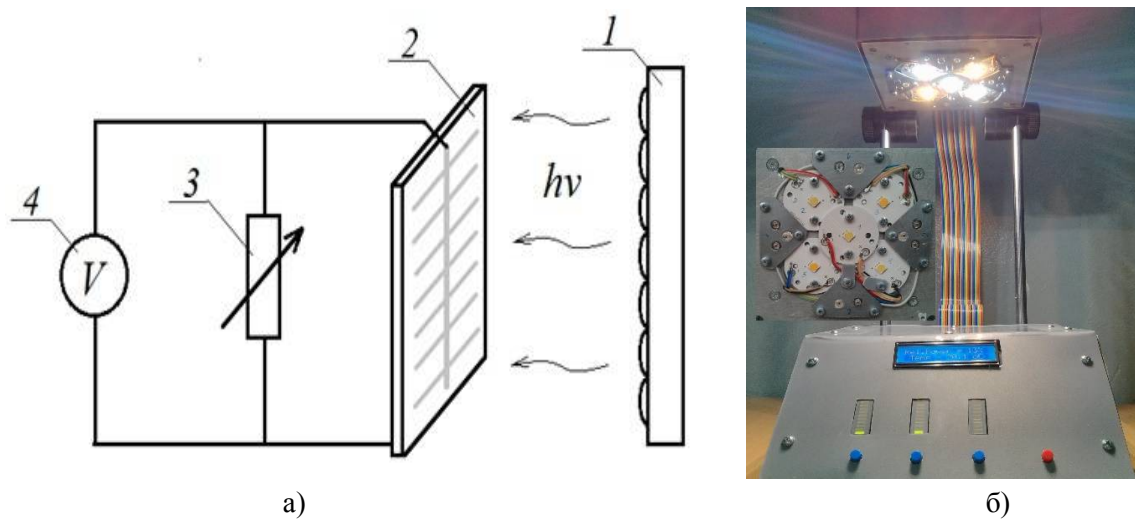


Рис. 1. Схема лабораторного стенду для вимірювання навантажених світлових ВАХ (а) та зовнішній вигляд світлодіодного освітлювача (б), на врізці якого показано розташування світлодіодів на випромінюючому елементі:
 1 – світлодіодний освітлювач; 2 – досліджуваний ФЕП; 3 – магазин опорів навантаження; 4 – мультиметр для вимірювання падіння напруги на опори навантаження.

3. Результати та їх обговорення.

3.1. Експериментальні дослідження впливу температури на вихідні параметри і світлові діодні характеристики промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Для дослідження були обрані монокристалічні Si-ФЕП китайського виробництва з характерними значеннями ККД, які відповідають мінімальним, максимальним і середнім значенням для приладових структур, представлених на ринку. Для зразків при температурах від 0°C до 50°C були виміряні світлові ВАХ. У результаті подальшої аналітичної обробки виміряних світлових ВАХ були визначені вихідні параметри і світлові характеристики Si-ФЕП. Отримані експериментальні результати представлені в таблиці 1 для зразків 1-3.

Аналіз показує, що зі зростанням температури спостерігається практично лінійне зниження

ККД (рис. 2а). При цьому коефіцієнт зниження, який описує відносну зміну ККД при зміні температури на один градус, складає 0,7%/°C. Для напруги холостого ходу і щільності струму короткого замикання також спостерігається зни-

ження їх величини при збільшенні робочої температури (рис. 2б, в). Було експериментально встановлено, що чинник заповнення світлових ВАХ практично не змінюється зі зростанням температури.

Таблиця 1. Вихідні параметри та світлові діодні характеристики досліджуваних Si-ФЕП, визначені за їх світловими ВАХ, виміряними при температурі 25°C

Вихідні параметри	Зразок		
	1	2	3
$J_{кз}$, мА/см ²	35,5	38,8	39,0
$U_{хх}$, мВ	582	578	597
FF , відн. од.	0,81	0,81	0,81
ККД, %	16,7	18,0	18,7
J_{ϕ} , мА/см ²	35,5	38,8	39,0
$R_{л}$, Ом·см ²	0,53	0,45	0,45
$R_{ш}$, Ом·см ²	1560	1490	1680
A_b , відн. од.	0,86	0,90	0,90
J_0 , А/см ²	$2,9 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-13}$

Аналіз світлових діодних характеристик показує, що зафіксоване зниження ККД обумовлене збільшенням щільності діодного струму насичення (рис. 3а) і зниженням шунтуючого опору (рис. 3б).

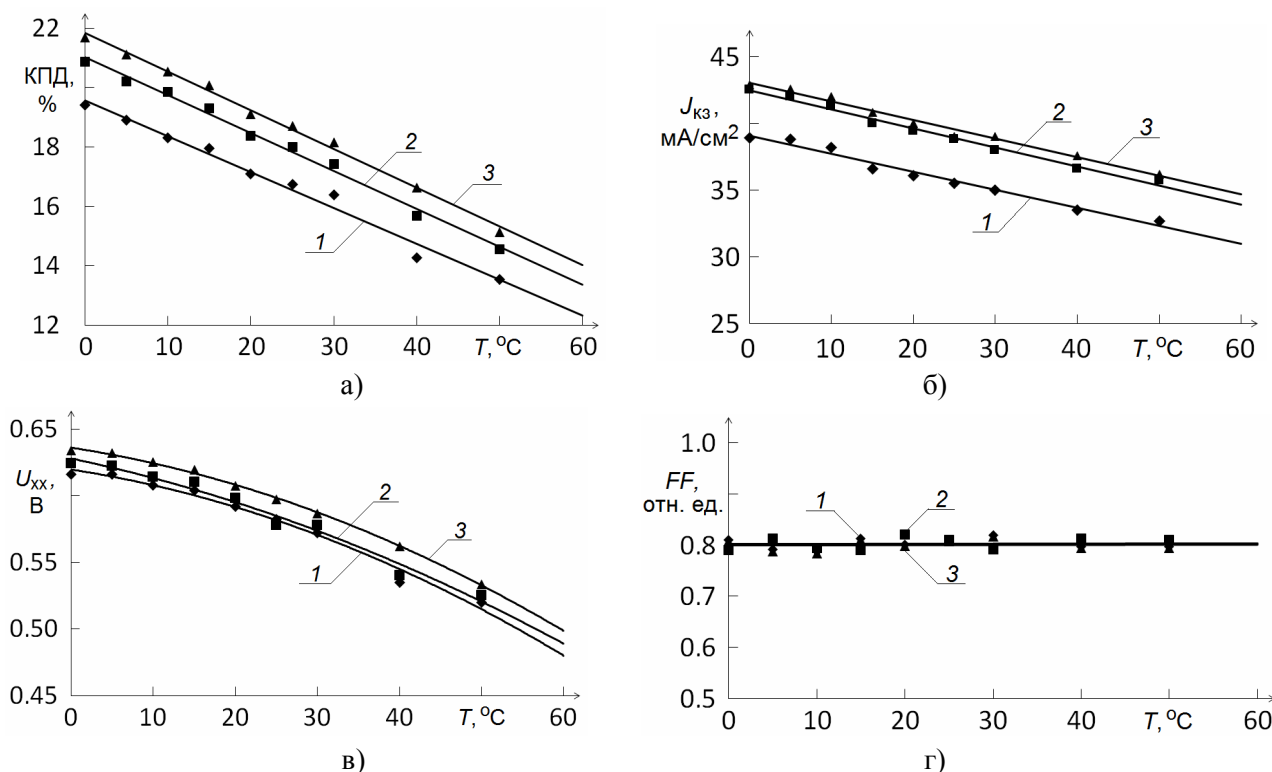


Рис. 2. Вплив робочої температури на ККД (а), щільність струму короткого замикання (б), напруга холостого ходу (в) та фактор заповнення світлової ВАХ (г) досліджуваних Si-ФЕП: зразок 1 з ККД = 16,7% при температурі 25°C; зразок 2 з ККД = 18,0% при температурі 25°C; зразок 3 з ККД = 18,7% при температурі 25°C.

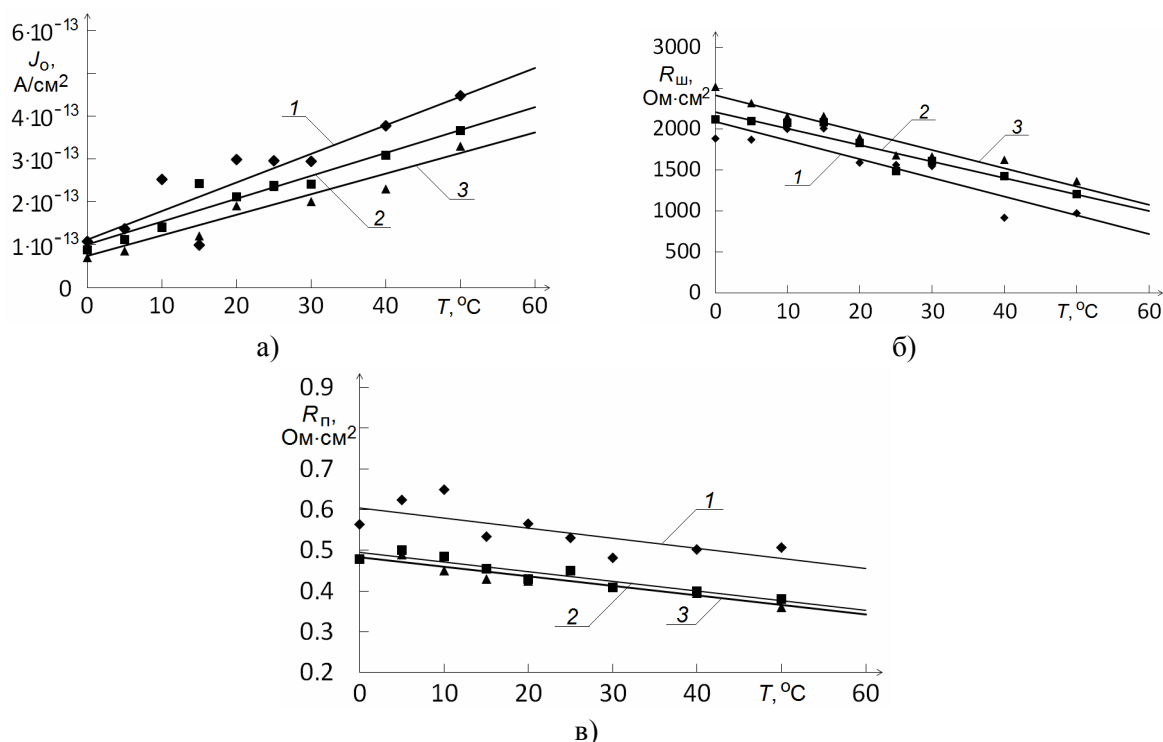


Рис. 3. Вплив робочої температури на щільність діодного струму насичення (а), шунтуючий (б) та послідовний (в) опір досліджуваних Si-ФЕП: зразок 1 з ККД = 16,7% при температурі 25°C; зразок 2 з ККД = 18,0% при температурі 25°C; зразок 3 з ККД = 18,7% при температурі 25°C.

3.2. Аналіз фізичних механізмів впливу температури на вихідні параметри і світлові діодні характеристики промислових зразків кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва. Отримані експериментальні результати лише частково можуть бути прокоментовані в рамках традиційних уявлень про вплив температури на ефективність фотоелектричних процесів у Si-ФЕП, які в узагальненому вигляді викладені в [7]. Згідно з традиційним уявленням, яке відповідає експериментальним дослідженням Si-ФЕП, при збільшенні температури дифузійна довжина нерівноважних носіїв у Si зростає. Це обумовлено тим, що коефіцієнт дифузії не змінюється або збільшується, а час життя неосновних носіїв зростає при підвищенні температури. Збільшення дифузійної довжини неосновних носіїв приводить до зростання щільності струму короткого замикання при збільшенні температури. Проте цей ефект незначний і складає порядку 0,07%/°C. Зниження напруги холостого ходу значно перевищує збільшення щільності струму короткого замикання і складає 0,4%/°C. Більш плавна форма світлової ВАХ при підвищених температурах призводить до змен-

шення чинника заповнення світлової ВАХ. Тому в цілому підвищення температури призводить до відносного зниження ККД на 0,5%/°C.

Згідно з отриманими експериментальними даними, у Si-ФЕП китайського виробництва відносне зниження ККД вище і складає 0,7%/°C. При цьому щільність струму короткого замикання знижується, а чинник заповнення світлових ВАХ практично не змінюється.

Згідно з існуючими фізичними уявленнями, щільність діодного струму насичення є найважливішою світловою діодною характеристикою, яка контролює зміну вихідних параметрів ФЕП при зміні робочої температури. Без врахування шунтуючого і послідовного опору теоретичний вираз для щільності діодного струму насичення має вигляд [2]:

$$J_0 = C \cdot T^3 \cdot \exp(-qE_g / kT), \quad (2)$$

де C – параметр, який змінюється при зміні робочої температури T ; q – заряд електрона; E_g – ширина забороненої зони.

У цій роботі було показано, що при $C \cdot T^3 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ спостерігається найкраща відповідність між експериментальними температур-

ними змінами вихідних параметрів та їх теоретичними залежностями. Оскільки $C \cdot T^3$ є константою, то експоненціальне збільшення щільності діодного струму насичення свідчить про те, що основним фізичним механізмом збільшення J_0 є термічно активоване зростання концентрації носіїв заряду. Оскільки експериментальні залежності $J_0(T)$ не лінеарізуються в координатах $\ln J_0 - 1000/T$, то вказаний вище механізм не є єдиним. На його існування вказує зафіксоване експериментальне нетрадиційне зниження щільності струму короткого замикання зі зростанням робочої температури.

Аналіз діодних характеристик показує, що аномальне високе зниження ККД і нетрадиційне зменшення щільності струму короткого замикання обумовлене зафіксованим експериментальним зменшенням шунтуючого опору. Струм по ділянках високої провідності зменшує величину внеску фотоструму в струм короткого замикання і є додатковим фізичним механізмом, що знижує ККД. Моделювання впливу зростання щільності діодного струму насичення і зниження шунтуючого опору (рис. 4а, б) показало, що вони співрозмірні.

Оскільки в ході досліджень було експериментально встановлено високу швидкість зниження КПД Si-ФЕП китайського виробництва, то це в процесі експлуатації нівелює їх досить високі вихідні параметри, обумовлює доцільність їх використання у складі фотоелектричного теплового модуля (ФЕТМ), який представляє гібрид ФЕП і сонячного колектора, і дозволяє за рахунок циркуляції теплоносія забезпечувати охолодження кремнієвої приладової структури. Залежно від необхідних технологічних вимог вироблено три основні режими роботи ФЕТМ [8]: забезпечення максимально ефективного вироблення електроенергії, забезпечення максимальної ефективності теплової енергії та забезпечення максимальної сумарної ефективності. У [9] розроблено конструкції, які для забезпечення максимальної електричної потужності забезпечують можливість теплового відходу від лицьової поверхні ФЕП у довкілля і від тильної сторони до контуру теплоносія. Основною особливістю конструкції модуля, що відповідає даному режиму роботи, є відсутність повітряного прошарку між ФЕП і світлопрозорим покриттям. При даному режимі роботи

температура теплоносія в контурі має бути не більше 35°C . Але, оскільки рідина, що нагрівається модулем, має низьку температуру, то потрібне її подальше підігрівання, що призводить до необхідності в додатковому устаткуванні. Так, наприклад, такий режим роботи ФЕТП забезпечує комбінована система гарячого водопостачання, опалювання і кондиціонування на основі теплового насоса і ФЕТМ.

4. Висновки. Дослідження впливу робочої температури на ефективність кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва показало, що зі зростанням робочої температури зниження ККД складає $0,07\%/^\circ\text{C}$, що істотно вище, ніж у приладових структурах європейського і вітчизняного виробництва, і обумовлене нетрадиційним зниженням щільності струму короткого замикання.

Методом комп'ютерного моделювання кількісного впливу світлових діодних характеристик на ККД було показано, що зниження ефективності кремнієвих фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва обумовлене не лише традиційним зростанням щільності діодного струму насичення, але і зниженням шунтуючого опору.

Ідентифікована температурна залежність ККД свідчить про доцільність використання фотоелектричних перетворювачів китайського виробництва в конструкції фотоелектричної теплової установки, яка разом із тепловим насосом входить до складу комбінованої системи гарячого водопостачання, опалювання і кондиціонування.

1. Bye G., Ceccaroli B. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, Vol. 130, pp. 634–646.
2. P. Singh, Ravindra N.M. Temperature dependence of solar cell performance an analysis, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, Vol. 101, pp.36–45.
3. Singh P, Singh S N, Lal M. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2008, Vol. 92, pp. 1611–1616.
4. Radziemska E. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes, *International Journal Energy Res*, 2006, Vol. 30, № 2. pp. 127–134.
5. Cai W., Chao F., JinLong T., DeXiong L., SiFu H., ZhiGang X. The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance, *Physics, Mechanics & Astronomy*, 2012, Vol. 55, № 2, pp. 235–241.

6. Möller H.J. Semiconductors for solar cells, Boston: Artech House, 1993.

7. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченко А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. Изд-во СПбГЭТУ: ЛЭТИ, 2012.

8. Резцов В.Ф., Суржик О.М., Охота О.О. Экспериментальные дослідження теплопровідності композиційних матеріалів колекторів сонячної енергії. Відновлювана енергетика, 2016, № 2(45), С. 41–44.

9. Губин С.В., Гонтарь М.Г. Динамическое моделирование управления работы фотоэлектрической батареи с учетом изменения температуры панели. Відновлювана енергетика, 2016, № 1(44), С. 28–33.

REFERENCES

1. Bye G., Ceccaroli B. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, Vol. 130, pp. 634–646.

2. P. Singh, Ravindra N.M. Temperature dependence of solar cell performance an analysis, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2012, Vol. 101, pp. 36–45.

3. Singh P, Singh S N, Lal M. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2008, Vol. 92, pp. 1611–1616.

4. Radziemska E. Effect of temperature on dark current characteristics of silicon solar cells and diodes, International Journal Energy Res, 2006, Vol. 30, № 2. pp. 127–134.

5. Cai W., Chao F., JinLong T., DeXiong L., SiFu H., ZhiGang X. The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance, Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, Vol. 55, № 2, pp. 235–241.

6. Möller H.J. Semiconductors for solar cells, Boston: Artech House, 1993.

7. Afanasiev V.P., Terukov E.I., Sherchenko A.A. Thin-film solar cells based on silicon. St. Petersburg: LETI, 2012.

8. Rezcov V.F., Surzhyk O.M., Ohota O.O. Experimental study of the thermal conductivity of composite materials solar collectors. Renewable energy, 2016, No. 2(45), pp. 41–44.

9. Gubin S.V., Gontar M.G. Dynamic simulation of the operation of the photovoltaic battery with regard to the temperature change of the panel. Renewable energy, 2016, No. 1(44), pp. 28–33.

Р.В.Зайцев, канд техн.наук, **М.В.Кириченко**, канд техн.наук, **Г.С.Хрипунов**, докт.техн.наук (Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков), **Л.В.Зайцева**, канд.техн.наук (Национальный аэрокосмический университет "Харьковский авиационный институт", Харьков)

Влияние рабочей температуры на эффективность промышленных образцов кремниевых фотоэлектрических преобразователей китайского производства

Исследовано влияние рабочей температуры на эффективность кремниевых фотоэлектрических преобразователей

китайского производства. Показано, что, несмотря на высокую выходную эффективность, при повышении рабочей температуры в исследуемых фотоэлектрических преобразователях наблюдается существенное снижение выходных параметров по сравнению с промышленными аналогами европейского производства. При росте рабочей температуры был установлен нехарактерный спад плотности тока короткого замыкания. Методом компьютерного моделирования было показано, что это обусловлено не только традиционным ростом плотности диодного тока насыщения, но и снижением шунтирующего сопротивления. Библ. 9, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи на основе кристаллического кремния, рабочая температура, коэффициент полезного действия, исходные параметры, световые диодные характеристики.

Zaitsev R., Kirichenko M., Khrypunov G. (National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute", Kharkiv), **Zaitseva L.** (National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv)

Influence of operating temperature on efficiency Chinese-made silicon solar cells

The influence of operating temperature on efficiency of industrial samples of silicon photovoltaic devices made in China has been investigated. It was shown that despite the high initial efficiency, the tests of the photovoltaic devices carried out at higher operating temperatures have revealed a significant reduction of output parameters compared with the industrial analogs made in Europe. With the operating temperature increasing, an uncharacteristic decline in short-circuit current density was registered. As it was shown the last is due not only to the inherent increase in the density of the diode saturation current, but also is the result of the reduction of shunt resistance. References 9, figures 3, table 1.

Keywords: photovoltaic devices based on crystalline silicon, operating temperature, efficiency, output parameters, light diode characteristics.

SYNOPSIS

Currently, as a result of increasing the efficiency of industrial designs monocrystalline silicon solar cells to 17-18% with a significant decrease in their cost Chinese manufacturers were the largest importers of photovoltaic products in the world. Much of enterprises engaged in industrial production of photovoltaic modules as initial photovoltaic cells use solar cells in China. In addition to the market segment most imported PV modules products also occupy Chinese manufacturers. However, in the operation of such devices according to the size of only a fraction of the efficiency of solar energy used to generate electricity. Most of the solar radiation is converted to heat in the device structures. This increases the operating temperature of photovoltaic cells, in accordance reduces their effectiveness.

Based on the above, the purpose of this work was to study the effect of temperature on the efficiency of photovoltaic processes in the industrial design of photovoltaic cells in China.

The influence of operating temperature on the efficiency silicon photovoltaic Chinese production showed that with increasing operating temperature reduction efficiency is 0,07 %/°C, which is significantly higher than in device structures of European and domestic production due to unconventional and reduce short-circuit current density.

The method of computer modeling of quantitative exposure light diode characteristics on efficiency has been shown that

lowering efficiency silicon photovoltaic Chinese production is due not only to the traditional reduction diode saturation current density but also decrease in shunt resistance.

Identified temperature dependence of efficiency demonstrates the feasibility of using Chinese-made photovoltaic cells in the construction of photovoltaic thermal plants, which together with the heat pump is part of a combined hot water, heating and air conditioning.

Стаття надійшла до редакції 14.06.17

Остаточна версія 18.08.17

УДК 620.91

В.О.Пундєв¹, В.І.Шевчук², В.А.Хілько³, Бенменні Мухуб⁴ (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Особливості проектування фотоелектричних станцій, що розміщуються на дахах та стінах будівель

Розглянуто особливості проектування фотоелектричних станцій, що розміщуються на дахах та стінах будівель, пов'язані з обмеженістю в площі розміщення фотоелектричних модулів. Бібл. 6, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: дахова фотоелектрична станція, фотоелектрична батарея, фотоелектричний модуль, генерація електричної енергії.

Orcid: ¹0000-0003-3750-8812; ²0000-0002-4176-7799; ³0000-0001-6348-2578; ⁴0000-0001-6548-2205

В останні роки у розвинутих європейських країнах та в деяких інших регіонах світу разом зі стійким подальшим зростанням темпів розвитку фотоенергетики спостерігається зміщення акцентів цього розвитку – будівництво та введення в експлуатацію дахових і стінових фотоелектричних станцій (ФЕС) за своїми темпами випереджає впровадження наземних ФЕС. Це, в першу чергу, пов'язане зі зростаючими труднощами щодо пошуку місця для розташування ФЕС. Традиційне наземне розташування потужних ФЕС потребує великих площ для їх розміщення. За умови дефіциту рівнинних земель несільськогосподарського призначення це призводить до скорочення площ земельних ділянок, або до використання під ФЕС земель с/г призначення шляхом зміни їх призначення, або потребує значних додаткових фінансових витрат на підготовку площадок, розміщених на місцях відпрацьованих

кар'єрів, полігонів захоронення побутових відходів, військових полігонів, ярів тощо.

На користь збільшення темпів та обсягів будівництва дахових та стінових фотоелектричних станцій впливає і те, що вони, як правило, порівняно близько розташовуються до споживачів електричної енергії. У зв'язку з цим не потребується будівництво додаткових трансформаторних підстанцій та високовольтних ліній електропередавання, тому що використовується уже існуюча інфраструктура.

Зупинимось детальніше на особливостях проектування дахових та стінових станцій. Загально-відомо, що основною умовою отримання макси-мальної генерації електричного струму фотоелектричними станціями протягом року є розміщення фотоелектричних модулів (ФЕМ) фронтальною стороною на південь під оптимальним кутом нахилу до горизонту [1, 2], який, на-