

## АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКОЛОГІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 519.713

### ІНФРАЧЕРВОНА ТЕРМОГРАФІЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ, НАГРІТИХ ТЕМНОВИМ СТРУМОМ

*Божко К. М., Дунаєвський В. І., Котовський В. Й., Маслов В. П., Порєв В. А.,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

*Інфрачервона термографія дозволяє вимірювати температурне поле сонячних елементів і за локальними місцями із підвищеною температурою контролювати наявність дефектів. Особливістю запропонованого методу є нагрівання сонячних елементів зворотним темновим струмом від зовнішнього джерела. Метод застосовано для окремих сонячних елементів, виготовлених із кристалічного кремнію. Розподіл температури на поверхні сонячного елемента є нерівномірним при наявності дефектів. Осередки дефектів мають підвищену провідність і нагріваються більше, ніж основний масив кремнієвої пластини. Середня температура нагрітої поверхні становить приблизно 313 К. Отримані термограми мають розміри 320x232 піксел і дозволяють локалізувати дефект з точністю 0,25 мм. При цьому температурна чутливість термографа дорівнює 0,07 К.*

*Запропонований метод можна застосовувати для пошуку дефектів типу електричного пробоя рп- переходу, які мають резистивний характер. Розглянуто також суттєві обмеження попереднього методу, який діє на основі нагрівання сонячних елементів прямим темновим струмом. Апробовано методику локалізації місць дефектів кристалічного кремнію за термограмами поверхні сонячного елемента.*

***Ключові слова:** інфрачервона термографія, сонячний елемент, темновий струм.*

#### **Вступ**

Динамічний розвиток сонячної енергетики обумовлює підвищені вимоги до експлуатаційних параметрів і характеристик сонячних елементів (СЕ), зокрема, збільшення коефіцієнту корисної дії та терміну їх експлуатації. Одним із технологічних рішень запобігання деградації СЕ з часом є застосування нових типів клейових з'єднань їх конструктивних елементів, які покращують відведення тепла і стабілізують температурний режим роботи СЕ. Новітні досягнення в цьому напрямі, які базуються на використанні мікро- і нано-наповнювачів у клейових з'єднаннях розглянуто в [1].

Відомо, що температурний режим роботи СЕ впливає на коефіцієнт корисної дії. Так, при підвищенні температури СЕ на 10 градусів відбувається зниження його коефіцієнту корисної дії на 3% [2]. При цьому дефекти типу електричного пробоя є причиною появи локальних осередків із підвищеною температурою на поверхні сонячного елемента [3].

Наведені вище факти свідчать про необхідність і доцільність дослідження температурного поля СЕ і визначають актуальність задачі контролю температурного поля СЕ. Ефективним засобом дослідження температурних полів за інформативністю, швидкодією та точністю є телевізійні пірометри. Проте телевізій-

ні пірометри мають принципове обмеження щодо діапазону вимірюваних температур [4].

Для виявлення дефектів типу електричного пробою рп- переходу, що є елементом діагностики СЕ та панелей на їх основі як в лабораторних умовах, так і при їх експлуатації, можна використати інфрачервоні термографи.

Поширений метод виявлення дефектів СЕ на основі вимірювання температурного поля передбачає нагрівання СЕ при поглинанні світла (сонячного або штучного), що значно обмежує умови експериментального дослідження, особливо при експлуатації сонячних панелей.

Задачею, яку перед собою ставлять автори даної статті, є вдосконалення методу термографічної діагностики СЕ та експериментальне підтвердження його дієвості на зразках СЕ із кристалічного кремнію.

### Метод діагностики СЕ на основі нагрівання прямим струмом

Останнім часом для виявлення дефектів СЕ використовують нагрівання темновим струмом [3]. При цьому за допомогою термографа були отримані зображення СЕ, на поверхні яких візуально ідентифікують зони локального перегріву, що знаходяться, в місцях розташування дефектів.

Особливістю методу, яким користується автор [3], є нагрівання СЕ прямим темновим струмом від зовнішнього джерела. Отримані зображення температурного поля поверхні СЕ мають локальні місця із підвищеною температурою. Місця локального перегріву мають темне забарвлення (рис.1).



Рис. 1. Термограма поверхні СЕ, нагрітого прямим темновим струмом від зовнішнього джерела напруги 0,55 В, автор Ali Ibrahim, [3]

На рис. 1 видно, що окрім місць дефектів (точок перегріву у вигляді темних плям) додатково нагріваються також шини живлення у периферійній частині СЕ, оскільки вони мають відносно малий опір. Головною метою методу [3] є виявлення місць утворення паразитних діодів Шотткі, які виконують роль шунтів до СЕ.

Для аналізу методу розглянемо розширену еквівалентну схему СЕ, яка складена із діода, послідовного опору  $R_n$  та опору шунта  $R_{ш}$ . В запропонованому нами варіанті еквівалентної схеми враховано додатково опір дефекту  $R_{деф}$  та опір діоду у відкритому стані  $R_{діоду}$  (рис. 2).

Величини опорів еквівалентної схеми (Рис.1) мають співвідношення:

$$R_n < R_{діоду} \ll R_{деф} < R_{ш} \quad (1)$$

СЕ – це фотодіод, який має розподілену по площі структуру. Якщо предста-

вити цю структуру як сукупність діодів із паралельним з'єднанням, то при прямому включенні струм пройде переважно через ті діоди, які мають найменший опір  $R_{\text{діоду}}$  або через місця дефектів типу паразитних діодів Шотткі [3].

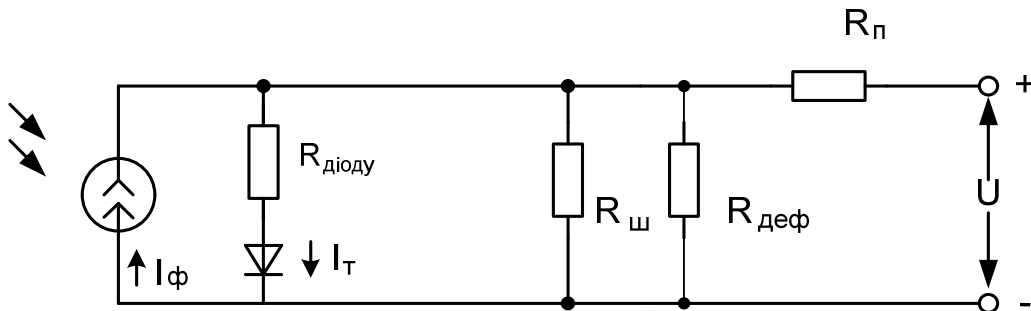


Рис. 2. Еквівалентна схема сонячного елемента за наявності дефекту; де  $I_{\phi}$  – фотострум,  $I_T$  – темновий струм

Еквівалентну схему СЕ при протіканні прямого темного струму від зовнішнього джерела наведено на рис. 3. Фотострум при цьому відсутній, а темновий струм розпадається на три гілки: струм через шунт  $I_{Tш}$ , струм через дефект типу пробую  $I_{Tдеф}$  та струм через діод  $I_{Tдіоду}$ . За наявності дефекту типу паразитного діоду Шотткі, який є шунтом до СЕ, додатково утворюється четверта гілка темного струму  $I_{деф.Шотткі}$  (рис. 3).

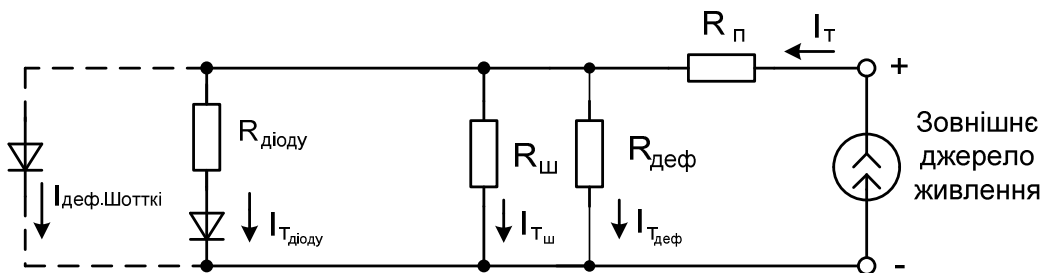


Рис. 3. Еквівалентна схема СЕ із прямим темновим струмом

Співвідношення між гілками темного струму при прямому включенні СЕ за наявності дефекту типу паразитного діоду Шотткі мають вигляд:

$$I_{\text{деф.Шотткі}} > I_{T\text{діоду}} \gg I_{T\text{деф}} > I_{Tш} \quad (2)$$

Зазначимо, що пошук дефектів СЕ за методом нагрівання прямим темновим струмом є дуже корисним при діагностиці сонячних панелей, які побудовані на основі паралельного з'єднання СЕ. В цьому випадку дефектний СЕ буде виконувати роль шунта для всіх своїх сусідів, які мають з ним паралельне з'єднання.

Але при послідовному з'єднанні СЕ, характерному для більшості сонячних панелей малої і середньої потужності, дуже важливою є діагностика на наявність дефектів, які утворились внаслідок електричного пробую і мають резистивний характер. Такої діагностики розглянутий вище метод не забезпечує. В цьому полягає обмеженість запропонованого в [3] рішення і необхідність розробки та застосування іншого методу.

### Обґрунтування методу нагрівання СЕ зворотним темновим струмом

Нами запропоновано здійснювати нагрівання СЕ темновим струмом за схемою зворотного включення, тобто зворотним темновим струмом і вимірювати при цьому температурне поле на його поверхні за допомогою інфрачервоного термографу.

За цим методом можна виявляти дефекти типу електричного пробоя, які мають резистивний характер, тобто є додатковими шунтовими опорами СЕ. Оскільки ці дефекти є по суті лінійними опорами, то зворотний темновий струм СЕ лінійно залежить від напруги. Це дозволяє підтримувати стабільною потужність нагріву і створює умови для відтворення стаціонарного режиму теплопередачі в СЕ при серійних вимірюваннях.

При виникненні електричного пробоя в масиві напівпровідника виникає додатковий шунтовий опір. При цьому загальний опір шунтів зменшується (шунтові опори з'єднані паралельно), струм через шунтові опори збільшується і на цю ж величину зменшується струм, який віддає сонячний елемент у коло навантаження. Коефіцієнт корисної дії сонячного елемента зменшується, а сам він перегрівається в місці появи електричного пробоя.

Еквівалентна схема СЕ для запропонованого нами методу його нагрівання зворотним темновим струмом наведена на рисунку 4.

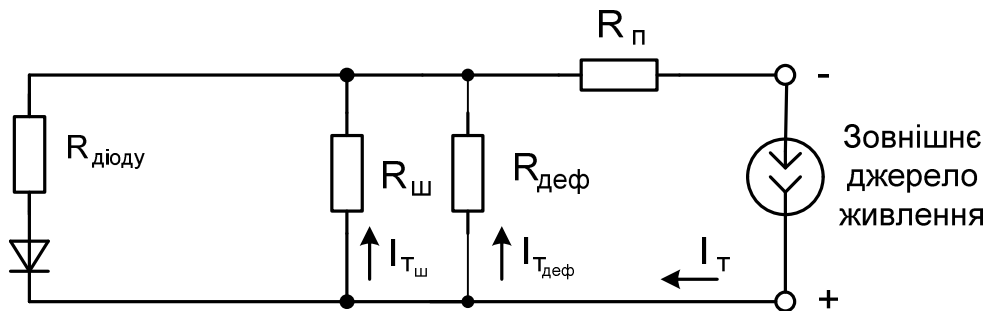


Рис. 4. Еквівалентна схема СЕ із зворотним темновим струмом

Темновий струм  $I_T$  розпадається на дві гілки і тече переважно через опір дефекту  $R_{\text{деф}}$ , оскільки той має менше значення опору у порівнянні із опором шунта  $R_{\text{ш}}$ . При цьому методомі струм не тече через дефекти типу шунтових діодів Шоттки, оскільки на них подають зворотну напругу (рис. 4).

Дефекти впливають на форму вольт-амперної характеристики СЕ. За наявності дефектів вольт-амперна характеристика (ВАХ) СЕ буде тим більше відхилитись від ідеальної форми, якою є прямокутник, чим більша кількість цих дефектів і чим меншою є величина опору шунта (рис. 5).

Попереднє отримання ВАХ прискорює діагностику СЕ на наявність дефектів, оскільки для термографічного методу доцільно обирати перш за все ті зразки, які мають «завал» ВАХ (зразки 1 та 2 – рис. 5).

При нагріванні темновим струмом від зовнішнього джерела живлення  $U_3$  (полярність джерела при цьому має бути зворотною) місця пробоя будуть додатково нагріватись із потужністю:

$$P_{\text{нагр.дод}} = U_3^2 / R_{\text{деф}} \quad (3)$$

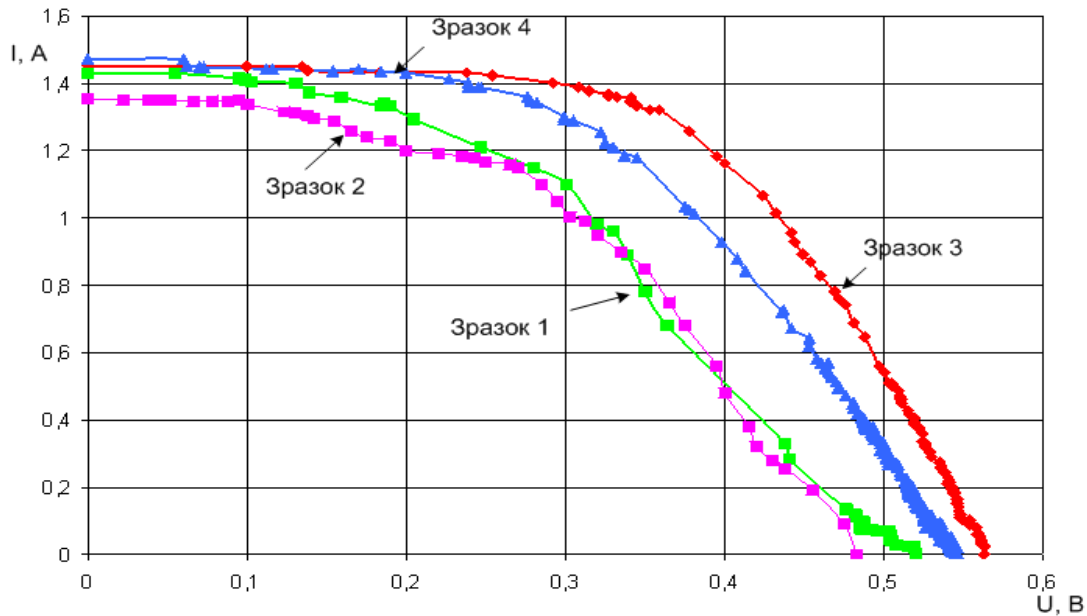


Рис. 5. ВАХ зразків СЕ із різною величиною опору шунта

На зображеннях поверхні СЕ, отриманих за допомогою інфрачервоного термографа, виявляють локальні області із підвищеною температурою, які свідчать про наявність дефектів типу електричного пробоя всередині СЕ саме під місцями їх розташування. Вимірювання температурного поля СЕ в процесі нагрівання його темновим струмом дозволяє визначати координати місць локального перегріву («гарячих точок») поверхні СЕ над дефектами типу електричного пробоя рп-переходу як в лабораторних умовах, так і в умовах експлуатації.

На основі запропонованого нами методу термографії СЕ при нагріванні зворотним темновим струмом розроблена методика вимірювання температурного поля, яка дозволяє виконувати діагностику дефектів СЕ, зокрема:

- встановлювати координати;
- вимірювати температуру;
- оцінювати площу дефекта.

### Експериментальні дослідження

Експерименти з візуалізації температурних полів СЕ реалізовано у навчально-науковій лабораторії неінвазивних методів дослідження біологічних об'єктів НТУУ «КПІ». Стенд для вимірювання температурного поля СЕ побудовано на основі інфрачервоного термографа, з'єданого із персональним комп'ютером (рис. 6). Термограф налаштовано на вимірювання температури в діапазоні 20 – 70 °С.

Інфрачервоний термограф побудований на основі фотоприймальної камери та персонального комп'ютера і має такі параметри та характеристики:

- матриця камери має 320 x 232 пкс;
- діапазон спектральної чутливості камери 2-5,3 мкм;

- температурна чутливість 0,07 °С;
- охолодження матриці здійснюють рідким азотом (0,8 л на 6 годин неперервної роботи).

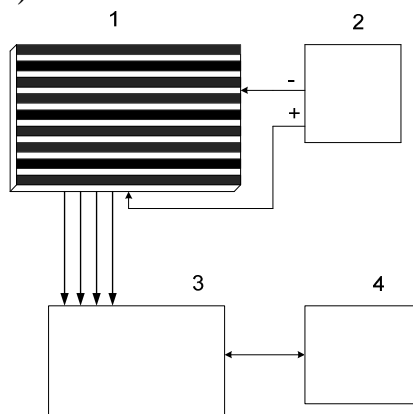


Рис. 6. Схема електрична структурна стенду для вимірювання температурного поля СЕ; де 1 – сонячний елемент, 2 – лабораторний блок живлення, 3 – термограф, 4 – персональний комп'ютер

Об'єктом дослідження були чотири зразки СЕ на основі кристалічного кремнію виробництва компанії Wacker Schott Solar GmbH (Німеччина).

Спочатку був визначений шунтовий опір всіх чотирьох СЕ. Результати вимірювання наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Шунтовий опір СЕ

№ СЕ	1	2	3	4
$R_{ш}, \text{Ом}$	$22 \pm 0,5 \text{ Ом}$	$55 \pm 1 \text{ Ом}$	$73 \pm 1 \text{ Ом}$	$70 \pm 1 \text{ Ом}$

Для вимірювання температурного поля було відібрано зразок №1, оскільки він мав найменший шунтовий опір. Для нагрівання застосували лабораторний блок живлення, який дозволяє отримувати напругу до 30В з кроком 0,1В. Струм вимірювали мультиметром М890G, який має клас точності 1,2% в діапазоні 2А. Режим нагрівання СЕ:

- напруга +12 В;
- струм 0,42 А;
- потужність 5 Вт;
- час нагрівання – 10 хвилин.

Отримане зображення температурного поля поверхні СЕ (рис. 7) має характерні світлі плями, які є локальними областями перегріву.

Комп'ютерна обробка термограми дозволила побудувати розподіл температури за горизонтальним та вертикальним маркерами (рис. 8).

Для обчислення середньої величини температури поверхні СЕ довільно відібрано 20 точок, результат обчислення наведено у табл. 2.

Середня температура поверхні  $T_c = 39,86 \pm 0,34 \text{ }^\circ\text{C}$ . Середнє квадратичне відхилення  $\Delta T = 0,17 \text{ }^\circ\text{C}$  отримане для рівня значущості  $\alpha = 0,05$  з достовірністю

$S = 0,940$  в інтервалі  $\pm 2\Delta T$ .

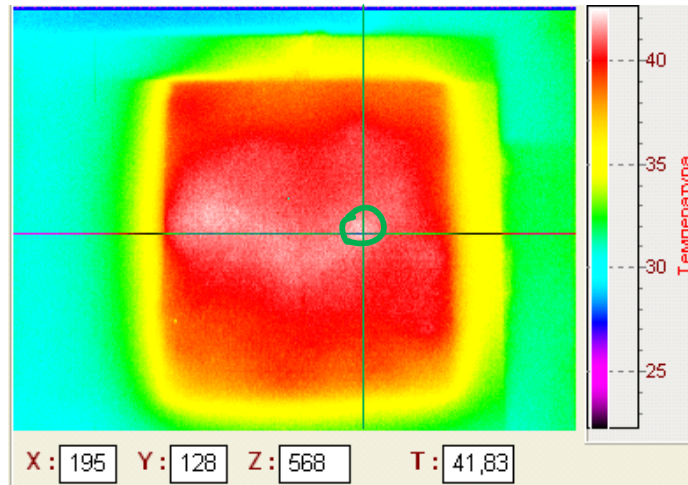


Рис. 7. Температурне поле СЕ та визначення областей перегріву

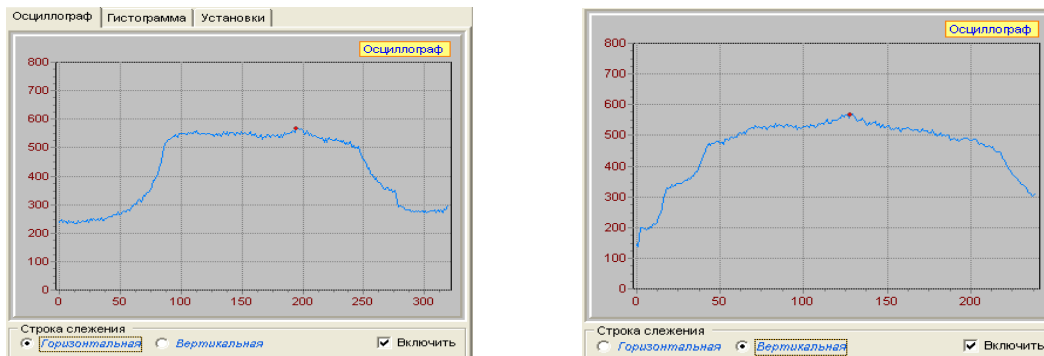


Рис. 8. Горизонтальний та вертикальний розподіл температури

Таблиця 2. Температура  $T$  точок поверхні СЕ з координатами  $X, Y$

№	X	Y	T, °C	№	X	Y	T, °C
1	95	50	39,45	11	205	167	39,69
2	228	51	38,65	12	223	65	39,45
3	98	202	38,10	13	209	85	40,34
4	243	200	37,66	14	200	100	40,34
5	119	73	39,72	15	188	113	40,66
6	131	80	40,24	16	181	128	40,72
7	144	98	40,59	17	163	146	40,83
8	163	122	40,41	18	150	161	40,28
9	181	139	41,24	19	144	170	39,90
10	191	149	40,72	20	114	202	38,34
Середня температура							39,85

Аналіз графіків розподілу температури (рис. 8) показує, що точка поверхні з координатами  $X = 195$  та  $Y = 128$  має екстремально високу температуру

$T=41,83$  °С і дійсно є місцем розташування дефекту. Абсолютна похибка визначення координат складає один піксел або 0,25 мм.

Апробована нами методика дозволяє попіксельно вимірювати температуру поверхні СЕ з абсолютною похибкою 0,1 °С. Крім того, застосована нами схема зворотного включення СЕ в електричне коло дозволяє контролювати потужність нагріву та відтворювати умови експерименту.

### **Висновки**

Запропоновано метод термографії СЕ при нагріванні зворотним темновим струмом, який дозволяє виявляти дефекти типу електричного пробою і мають характер резистивного шунта, в окремих СЕ або у сонячних батареях.

Апробовано методику локалізації місць дефектів типу електричного пробою за аномальним розігріванням поверхні СЕ над місцями ушкоджень. Цю методику доцільно поєднувати з попереднім вимірюванням ВАХ та шунтового опору СЕ. Зразки із відносно малим шунтовим опором слід в першу чергу досліджувати на наявність дефектів.

Нами було з'ясовано, що в лабораторних умовах доцільно застосовувати нагрівання СЕ зворотним, а не прямим, темновим струмом, що забезпечує високий ступінь відтворення умов експерименту при його повторенні.

Наступними кроками по впровадженню запропонованого методу можуть бути:

- розробка та застосування пристрою електронного стабілізатора потужності, що позбавить необхідності ручного регулювання її величини в процесі нагрівання СЕ;
- виконання порівняльного аналізу СЕ, клейові з'єднання яких були виготовлені за різною рецептурою клейових наповнювачів;
- розрахунок теплофізичних параметрів клею за знятими термограмами;
- дослідження динаміки температурного поля СЕ при нестационарному режимі нагрівання.

### **Література**

1. Маслов В. П. Фізико-технологічні проблеми з'єднання прецизійних деталей оптико-електронних приладів. – К.: НТУУ «КПІ» – 2012. – 160 с.
2. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2011. – 168 с.
3. Ali Ibrahim. Dark Current -Voltage Characteristics and Lock-in Thermography Techniques as Diagnostic Tools for Monocrystalline Silicon Solar Cells // International Journal Of Renewable Energy Research, IJREP, Vol.1, №3, – 2011. Pp.60-65.
4. Порев В. А., Маркін М. О. Мультиспектральні телевізійні прилади контролю високотемпературних технологій / В. А. Порев, О. М. Маркін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харків, 2006. – № 4/2 (22). – С. 34 – 39.

*Надійшла до редакції  
30 вересня 2013 року*

© Божко К. М., Дунаєвський В. І., Котовський В. Й, Маслов В. П., Порев В. А., 2013