

УДК: 621.311.171

## ДИЕЛЕКТРИЧНИЙ ТЕПЛОПРОВІДНИЙ КОНТАКТ ДЛЯ ТЕПЛООБМІННИКА ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

**Р. В. Зайцев**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

Надійшла до редакції 07.06.2017

У роботі запропоновано теплопровідний діелектричний контакт для сонячних елементів фотоенергетичної установки на основі плівкової структури  $Al_2O_3/ZnO/Cr/Cu$ . Визначено оптимальні режими отримання зазначених шарів, ключовим з яких є отримання бар'єрного бездефектного шару оксиду алюмінію. Проведено експериментальну апробацію зазначеної структури, котра підтвердила можливість використання таких шарів для створення сонячної батареї на основі елементів із структурою  $InGaP/InGaAs/Ge$  для гібридної фотоенергетичної установки з охолодженням.

**Ключові слова:** теплопровідний діелектричний контакт, сонячний елемент, фотоенергетична установка.

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЙ КОНТАКТ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКА ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**Р. В. Зайцев**

В работе предложен теплопроводящий диэлектрический контакт для солнечных элементов фотоэнергетических установок на основе пленочной структуры  $Al_2O_3/ZnO/Cr/Cu$ . Определены оптимальные режимы получения указанных слоев, ключевым из которых является получение барьерного бездефектного слоя оксида алюминия. Проведена экспериментальная апробация указанной структуры, которая подтвердила возможность использования таких слоев для создания солнечной батареи на основе элементов со структурой  $InGaP/InGaAs/Ge$  для гибридной фотоэнергетической установки с охлаждением.

**Ключевые слова:** теплопроводящий диэлектрический контакт, солнечный элемент, фотоэнергетическая установка.

## DIELECTRIC THERMAL CONDUCTING CONTACT FOR HEAT EXCHANGER OF PHOTOENERGY SYSTEM

**R. V. Zaitsev**

The paper suggests conductive dielectric contact for photoenergy system solar cells based on  $Al_2O_3/ZnO/Cr/Cu$  film structures. The optimum mode of receive these layers, the key of which is to obtain defect-free aluminum oxide barrier layer, has been obtain. An experimental testing of these structures confirmed the possibility of such layers to create a solar cell based on the elements of the  $InGaP/InGaAs/Ge$  structure for hybrid photoenergy system with cooling.

**Keywords:** conductive dielectric contact, solar cell, photoenergy system.

### ВСТУП

Світові тенденції розвитку енергетичного ринку та пов'язаного з цим зростання споживання природних енергетичних ресурсів переконливо показують необхідність пошуку додаткових джерел енергії, які змогли б компенсувати нестачу наявних ресурсів, а в ідеалі – повністю замінити їх. Як свідчить практичний досвід США, Японії, Німеччини, один із шляхів розв'язання цієї задачі пов'язаний з перетворенням сонячної енергії в електричну енергію за допомогою напівпровідникових сонячних елементів (СЕ).

Найбільш розповсюдженим типом СЕ є приладові структури на основі моно- та полікристалічного кремнію товщиною до 200 мкм. Основною проблемою їх широкомасштабного використання є висока ціна електричної енергії, яку вони виробляють, що обумовлено високою матеріало- та енергоємністю технологічного процесу виготовлення. Для зниження ціни СЕ перспективним є використання систем, які працюють в умовах концентрованого сонячного випромінювання. Використання дзеркал дозволяє в сотні разів знизити витрати на СЕ. Проте застосування

ФЕП на основі кремнію традиційної конструкції при концентрованому сонячному випромінненні призводить до зниження ККД на порядок [1, 2]. В той же час використання багатоперехідних кремнієвих СЕ з вертикальними діодними комірками з підвищенням інтенсивності сонячного опромінення демонструє підвищення ККД [3, 4].

Розроблена раніше [5] фотоенергетична установка на основі багатоперехідних кремнієвих СЕ з вертикальними діодними комірками, яка має систему позиціонування та управління, що дозволяє збільшити кількість світлової енергії, що надходить на поверхню енергетичної установки, має багато переваг. Така фотоенергетична установка буде виробляти не тільки електричну енергію, а й теплу воду. Але поряд із цим на етапі впровадження виявилися суттєві недоліки щодо промислового виробництва таких установок, пов'язані з обмеженими обсягами виробництва багатоперехідних кремнієвих СЕ.

Разом з тим в даний час відбулося різке зростання обсягів виробництва і, як наслідок, істотне зниження вартості багатоперехідних СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge, обумовлене включенням в виробничий цикл численних підприємств КНР. Вони відрізняються стабільною роботою в умовах концентрованого випромінювання і, головне, мають робочу температуру, що досягає 70 градусів. Останнє істотно знижує вимоги до системи охолодження, дозволяючи спростити і здешевити її конструкцію. Важливою особливістю конструкції подібних СЕ є виконання металізації тильного і фронтального струмозмінювальних електродів з срібла, що дозволяє легко здійснювати комутацію СЕ, а також їх фіксацію на радіаторній пластині фотоенергетичного модуля методом пайки низькотемпературним припоєм.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У зв'язку з вищевикладеним, перспективним видається заміна в конструкції фотоенергетичного модуля сонячної батареї на основі кремнієвих СЕ батареєю з відповідним чином скомутованими СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge. Проведені роботи спрямовані на одночасну реалізацію в рамках запропонованого конструктивного рішення

електричного міжз'єднання окремих СЕ у батареї і ефективного теплового контакту СЕ до радіаторної пластини фотоенергетичного модуля.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В якості діелектричного теплопровідного шару був обраний шар  $Al_2O_3$ , зважаючи на легкість його отримання шляхом електрохімічного анодування алюмінію і його високу механічну та діелектричну міцність. Проведені на тестових пластинках алюмінію експерименти дозволили визначити оптимальний спосіб отримання діелектричного шару  $Al_2O_3$ , до складу якого входять такі основні стадії [6]:

1. Промивка у дистильованій воді.
2. Хімічне знежирення у водному розчині:
  - карбонат натрію  $Na_2CO_3$  (технічний, ГОСТ 5100-85) — 50 г/л;
  - тринатрійфосфат  $Na_3PO_4 \cdot H_2O$  (технічний, ГОСТ 201-76) — 50 г/л;
  - сульфонол  $C_nH_{2n+1}C_6H_4NaO_3S$  (ТУ 075 10508.135-98) — 0,5 г/л.
 Знежирення при температурі розчину 60–65 °С протягом 60 с.
3. Промивка у дистильованій воді.
4. Хімічне травлення та поліровка алюмінієвої пластини у водному розчині гідроксиду натрію NaOH (ЧДА, ГОСТ 4328-77) 80 г/л.
 

Травлення при температурі розчину 60–60 °С протягом 6 хвилин.
5. Промивка у дистильованій воді.
6. Анодування у 20 % водному розчині сірчаної кислоти  $H_2SO_4$  (ЧДА, ГОСТ 4204-77) при температурі 2–5 °С протягом 30 хв при густині струму 20, 200 або 500 мА/см<sup>2</sup>.
7. Промивка у дистильованій воді.
8. Зарощування пор у шарі  $Al_2O_3$  шляхом кип'ятіння у воді при температурі 98–100 °С протягом 30 хв.

За викладеним вище способом було отримано шість серій зразків, що відрізнялися умовами отримання: зразки серій № 1 та № 2 отримані при густині струму анодування 20 мА/см<sup>2</sup>, зразки серій № 3 та № 4 — 200 мА/см<sup>2</sup>, зразки серій № 5 та № 6 — 500 мА/см<sup>2</sup>. Зразки серій № 2, № 4 та № 6 додатково піддавалися кип'ятінню для зарощування пор [6].

Як зазначалося раніше [7], внаслідок великої різноманітності поліморфних і гідратних форм оксиду алюмінію анодний  $Al_2O_3$  має змінний склад. Експериментальні дані свідчать про те, що анодний  $Al_2O_3$  являє собою рентгеноаморфну тверду речовину, що складається з гідратованого оксиду алюмінію  $Al_2O_3 \cdot (H_2O)_n$ , де  $n = 0-3$ , розвинена внутрішня поверхня якого адсорбує аніони і катіони використаного електроліту.

Для дослідження та вибору оптимального режиму осадження були проведені рентгендифрактометричний аналіз та мікроскопія досліджуваних зразків серій № 1–6 за допомогою растрового тунельного мікроскопу РЕМ-106 (збільшення у 100–10000 разів) та металографічного мікроскопу Sigeta MM-700 (збільшення у 10–100 разів).

На рис. 1 наведено мікроскопічні знімки, отримані за допомогою мікроскопу Sigeta MM-700, характерні досліджуваним серіям зразків.

На рис. 2 наведено мікроскопічні знімки зразків із зарощеними порами, отримані за допомогою растрового електронного мікроскопу РЕМ-106.

На рис. 3 наведено рентгендифрактограму шару  $Al_2O_3$ , характерну для серій досліджуваних зразків із зарощеними порами.

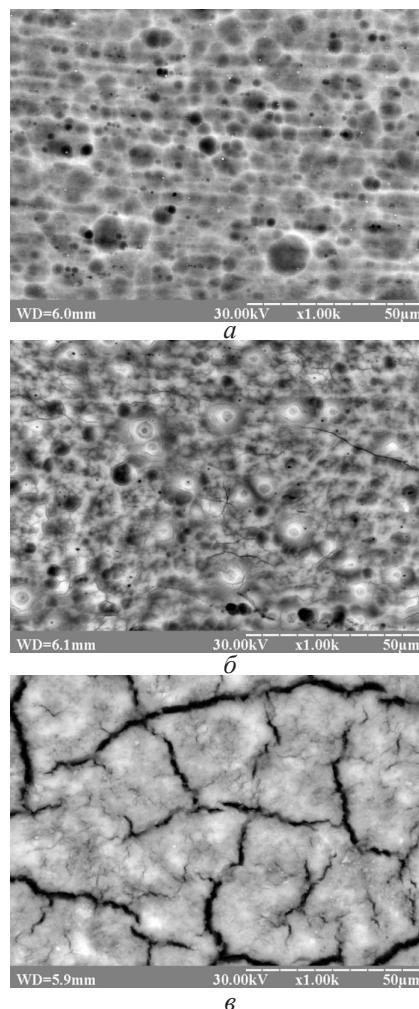


Рис. 2. Мікроскопічні знімки зразків серій № 2, № 4 та № 6 (а–в), отримані за допомогою растрового електронного мікроскопу РЕМ-106 при збільшенні у 1000 разів

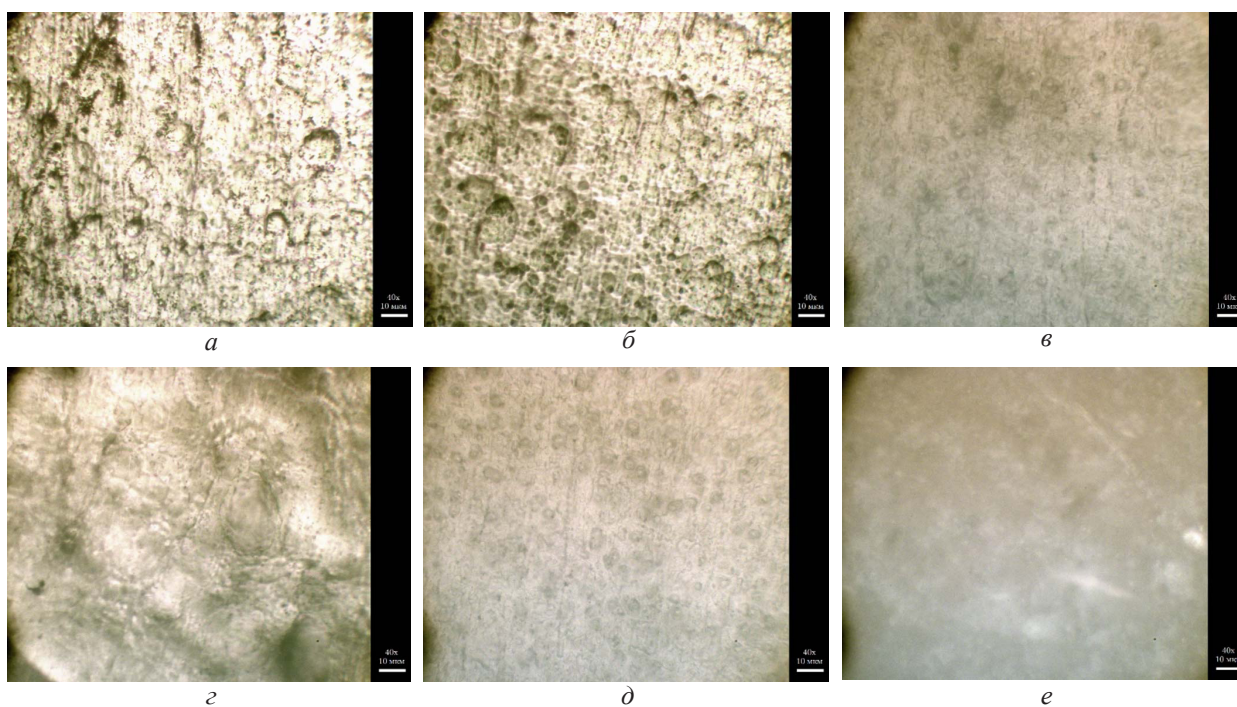


Рис. 1. Мікроскопічні знімки зразків серії № 1–6 (а–е), отримані за допомогою мікроскопу Sigeta MM-700 при збільшенні у 40 разів

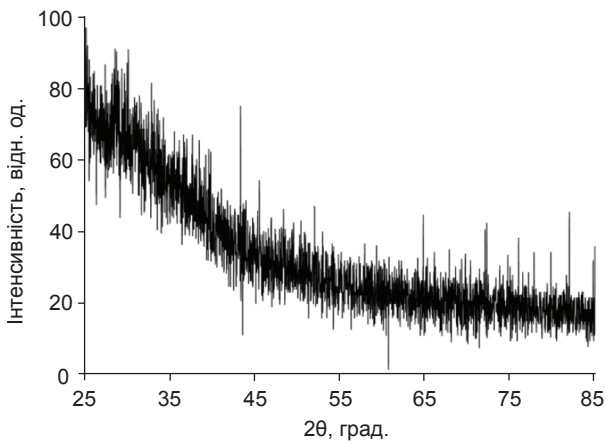


Рис. 3. Характерна рентгендифрактограма шару  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для серій досліджуваних зразків із зарощеними порами

Аналіз наведеної рентгендифрактограми свідчить про відсутність кристалічної фази, а вся плівка являє собою рентгеноаморфну тверду речовину. Дослідження мікроскопічних знімків дозволяє зробити висновок, що найбільшу товщину діелектричного шару можна отримати при збільшенні густини струму в електрохімічній комірниці до  $500 \text{ mA/cm}^2$ . Однак при таких струмах на мікроскопічних знімках (рис. 2) спостерігаються тріщини від  $0,5$  до  $5 \text{ мкм}$ , що призводить до втрати діелектричних властивостей шару. Тому оптимальним є режим отримання бар'єрного шару при густині струму не більше  $20\text{--}40 \text{ mA/cm}^2$  (зразки серії № 2).

Подальше дослідження електричного опору отриманих шарів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  зразків серії № 2 показало, що електричний опір таких шарів складає не менше  $1 \text{ кОм}$ . Зазначене може бути обумовлене недостатністю герметизації пор при кип'ятінні, через які відбувається шунтування шару.

Шляхом аналізу літературних джерел було запропоновано використання оксиду цинку для герметизації пор у шарі  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Для реалізації зазначеного рішення було сформовано структуру  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ . В роботі шари  $\text{ZnO}$  осаджувалися методом неактивного магнетронного розпилення на постійному струмі в вакуумній установці ВУП-5М. Мішень для розпорошення представляє собою спресовану механічну суміш дрібнодисперсійного порошку  $\text{ZnO}$  напівпровідникової чистоти. В якості пристрою, що розпилює, використовувався магнетрон з діаметром  $40 \text{ мм}$  та магнітною індукцією  $0,1 \text{ Тл}$ . Довжина

розрядного проміжку, що є зазором між магнетроном і підкладкою, складала  $70 \text{ мм}$ . Питома потужність магнетрону складала  $0,2 \text{ Вт/см}^2$ . Температура підкладки варіювалась від  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вихідний залишковий тиск у вакуумній камері, який створювався дифузійним насосом, складав  $3 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$ , робочий тиск аргонно-повітряної суміші в процесі розпилення варіювався в діапазоні значень  $(2,1\text{--}2,6) \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$  за рахунок зміни швидкості натікання аргону в вакуумну камеру, газування та натікання повітря.

Мікроскопічний аналіз поверхні зразків з причини малої товщини шару  $\text{ZnO}$  не виявив змін у морфології поверхні шару відносно зображених на рисунках 1 та 2.

Дослідження електричного опору отриманих шарів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$  на поверхні алюмінію показало, що електричний опір таких шарів складає більше  $2 \text{ кОм}$ . Зазначений електричний опір є достатнім для ефективного монтажу СЕ на поверхні радіаторної пластини без суттєвих втрат енергії, що ними виробляється.

Площадки контактної металізації поверх діелектричного шару формувалися термовакуумним напиленням металічних плівок через виготовлену з нержавіючої сталі маску з відповідною геометрією для розміщення СЕ. Серія експериментів, проведених на тестових пластинах, які були покриті діелектричним шаром, показали, що оптимальним варіантом створення металізації є використання двошарової системи, яка складається з шару хрому завтовшки  $0,15 \text{ мкм}$ , який забезпечує високу адгезію металічної плівки до діелектричного покриття та шару міді, завтовшки близько  $2 \text{ мкм}$ , який забезпечує можливість пайки зразків СЕ до такої металізації (рис. 4). Напилення відбувалось в установці ВУП-4 при вакуумі  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ , підкладка перед напиленням прогрівалася до  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ , час напилення з вольфрамових випаровувачів становив  $30 \text{ с}$  для хрому та  $360 \text{ с}$  для міді.

Дослідження можливостей пайки до сформованих плівкових шарів здійснювалось шляхом прогріву пластини з нанесеною металізацією електропідією до температури  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  з наступним лужінням металізації низькотемпературним малооловянистим

припоєм (рис. 5а) і пайкою до такої поверхні комутаційних провідників і тестових зразків СЕ (рис. 5б).

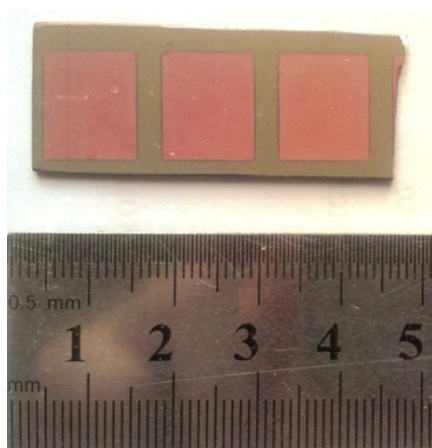


Рис. 4. Фрагмент тестової пластини алюмінію після нанесення двошарової Cr/Cu контактної металізації на поверхню діелектричного шару  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$

Проведені експерименти з пайки до нанесених шарів показали, що при мінімізації часу витримки плівкових шарів міді на повітрі суттєвого окислення не відбувається і можлива ефективна низькотемпературна пайка таких шарів з використанням нейтральних флюсів, наприклад канифолі.

Дослідження вихідних параметрів тестових зразків СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge до і після пайки не виявило суттєвого впливу даного технічного процесу на параметри таких пристроїв.

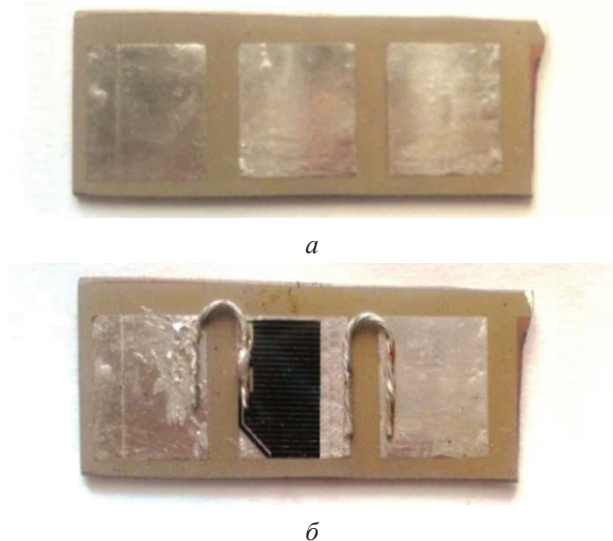


Рис. 5. Металізація, покрита низькотемпературним припоєм (а) та металізація після припайки фрагмента тестового СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge і комутаційних провідників (б)

## ВИСНОВОК

У роботі запропоновано теплопровідний діелектричний контакт для сонячних елементів фотоенергетичної установки на основі плівкової структури  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{Cr}/\text{Cu}$ . Визначено оптимальні режими отримання зазначених шарів, ключовим з яких є отримання бар'єрного бездефектного шару оксиду алюмінію. Проведено експериментальну апробацію зазначеної структури, яка підтвердила можливість використання таких шарів для створення сонячної батареї на основі елементів із структурою InGaP/InGaAs/Ge для гібридної фотоенергетичної установки з охолодженням.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Jones A. D. A thermal model for photovoltaic systems / A. D. Jones, C. P. Underwood // Solar Energy. — 2001. — Vol. 70, Issue 4. — P. 349–359.
2. Tuomiranta A. Validation of thermal models for photovoltaic cells under hot desert climates / A. Tuomiranta, P. Marpu, S. Munawwar, H. Ghedira // Energy Procedia. — 2014. — Vol. 57. — P. 136–143.
3. Розроблення фотоенергетичної установки на основі багатоперехідних кремнієвих сонячних елементів з вертикальними діодними комірками. Звіт про НДР (заключний; № держреєстрації 0111U007628) / Керівник Є. Сокол. — Харків: НТУ «ХП», 2012.
4. Стребков Д. С. Матричные солнечные элементы: Монография в 3-х томах. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009. — Т. 1. — 120 с.
5. Сокол Е. И. Физико-технические особенности и предельные практические возможности фотоэнергетического модуля нового поколения на территории Украины / Е. И. Сокол, В. Р. Копач, Р. В. Зайцев и др. // Відновлювана енергетика. — 2011. — № 2(25). — С. 18–28.
6. Мельников П. С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1991 — 384 с.
7. Напольский К. С. Синтез пространственно упорядоченных металл-оксидных нанокмполитов на основе пористого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / Под ред. А. Р. Кауля. — М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2008. — 211 с.

## REFERENCES

1. Jones A. D. A thermal model for photovoltaic systems / A. D. Jones, C. P. Underwood // *Solar Energy*. — 2001. — Vol. 70, Issue 4. — P. 349–359.
2. Tuomiranta A. Validation of thermal models for photovoltaic cells under hot desert climates / A. Tuomiranta, P. Marpu, S. Munawwar, H. Ghedira // *Energy Procedia*. — 2014. — Vol. 57. — P. 136–143.
3. Rozroblennya fotoenergetichnoï ustanovki na osnovi bagatoperehidnih kremnievih sonyachnih elementiv z vertikal'nimi diodnimi komirkami. Zvit pro NDR (zaklyuchnij; № derzhreestraciï 0111U007628) / Kerivnik Є. Sokol. — Harkiv: NTU «HPI», 2012.
4. Strebkov D. S. Matrichnye solnechnye elementy: Monografiya v 3-h tomah. — M.: GNU VIESH, 2009. — Vol. 1. — 120 p.
5. Sokol E. I. Fiziko-tehnicheskie osobennosti i predel'nye prakticheskie vozmozhnosti foto`energeticheskogo modulya novogo pokoleniya na territorii Ukrainy / E. I. Sokol, V.R. Kopach, R. V. Zajcev i dr. // *Vidnovlyuvana energetika*. — 2011. — No. 2(25). — P. 18–28.
6. Mel'nikov P. S. Spravochnik po gal'vanopokrytyam v mashinostroenii. — M.: Mashinostroenie, 1991 — 384 p.
7. Napol'skij K. S. Sintez prostranstvenno uporyadochennyh metall-oksidnyh nanokompozitov na osnove poristogo  $Al_2O_3$  / Pod red. A. R. Kaulya. — M.: Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M. V. Lomonosova, 2008. — 211 p.