

and PV solar panels is not only theoretical but also practical significance. This caused by that in the world and in Ukraine rapidly on an industrial scale using photovoltaic station with direct conversion of solar energy into electricity, and solar power systems of convert energy into heat energy of different heat carrier that can be used for heating, and for the production of electricity.

It is known that the most developed model of the interaction with solar radiation and environments are presenting by solar radiation as a set of electromagnetic waves for the selected frequency radiation ω with consistent use of Planck distribution to calculate integral characteristics of the absorption and scattering of light.

Accordingly, the base model to calculate the characteristics of solar radiation for the selected frequency radiation is the

Maxwell's equations system. The analysis of which leads to the conclusion that for any dependency of electrical conductivity to the spatial coordinates their overall solution can not be formulated in a known analytical form.

As an alternative, may be proposed methodology of qualitative analytical analysis behavior features $\dot{H}_{ya}(z)$,

$\dot{E}_{xa}(z)$ - the essence of which is follows:

- Breakdown space into separate zones.
- The calculation of distribution $\dot{H}_{ya}(z)$, $\dot{E}_{xa}(z)$ at limiting extreme values.
- Comparison of data distribution \dot{H}_{ya} , \dot{E}_{xa} , with different meanings σ^* .

Стаття надійшла до редакції 29.09.16

Остаточна версія 05.11.16

УДК 621.383.4

В.І.Шевчук (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Перспективи використання сонячних елементів для комбінованих фотоелектричних модулів

Окреслені особливості розвитку фотоенергетики в теперішній час. Зокрема, увагу приділено перевагам комбінованих фотоелектричних модулів. Розглянуто можливість застосування різних типів фотоелектричних елементів у комбінованих фотоелектричних модулях за допомогою порівняння їх температурних характеристик. Бібл. 5, табл. 2, рис.74.

Ключові слова: комбінований фотоелектричний модуль, температурний коефіцієнт, сонячний елемент.

Orcid: 0000-0002-4176-7799

1. Світові тенденції розвитку фотоенергетики. Бурхливий розвиток фотоенергетики в країнах ЄС останнім часом почав виходити на новий рівень, який характеризується розвитком менш енергоємних плівкових технологій, що дозволяють формувати багатоперехідні матриці сонячних елементів, і поступовим обмеженням площ під будівництво наземних сонячних станцій. Ці процеси проходять у таких провідних країнах, як Франція, Італія та ін. Зростають лише площі фотоелектричних панелей на дахах великих будівель, автостоянок гіпермаркетів, приватних будинків. Слід також зазначити, що з метою відокремлення проблем, пов'язаних із встановленням

модулів на дахах будівель, модулі виконуються як складові частини дахів.

По-друге, широко застосовуються дахи будь-яких будівель з метою використання сонячної енергії. Крім дотримання вимог щодо естетичності будівель, конфігурації дахів створюються із дотриманням правила (в певних межах): щоб схили цих дахів були спрямовані на максимум одержання сонячної енергії (у північній півкулі мова йде про південні напрямки).

Наступною рисою цих процесів стала спроба виготовлення, використання та удосконалення комбінованих фотоелектричних модулів (КФЕМ) (рис. 1), які поєднують у собі характеристики фо-

тоелектричних модулів і сонячних колекторів (крім електричної), утилізуючи теплову енергію, що має споживатись, та обмежуючи транспортні витрати наближеністю до користувача.

Метою роботи є загальний огляд і порівнян

ня характеристик різних типів сонячних елементів, зокрема, температурних коефіцієнтів, та визначення напрямку подальшого розвитку використання перспективних комбінованих фотоелектричних модулів.

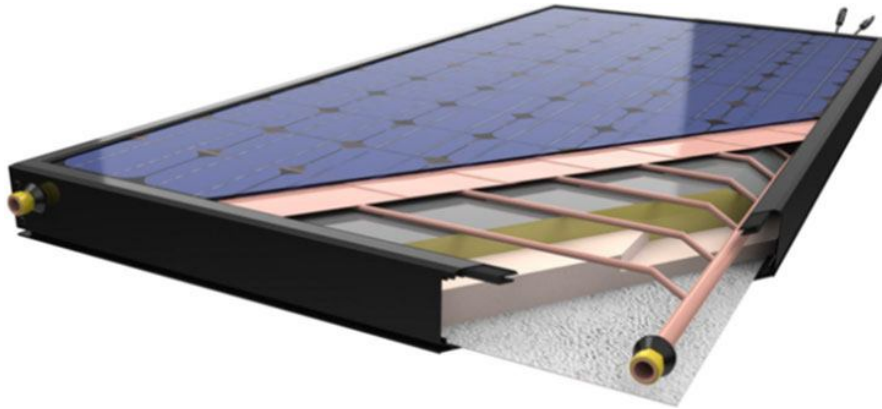


Рис. 1. Місцевий переріз комбінованого фотоелектричного модуля.

КФЕМ особливо ефективні в умовах обмеження площі, яка використовується в якості сприймаючої поверхні для сонячного випромінювання, і в умовах, коли пряма сонячна радіація в часі переважає розсіяну.

Тому зниження робочої температури в кремнієвих сонячних елементах у складі плоских комбінованих фотоелектричних модулів на сьогодні дає не тільки певний вигравш в електричній частині модуля, але і значно більший об'єм у вигляді теплової енергії, який у кілька разів (у 2-4 рази) перевищує електричний.

2. Переваги КФЕМ. Переваги комбінованих фотоелектричних модулів і систем полягають у наступному:

- у практично одночасному генеруванні теплової та електричної енергії, що значно підвищує ефективність модулів (інерційність теплової частини вища);
- у достатньо простій інтеграції в будь-яку будівлю і без будь-яких удосконалень і заміни покрівельних комплектуючих і матеріалів;
- в комбінованій ефективності і гнучкості, які завжди мають вищий ступінь, ніж дві незалежні системи, значно знижуючи при цьому термін окупності (особливо, коли дахові розміри обмежені);
- у значному скороченні відстані транспортування теплової та електричної енергії до спо-

живача, особливо коли місце розташування модулів знаходиться на даху, а навантаження – всередині будівлі;

- у відсутності проблем зі сніговим покривом (пропускається накопичений у рідинному акумуляторі певний відсоток гарячого теплоносія через модуль, щоб на поверхні розтанув сніг);
- в суттєвому зниженні діапазону коливань робочих температур модуля та їх стабілізації, які можуть значно продовжити термін експлуатації КФЕМ;
- у значних об'ємах накопичення рідини, яка може бути використана не тільки в якості носія теплової енергії, але й для пожежогасіння на станції.

Загальний $\eta_{\text{кфем}}$ комбінованих фотоелектричних модулів складається з теплової η_T та електричної $\eta_{\text{ел}}$ складових згідно [1], які залежать від температури наступним чином:

$$\eta_T = \frac{mC_p(T_{\text{ВИХ}} - T_{\text{ВХ}})}{ES}, \quad (1)$$

де m – усереднена масова витрата теплоносія; C_p – питома теплоємність теплоносія; $T_{\text{ВИХ}}$ – вихідна температура теплоносія з комбінованого модуля; $T_{\text{ВХ}}$ – вхідна температура теплоносія до комбінованого модуля; E – щільність потоку сонячної радіації, Вт/м²; S – площа активної поверхні комбінованого модуля, м².

$$\eta_{el} = \eta_{cys} \left(1 + \beta (T_{c.el} - T_{cys}) \right), \quad (2)$$

де $T_{c.el}$ – температура сонячного елемента під сонячним випромінюванням; T_{cys} – температура сонячного елемента в умовах СУВ (стандартні умови випромінювання, 25°C); η_{el} – електричний ККД сонячного елемента; η_{cys} – електричний ККД сонячного елемента в умовах СУВ ($T = 25^\circ\text{C}$); β – температурний коефіцієнт, який фактично є похідною напруги сонячного елемента по температурі: $\frac{du}{dT}$.

Але в силу тих обставин, що на вхідному і вихідному патрубках КФЕМ температура теплоносія в умовах сонячного випромінювання буде різною в залежності від конфігурації гідравлічної схеми модуля, потрібно виконувати її (гідравлічну схему) таким чином, щоб перегрів наступних сонячних елементів не був причиною зниження сили струму в попередніх.

Таким чином, якщо в тепловій складовій підвищення температури викликає зростання теплової потужності, то в електричній – навпаки, зниження. Тому головними завданнями в питаннях конструкції КФЕМ є надійна електрична ізоляція

електричної частини від теплової і водночас достатньо високий рівень теплопередачі від сонячних елементів до теплопоглинальної панелі. До головних ускладнень монтажу КФЕМ слід додати і метод та матеріали для кріплення фотоелектричної частини до теплопоглинальної, яка у складі з кристалічними елементами повинна мати достатню жорсткість для виключення випадків ламкості пластин; це також і герметизація фотоелектричної частини, якість якої, в свою чергу, обумовлює термін експлуатації модулів.

Відзначимо, що в умовах прямої сонячної радіації в існуючих на сьогодні плоских комбінованих фотоелектричних модулях, сонячні елементи яких виготовлені з кремнію, має місце співвідношення:

$$\frac{\eta_T}{\eta_{el}} \approx 2 \div 4.$$

На рис. 2 зображено приблизні енергетичні складові плоского комбінованого фотоелектричного модуля на основі сонячних елементів з кристалічного кремнію в умовах прямої сонячної радіації. Хоча потрібно додати, що в умовах холодної температури і хмарності це співвідношення змінюється на користь η_{el} .

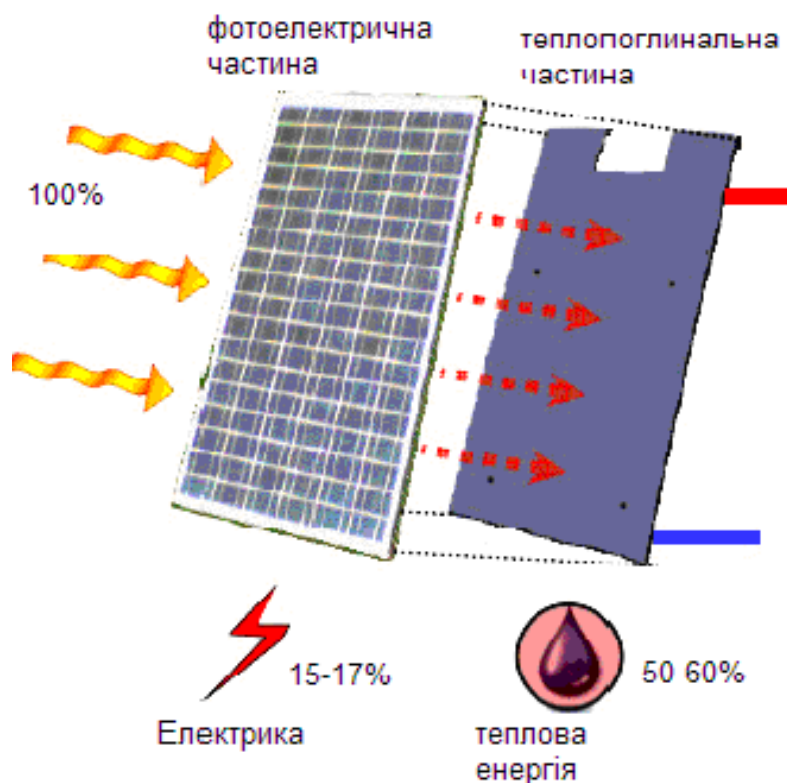


Рис. 2. Енергетика плоского комбінованого фотоелектричного модуля в розгорнутому вигляді.

На жаль, у більшості випадків вказані об'єми теплової енергії під час літньої спекотної пори року використовуються неефективно, що потребує подальшого удосконалення як комбінованих фотоелектричних модулів, так і схем для їх використання. Слід зазначити, що регулювання теплової та електричної частин у граничному діапазоні досягається значенням температури на вході КФЕМ, конфігурацією і пропускною спроможністю теплопровідно-гідралічної частини, зміною дистанції між верхнім прозорим покриттям і поглинальною панеллю, а також інтенсивністю охо-

лодження сонячних елементів в умовах сонячного випромінювання.

Основною складовою КФЕМ є сонячний елемент. Крім особливостей надходження сонячного випромінювання на його поверхню, саме температурні характеристики сонячного елемента суттєво впливають на специфіку одержання комбінованої генерації електричної та практично одночасної утилізації теплової енергії.

На рис. 3 зображено графік зростання електричного ККД найбільш відомих у світі типів сонячних елементів за назвами лабораторій і по роках.

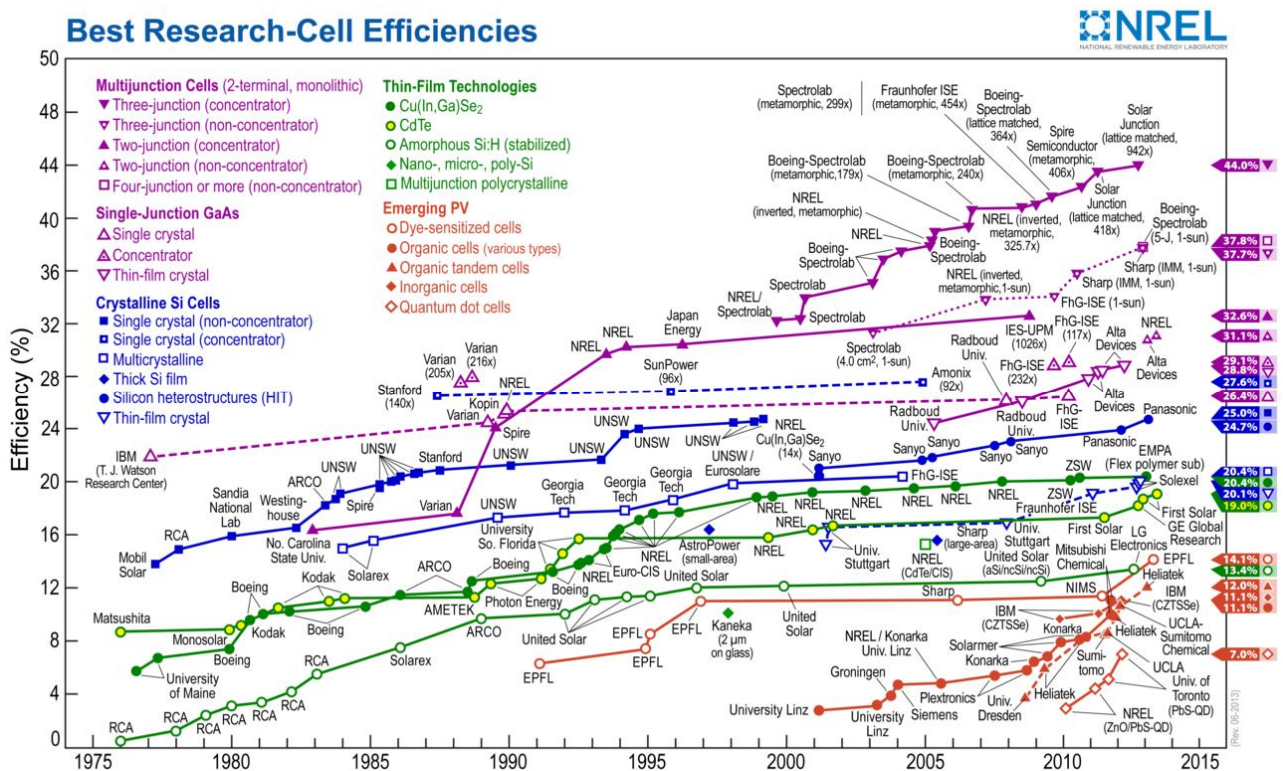


Рис. 3. Динаміка зростання електричного ККД найбільш відомих у світі типів сонячних елементів до 2015 року за даними NREL.

З діаграми можна зробити висновок, що більшість зусиль спрямовано на розвиток тонкоплівкових технологій, які потребують значно менше енергії у виготовленні матриць сонячних елементів і, відповідно, мають переваги у собівартості, виготовленні будь-яких геометричних форм для модулів, а також у виробництві тандемних та інших багатоперехідних сонячних елементів для концентраторних систем (three-junction concentrator). Зваживши на той факт, що електричний ККД плівкових технологій, у порівнянні з кремнієвими моно- і полікристалічними,

зростає більш інтенсивно, подальший розвиток цих технологій триває не тільки в напрямку підвищення ККД, а і в напрямку зниження інтенсивності процесів деградації. Слід також зазначити, що останнім часом на етапі досліджень і випробувань з'явилася ще одна група сонячних елементів (*Emerging PV*), до складу якої можна віднести елементи з мінералу перовскіту (*Perovskite cells*) з хімічною формулою CaTiO₃; ККД окремих дослідних зразків на сьогодні має вже більше 20%, з вартістю значно нижче кремнієвих, але не до кінця відпрацьованою технологією. Також до

цієї групи (*Emerging PV*) відносяться елементи *Quantum dot cells*, які мають теоретично можливий ККД на рівні 66% з аналогічним недоліком.

3. Температурні коефіцієнти – найважливіші характеристики КФЕМ. Однією з важливих характеристик сонячних елементів є температурний коефіцієнт $TC(I_{sc})$, $TC(P)$ і особливо $TC(U_{oc})$, який у діапазоні температур для наземного використання має приблизно лінійний характер, активно впливаючи на електричну складову.

Залежності струму, напруги і потужності сонячних елементів від температури згідно [2] виглядають наступним чином:

$$TC(I_{sc}) = \Delta I / \Delta T = +\alpha mA / ^\circ C, \quad (3)$$

$$TC(U_{oc}) = \Delta U / \Delta T = -\beta mV / ^\circ C, \quad (4)$$

$$TC(P) = \Delta P / \Delta T = -\gamma mW / ^\circ C. \quad (5)$$

Знак "плюс" перед α свідчить про те, що зі зростанням температури відбувається підвищення струму, а знаки "мінус" перед β і γ вказують на те, що зі зростанням температури відбувається зниження напруги і потужності сонячного елемента. Також потрібно додати, що характеристика зниження напруги від зростання температури зазвичай має більш круту форму, ніж позитивна залежність струму від температури. Ця особливість більш притаманна сонячним елементам, виготовленим на основі кремнію, і зайвий раз підкреслює необхідність їх охолодження.

У таблиці 1, згідно [3], зображені температурні коефіцієнти по мірі зростання основних найбільш поширених сонячних елементів, які випускає на сьогодні світова промисловість. Вимірювання проводились у спеціальній термостатичній камері в межах наземних температур від 25 до 60°C з кроком у 5°C і в умовах СУВ за допомогою сонячного імітатора PASAN IIIb.

Таблиця 1. Температурні коефіцієнти основних найбільш поширених сонячних елементів, які випускає на сьогодні світова промисловість

Теплові коеф-ти сонячних ел-тів	Pmax γ_{rel} (%/°C)	Voc β_{rel} (%/°C)	Isc α_{rel} (%/°C)	FF κ_{rel} (%/°C)
a-Si (SJ)	-0.13	-0.33	+ 0.12	+ 0.10
CdTe	-0.21	-0.24	+ 0.04	- 0.01
Microm. (a-Si/μcSi)	-0.36	-0.37	+ 0.05	- 0.04
CIGS	-0.36	-0.31	+ 0.02	- 0.08
c-Si wafer-based	-0.45	-0.33	+ 0.06	- 0.19
TF - Si	-0.48	-0.41	+ 0.15	- 0.22

В таблиці 1 прийняті наступні скорочення:

a-Si – тонкоплівкові сонячні елементи на базі аморфного кремнію; Cd-Te – тонкоплівкові сонячні елементи на базі кадмій-телуру; CIGS – тонкоплівкові сонячні елементи мідно-індій-галій-селенові; c-Si – сонячні елементи на базі криста-

лічного кремнію; TF-Si – тонкоплівкові сонячні елементи на базі кремнію; Microm.(a-Si/ μ c-Si) – тандемні сонячні елементи на базі аморфного та мікрокристалічного кремнію.

Зазвичай з метою будівництва ФЕС на плоских фотоелектричних модулях в умовах рівності

ККД перевага віддається модулям із мінімальними температурними коефіцієнтами по напрузі.

З огляду на представлену таблицю 1, згідно [3] видно, що в умовах сонячного випромінювання, пов'язаного зі зростанням температури, найбільш відчутні втрати електричної потужності P_{\max}

несуть сонячні елементи на базі кристалічного і тонкоплівкового кремнію, у яких значення температурних коефіцієнтів має найбільшу величину.

На рис. 4 і 5 показано зміну напруги холостого ходу U_{oc} і потужності P в залежності від температури.

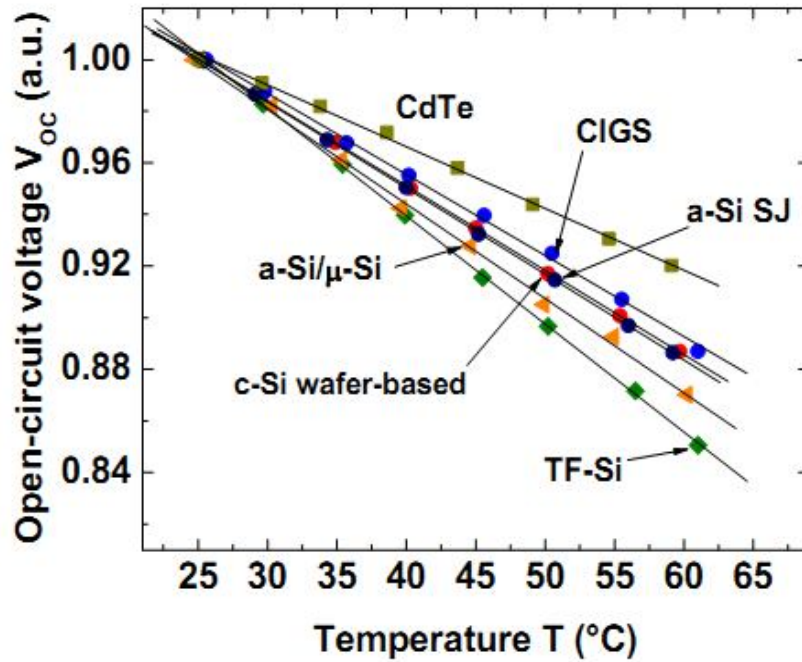


Рис. 4. Зміна напруги холостого ходу найбільш відомих сонячних елементів $TC(U_{oc})$ у залежності від діапазону наземних температур T , °C.

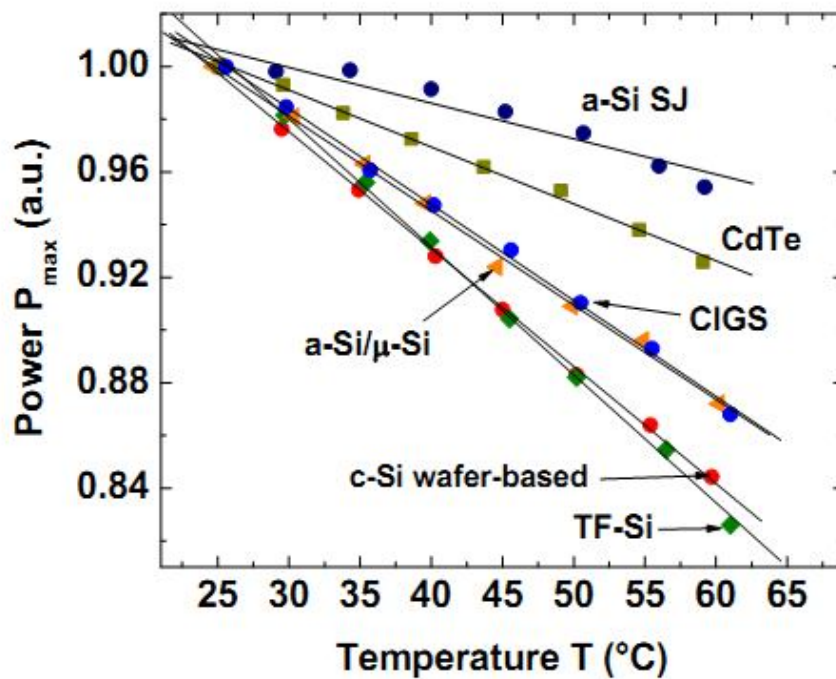


Рис. 5. Графік зміни потужності найбільш відомих у світі сонячних елементів $TC(P)$ в залежності від наземної температури T , °C.

Таблиця 2. Втрати у найбільш відомих сонячних елементах за умови нагрівання їх поверхні до температури 60°C, 70°C і 80°C, СУВ – стандартні умови випробування ($T = 25^\circ\text{C}$).

Втрати в сонячних елементах відносно СУВ	At 60°C $\Delta T=35^\circ\text{C}$ (OR)	At 70°C $\Delta T=45^\circ\text{C}$ (BAPV)	At 80°C $\Delta T=55^\circ\text{C}$ (BIPV)
a-Si SJ	-4.6%	-5.8%	-7.2%
CdTe	-7.4 %	-9.4%	-11.6%
Microm.	-12.6	-16.2%	-19.8%
CIGS	-12.6 %	-16.2%	-19.8%
c-Si wafer-based	- 15.7 %	-20.3%	-24.8%
TF Si	-16.8%	-21.6%	-26.4%

В таблиці 2 достатньо детально викладено реальні втрати у сонячних елементах, які випускає світова промисловість, при нагріванні їх поверхні до 60°C, 70°C і 80°C в умовах сонячного випромінювання у порівнянні зі стандартною температурою випробувань фотоелектричних модулів ($t = 25^\circ\text{C}$).

Зважаючи на втрати, які несуть сонячні елементи в умовах потужного сонячного випромінювання, а також на рис. 2, можна припустити, що показник негативного значення температурного коефіцієнта $TC(U_{oc})$ вказує не стільки на компенсацію електричної енергії сонячних елементів в умовах охолодження, як на змогу одержання більшої частини перетвореного сонячного випромінювання у вигляді теплової енергії.

Цікавими для дослідження і прискіпливої уваги у плані застосування в КФЕМ є сонячні елементи на основі полімер-фулеренових сполук [4], температурні характеристики яких представлено на рис. 6. Ці елементи відносяться до вищевказаної групи *Emerging PV*. З огляду на представлені авторами графіки видно, що максимальних значень електричного ККД ці елементи досягають у межах 50°C. Це означає: якщо це значення температури не входить до діапазону температур, які викликають підвищену деградацію або інші негативні наслідки під час експлуатації цих сонячних елементів, то його доцільно стабілізувати в циркуляційних контурах у якості робочого режиму КФЕМ.

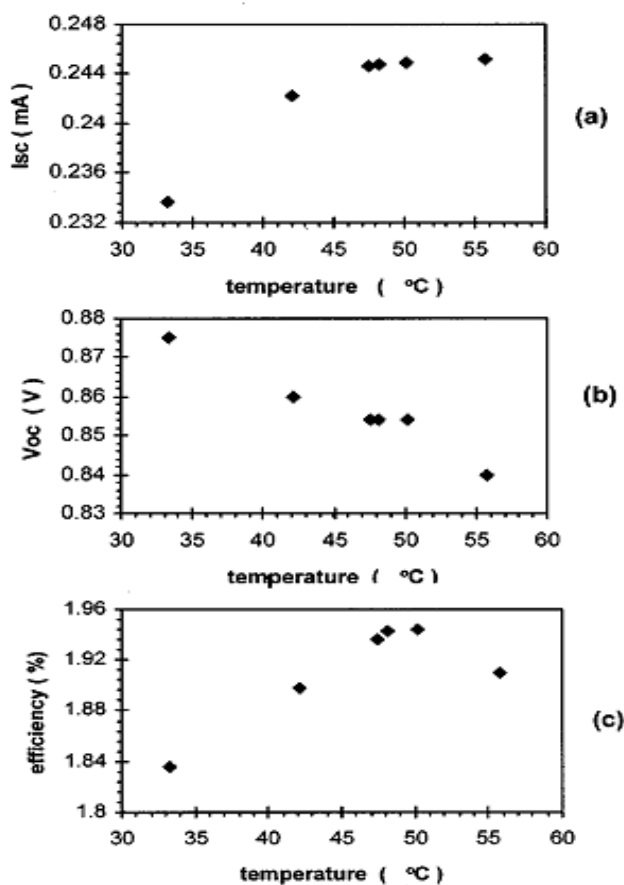


Рис. 6. Графік зміни характеристик сонячних елементів на основі полімер-фулеренових сполук у залежності від діапазону наземних температур $T, ^\circ\text{C}$.

Не менш цікавий інтерес викликають відомості [5] про температурні характеристики сонячних елементів на основі перовскіту (*Perovskite cels*), температурний максимум ККД яких припадає на діапазон температур від 35 до 50°C (рис. 7).

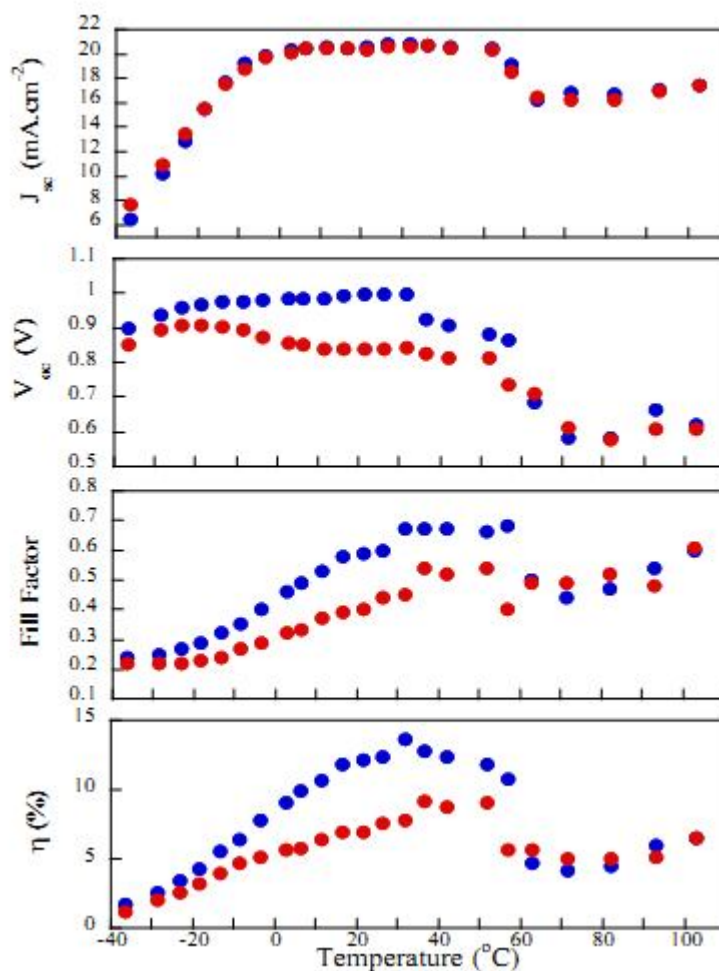


Рис. 7. Графіки зміни характеристик сонячних елементів на основі перовскіту в залежності від діапазону наземних температур T , °C (червоним кольором на графіках позначено заміри в напрямку зростання температури, а синім – у зворотньому).

Висновки. 1. Найбільш привабливими для використання в комбінованих фотоелектричних модулях із достатньо відпрацьованою технологією є сонячні елементи на базі кристалічного (с-Si), а також тонкоплівкового (TF-Si) кремнію.

2. Найменш привабливими для використання в комбінованих модулях є сонячні елементи на базі аморфного кремнію (a-Si) та кадмій-телуру (Cd-Te).

3. Цікавими для випробування можуть бути сонячні елементи на базі CIGS, на базі Micro.(a-Si/ μ s-Si) та на базі полімер-фулеренових сполук, але тільки після прийняття відпрацьованої технології.

4. Значення теплових коефіцієнтів, з точки зору практичного застосування, показують не тільки зміну струму або напруги в залежності від температури, а також і доцільність використання

охладження у КФЕМ (зокрема, певні межі теплових режимів).

1. Дисертація Кувшинова В.В. Повышение мощности серийных солнечных установок при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии. – 2011р.

2. P. Kamkird, N. Ketjov, W. Rakwichian, S. Sukchai. Investigation on temperature coefficient of three types photovoltaic module technologies under Thailand operation condition. – 30.09. 2011р.

3. Virtuani, D. Pavanello, G. Friesen. Overview of temperature coefficient of different thin film photovoltaic technologies” alessandro.virtuani@supsi.ch alessandro.virtuani@supsi.ch>

4. E.A. Katz, D. Faiman, J. M. Kroon and other...”Temperature dependence for the photovoltaic device parameters of polymer-fullerene solar cells under operating conditions” 2001р.

5. Ludmila Cojocar, Satoshi Uchida, Yoshitaka Sanehira and other “Temperature effects on the photovoltaic performance of planar structure perovskite solar cells”.

REFERENCES

1. Candidate's thesis of Kuvshinov V. V. «Increase of power serial solar installations at the combined development of thermal and electric energy» 2011p.

2. P. Kamkird, N. Ketjov, W. Rakwichian, S. Sukchai “Investigation on temperature coefficient of three types photovoltaic module technologies under Thailand operation condition” 30.09. 2011p.

3. Virtuani, D. Pavanello, G. Friesen “Overview of temperature coefficient of different thin film photovoltaic technologies” alessandro.virtuani@supsi.ch <alessandro.virtuani@supsi.ch>

4. E.A. Katz, D. Faiman, J. M. Kroon and other...”Temperature dependence for the photovoltaic device parameters of polymer-fullerene solar cells under operating conditions” 2001p.

5. Ludmila Cojocar, Satoshi Uchida, Yoshitaka Sanehira and other “Temperature effects on the photovoltaic performance of planar structure perovskite solar cells”.

В.И.Шевчук (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Перспективы использования солнечных элементов для комбинированных фотоэлектрических модулей

Описаны особенности развития фотоэнергетики в настоящее время. В частности, уделено внимание преимуществам комбинированных фотоэлектрических модулей. Рассмотрена возможность применения различных типов фотоэлектрических элементов в комбинированных фотоэлектрических модулях посредством сравнения температурных характеристик. Библ. 5, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: комбинированный фотоэлектрический модуль, температурный коэффициент, солнечный элемент.

Shevchuk V. (Institute for renewable energy at NAS of Ukraine, Kyiv)

Prospects of solar cells using for the combined PV modules

There have been described a feature peculiarities of photovoltaic now. In particular the attention is paid to advantages of the combined PVmodules. There have been considered possibility of various types PV cells application in the combined PVmodules by means of comparison of temperature characteristics. References 5, tables 2, figures 7.

Keywords: combined PV module, temperature coefficient, solar cell.

SYNOPSIS

Article contains concise review of some power directions concerning photovoltaic development. The part of article is devoted to the combined PVmodules, their advantages, a ratio of in a complex generated thermal and electric power among themselves, and also to some questions of their interaction and regulation, certain problems in questions of connection, a complete set and reliability of work of all parts of the module. In particular it is about losses which are sustained by solar cells in the range of land temperatures during operation, about use in combined PVmodules of solar cells of various types from the point of view of the size of their temperature coefficients. Data in the form of tables and schedules from a number of foreign authors about change of certain electric characteristics of solar cells within values of temperatures for land application are used. Except temperature characteristics of film and crystal solar cells, also some cells entering into group of the perspective recently appeared Emerging PV are considered. In article the questions of ways of regulation of electric and thermal capacities in combined PVmodules are raised. Recommendations of what solar cells it is better to use for work in combined PVmodules are made.

Стаття надійшла до редакції 21.06.16

Остаточна версія 12.08.16