УДК: 621.311.171

### Р.В. Зайцев

# Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» РОЗРОБКА ТЕПЛОПРОВІДНОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТАКТУ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

У роботі запропоновано теплопровідний діелектричний контакт для сонячних елементів фотоенергетичної установки на основі плівкової структури Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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. Рис. 5. Літ. 7.

# Р.В. Зайцев

# РАЗРАБОТКА ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЕНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В работе предложен теплопроводящий диэлектрический контакт для солнечных элементов фотоэнергетических установок на основе пленочной структуры Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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.

#### R.V. Zaitsev

# DEVELOPMENT OF THERMAL CONDUCTING DIELECTRIC CONTACT FOR SOLAR CELLS OF PHOTOENERGY SYSTEM

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.

Key words: 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 СЕ. Проте застосування ФЕП на основі кремнію традиційної конструкції при концентрованому сонячному випроміненні 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 позиціювання 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, обумовлений 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 струмознімальних 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 скоммутованими СЕ на основі структури InGaP/InGaAs/Ge. Проведені роботи спрямовані на одночасну реалізацію в рамках запропонованого конструктивного рішення електричного міжз'єдання 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, зважаючи на легкість його отримання шляхом електрохімічного анодування алюмінію і його високу механічну та діелектричну міцність. Проведені на тестових пластинах алюмінію експерименти дозволили визначити оптимальний спосіб отримання діелектричного шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, до складу якого входять такі основні стадії [6]:

1. Промивка у дистильованій воді.

2. Хімічне знежирення у водному розчині:

- карбонат натрію Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (технічний, ГОСТ 5100-85) – 50 г/л;

- тринатрійфосфат Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O (технічний, ГОСТ 201-76) – 50 г/л;

- сульфонол  $C_nH_{2n+1}C_6H_4NaO_3S$  (ТУ 07510508.135-98) – 0,5 г/л.

Знежирення при температурі розчину 60-65 °С протягом 60 сек.

3. Промивка у дистильованій воді.

4. Хімічне травлення та поліровка алюмінієвої пластини у водному розчині гідрооксиду 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<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ЧДА, ГОСТ 4204-77) при температурі 2-5 °С протягом 30 хвилин при густині струму 20, 200 або 500 мА/см<sup>2</sup>.

7. Промивка у дистильованій воді.

8. Зарощування пор у шарі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> шляхом викип'ячування у воді при температурі 98-100 °С протягом 30 хвилин.

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 викип'ячуванню для зарощування пор [6].

Я 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 рисунку 1 наведено мікроскопічні знімки, отримані за допомогою мікроскопу Sigeta MM-700, характерні досліджуваним серіям зразків. Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ". Луцьк, 2017. Випуск № 59



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

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





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

На рисунку 3 наведено рентгендифрактограму шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, характерну для серій досліджуваних зразків із зарощеними порами.



*Рис. 3.* - Характерна рентгендифрактограма шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 комірці до 500 мА/см<sup>2</sup>. Однак при таких струмах на мікроскопічних знімках (рис. 2) спостерігаються тріщини від 0,5 до 5 мкм, що призводить до втрати діелектричних властивостей шару. Тому оптимальним е режим отримання бар'єрного шару при густині струму не більше 20-40 мА/см<sup>2</sup> (зразки серії №2).

Подальше дослідження електричного опору отриманих шарів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> зразків серії №2 показало, що електричний опір таких шарів складає не менше 1 кОм. Зазначене може бути обумовлене недостатністю герметизації пор при викип'ячуванні, через які відбувається шунтування шару.

Шляхом аналізу літературних джерел, було запропоновано використання оксиду цинку для герметизації пор у шарі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Для реалізації зазначеного рішення було сформовано структуру Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO. В роботі шари *ZnO* осаджувалися методом нереактивного магнетронного розпилення на постійному струмі в вакуумній установці ВУП-5М. Мішень для розпилювання представляє собою спресовану механічну суміш дрібнодисперсійних порошків  $In_2O_3$  та  $SnO_2$  напівпровідникової чистоти зі вмістом 90 ваг. %  $In_2O_3$  та 10 ваг. %  $SnO_2$ . В якості пристрою, що розпилює використовувався магнетрон з діаметром 40 мм та магнітною індукцію 0,1 Тл. Довжина розрядного проміжку, що є зазором між магнетроном і підкладкою, складала 70 мм. Питома потужність магнетрону складала 0,2 Вт/см<sup>2</sup>. Температура підкладки варіювалась від 20 °C до

500 °C. Вихідний залишковий тиск у вакуумній камері, який створювався дифузійним насосом, складав  $3 \cdot 10^{-5}$  Тор, робочий тиск аргоно-повітряної суміші в процесі розпилення варіювався в діапазоні значень (2,1-2,6)  $\cdot 10^{-2}$  Тор за рахунок зміни швидкості натікання аргону в вакуумну камеру, газування та натікання повітря.

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

Дослідження електричного опору отриманих шарів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO на поверхні алюмінію показало, що електричний опір таких шарів складає більше 2 кОм. Зазначений електричний опір є достатнім для ефективного монтажа CE 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 мкм, який забезпечує високу адгезію металічної плівки до діелектричного покриття та шару міді, завтовшки близько 2 мкм, який забезпечує можливість пайки зразків СЕ до такої металізації (рис. 4). Напилення відбувалось в установці ВУП-4 при вакуумі 2×10<sup>-5</sup> Па, підкладка перед напиленням прогрівалася до 110 °C, час напилення з вольфрамових випаровувачів становив 30 секунд для хрому та 360 секунд для міді.



*Puc. 4. -* Фрагмент тестової пластини алюмінію після нанесення двошарової *Cr/Cu* контактної металізації на поверхню діелектричного шару *Al*<sub>2</sub>*O*<sub>3</sub>/*ZnO* 

Дослідження можливостей пайки до сформованих плівкових шарів здійснювалось шляхом прогріву пластини з нанесеною металізацією електропіччю до температури 150 °C з наступним лужінням металізації низькотемпературним малооловянистим припоєм (рис. 5, а) і пайкою до такої поверхні комутаційних провідників і тестових зразків CE (рис. 5, б).



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

Проведенні 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 каніфолі.

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

Висновок. У роботі запропоновано теплопровідний діелектричний контакт для сонячних елементів фотоенергетичної установки на основі плівкової структури Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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 шібридної фотоенергетичної установки з охолодженням.

## Список використаних джерел:

1. Jones A.D. A thermal model for photovoltaic systems / A.D. Jones, C.P. Underwood // Solar Energy, Vol. 70, Issue 4, p. 349-359 (2001).

2. Tuomiranta A. Validation of thermal models for photovoltaic cells under hot desert climates / A. Tuomiranta, P. Marpu, S. Munawwar, H. Ghedira // Energy Procedia, Vol. 57, p. 136-143 (2014).

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 «ХПІ»: 2012).

4. Стребков Д.С. Матричные солнечные элементы: Монография в 3-х томах. Том 1. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2009 – 120 с.

5. Сокол Е.И. Физико - технические особенности и предельные практические возможности фотоенергетического модуля нового поколения на территории Украины / Е.И. Сокол, В.Р. Копач, Р.В. Зайцев и др. // Відновлювана енергетика, № 2(25), с. 18-28 (2011).

6. Мельников П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1991 – 384 с.

7. Напольский К.С. Синтез пространственно упорядоченных металл-оксидных нанокомпозитов на основе пористого Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Под ред. А.Р. Кауля. – М.: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2008. – 211 с.

Стаття надійшла до редакції 21.04.2017