

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

**ПРАЦІ**

Таврійського державного  
агротехнологічного  
університету



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

**Випуск 23, том 1**  
Наукове фахове видання  
*Технічні науки*



Запоріжжя – 2023 р.

# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYI TAVRIA STATE  
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



## ПРАЦІ

**Таврійського державного  
агротехнологічного університету**  
*Технічні науки*

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE  
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**  
*Technical sciences*

*Виходить 3 рази на рік  
Видається з 1998 р.*

**Випуск 23, том 1  
Issue 23, volume 1**

**WEB:** <https://oj.tsatu.edu.ua>

**DOI:** 10.31388/2078-0877-2023-23-1

**Запоріжжя – 2023**



УДК [631.3+621.3+664](058)  
Т 13

Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. 219 с.

**ISSN 2220-8674**

Представлені результати наукових досліджень вчених у галузях галузевого машинобудування, енергетики, електротехніки, електромеханіки, харчових технологій, комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Видання призначене для наукових працівників, викладачів, інженерно-технічного персоналу і здобувачів вищої освіти, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

**Реферативні бази:** Crossref, Google Scholar, AGRIS, «Україна наукова», НБУ ім. В. І. Вернадського

**Головний редактор**

Кюрчев В. М., чл.-кор. НААН України,  
д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Заступники головного редактора**

Надикто В. Т., чл.-кор. НААН України,  
д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Панченко А. І., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Відповідальний секретар**

Волошина А. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Технічний секретар**

Погорельцева Д. О. (Україна)

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ**

Белосев Христо, д-р техн. наук, проф. (Болгарія)  
Даманаускас Відас, д-р техн. наук, проф. (Литва)  
Івановс Семенс, д-р техн. наук, доц. (Латвія)  
Ольт Юрі, PhD, д-р техн. наук, проф. (Естонія)  
Паскуцці Сімоне, PhD, доц. (Італія)  
Финдура Павол, PhD, проф. (Словачія)  
Вершков О. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Дідур В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Журавель Д. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Кувачов В. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Кюрчев С. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Скляр О. Г., канд. техн. наук, проф. (Україна)  
Скляр Р. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Тітова О. А., д-р пед. наук, проф. (Україна)

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

Шафранець Анджей, д-р техн. наук, проф. (Польща)  
Кавакзех Мохаммед, PhD, проф. (Йорданія)  
Бур'ян С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Галько С. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Гриб О. Г., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Карпалюк І. Т., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Квітка С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Кузнєцов М. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Лисенко О. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Мірошник О. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Мороз О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Плюгін В. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Editor in chief**

Kyurchev V., corresponding member of NAAS of  
Ukraine, Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**Deputy editors in chief**

Nadykto V., corresponding member of NAAS of  
Ukraine, Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Panchenko A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**Executive secretary**

Voloshina A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**Technical secretary**

Pogoreltseva D. (Ukraine)

**SECTORAL MACHINE BUILDING**

Belojev Hristo, Dr. Sci. Tech., Prof. (Bulgaria)  
Damanauskas Vidas, Dr. Sci. Tech. (Lithuania)  
Ivanovs Semjons, Dr. Sci. Tech. (Latvia)  
Olt Jüri, PhD, Dr. Sci. Tech., Prof. (Estonia)  
Pascuzzi Simone, PhD, Assoc. Prof. (Italia)  
Pavol Findura, PhD, Prof. (Slovakia)  
Vershkov O, Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Didur V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Zhuravel D., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Kuvachov V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Kiurchev S., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Sclyar O., Cand. Sci. Tech, Prof. (Ukraine)  
Sclyar R., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Titova O., Dr. Sci. Ped., Prof. (Ukraine)

**ELECTRICAL POWER ENGINEERING,  
ELECTRICAL ENGINEERING AND  
ELECTROMECHANICS**

Szafraniec Andrzej, Dr. Sci. Tech., Prof. (Poland)  
Qawaqzeh Mohamed, PhD, Prof. (Jordan)  
Burian S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Halko S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Gryb O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Karpaliuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Kvitka S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Kuznietsov M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Lysenko O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Miroshnyk O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Moroz O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Pliuhin V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ**

Гавриленко Є. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Гнатушенко В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Гумен О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Дашкевич А. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Лубко Д. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Ляскоvsька С.Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Малкіна В. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Мацулевич О. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Холодняк Ю. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Яблонський П. М., канд. техн. наук, доц. (Україна)

**ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Дейниченко Г. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Євлаш В. В., д-р техн. наук проф. (Україна)  
Ломейко О. П., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Паламарчук І. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Пилипенко Л. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Пріс О. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Самойчук К. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Сердюк М. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Ялпачик В. Ф., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**ПРАЦІ****Таврійського державного  
агротехнологічного університету****Випуск 23, том 1****Засновник**

Таврійський державний агротехнологічний  
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 1998 році

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ №24285-14125ПР від 27.12.2019 р.  
Виходить 3 рази на рік

Рекомендовано до друку вченою радою  
Таврійського державного агротехнологічного  
університету  
імені Дмитра Моторного  
Протокол № 3 від 31.10..2023 р.

«Праці ТДАТУ» включено до **Категорії Б**  
Переліку наукових фахових видань України  
(науки: технічні), в яких можуть  
публікуватися результати дисертаційних  
робіт на здобуття наукових ступенів  
доктора наук і доктора філософії /  
кандидата наук (наказ МОН України від  
17.03.2020 р. № 409)

**Адреса редакції**

*Юридична:* 72312, Запорізька обл.  
м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18  
*Фактична:* 69600, Запорізька обл.  
м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66  
<https://oj.tsatu.edu.ua>  
DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1

**COMPUTER SCIENCES**

Havrylenko Ye., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Hnatushenko V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Humen O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Dashkevych A., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Lubko D., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Liaskovska S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Malkina V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Matsulevych O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Kholodniak Y., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Yablonskyi P., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)

**FOOD TECHNOLOGIES**

Deynichenko G., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Evlash V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Lomeiko O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Palamarchuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Pylypenko L., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Priss, O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Samoichuk K., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Serdyuk M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Yalpachik V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE  
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY****Issue 23, volume 1****Founder**

Dmytro Motornyi Tavria State  
Agrotechnological University

Founded in 1998

Certificate of governmental registration  
KB No. 24285-14125ПР dated December 27, 2019  
Published 3 times a year

Recommended for publication by the Academic  
Board of Dmytro Motornyi Tavria State  
Agrotechnological University  
Record No. 3 dated October 31, 2023

Proceedings of TSATU is included in the List of  
scientific professional editions of Ukraine  
(technical sciences), category B, in which the  
results of theses for obtaining scientific degrees  
of Doctor of Sciences and Doctor of Philosophy /  
Candidate of Sciences can be published (order of  
the Ministry of Education and Science of Ukraine  
dated March 17, 2020, No. 409)

**Address of the Editorial office**

*Legal address:* 72312, Zaporizhzhia region  
Melitopol, 18, B. Khmel'nitskyi Ave.  
*Actual address:* 69600, Zaporizhzhia region  
Zaporizhzhia, 66, Zhukovskyy Str.  
<https://oj.tsatu.edu.ua>  
DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1



---

**ЗМІСТ / CONTENTS**

---

**ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ**

- Панченко А. І., Волошина А. А., Мітков В. Б., Волошин А. А.** Вплив конструктивних особливостей планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки 6  
**Panchenko A., Voloshina A., Mitkov V., Voloshin A.** Influence of design features of planetary hydromotors on changing dynamic characteristics of hydraulic drives of mechatronic systems of self-propelled vehicles
- Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ялпачик В. Ф.** Розробка експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора молока 27  
**Kiurchev S., Samoichuk K., Yalpachyk V.** Development of the experimental sample of the pulsation milk homogenizer
- Mikulionok I.** Classification and analysis of polymer and rubber waste shredder designs 41  
**Мікульонюк І.** Класифікація та аналіз конструкцій різальних подрібнювачів полімерних і гумових відходів
- Zhuravel D.** Determination of linear dimensions of boxes and thirds of individual castor varieties 63  
**Журавель Д.** Встановлення лінійних розмірів коробочок і третинок окремих сортів ріцини
- Самойчук К. О., Ломейко О. П., Ковальов О. О., Червоткіна О. О.** Зниження енергетичних витрат диспергування за рахунок явища ежекції 77  
**Samoichuk K., Lomeiko A., Kovalyov A., Chervotkina A.** Reduction of energy costs of dispersion due to the ejection phenomenon
- Гриценко О. П., Степаненко С. П.** Дослідження коефіцієнта корисної дії дискової борони від навантаження на сферичний диск 85  
**Gritsenko O., Stepanenko S.** Investigation of the coefficient of the useful effect of a disk harrow from the load on spherical disc
- Юрченко О. Ю., Склабінський В. І., Гусак О. Г.** Вплив гідродинамічних та механічних чинників на формування гранул у грануляційній башті з використанням обертового вібраційного гранулятора 96  
**Yurchenko O., Sklabinskyi V., Gusak O.** Influence of hydrodynamic and mechanical factors on the formation of granules in a granulation tower using a rotating vibrating granulator
- Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар А. С.** Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів 104  
**Skliar O., Skliar R., Komar A.** Theoretical aspects of modeling of machine technology of organic waste disposal
- Дереза О. О., Водяницький І. О.** Вдосконалення конструкції вертикального ножового млина 116  
**Dereza O., Vodyanitskyi I.** Improvement of the design of the vertical knife mill



**Сушко С. Л., Чижиков І. О.** Методика розрахунку параметрів пристрою на основі інжектора вентурі для фертигації плодкових насаджень 126  
**Sushko S., Chyzhykov I.** Method for calculating device parameters based on venturi injector for fruit plant fertigation

**Фучаджи Н. О., Ковальов О. О., Кузьмінська І. М., Червоткіна О. О.** Дослідження апаратних схем переробки гречки 136  
**Fuchadzy N., Kovalev O., Kuzminska I., Chervotkina O.** Research of vehicle charts of processing of buckwheat

**Коробка С.В., Кригуль Р.Є., Бабич М.І., Стукалець І.Г., Сиротюк С.В., Болтянський Б.В.** Опис виробничої геліосушарки з тепловим насосом 145  
**Korobka S., Babych M., Krygul R., Stukalets I., Syrotyuk S., Boltianskyi B.** Description of the manufactured helio dryer with heat pump

### ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

**Кідалов В.В., Дяденчук А.Ф.** Одержання та вивчення властивостей гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si 153  
**Kidalov V., Dyadenchuk A.** Obtaining and studying the ZnO/SiC/porous-Si/Si heterostructure properties

**Галько С. В., Мірошник О. О., Shchur Т., Markowska А.** Моделювання автономної сонячної електростанції для дослідження режимів її роботи 164  
**Halko S., Miroshnik O., Syvenko M., Shchur T., Markowska A.** Simulation of an autonomous solar power plant to study the modes of its operation

**Попова І. О., Квітка С. О., Вовк О. Ю.** Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження 179  
**Popova I., Kvitka S., Vovk O.** Investigation of an unbalanced mode in a distribution network with a dynamic inductive load

### ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

**Priss O. P., Bulhakov P. O., Kolisnychenko T. O., Gazzavi-Rogozina L. V.** Using protective coating for reduction of losses while storing asparagus 188  
**Прісс О., Булгаков П., Колісниченко Т., Газзаві-Рогозіна Л.** Скорочення втрат при зберіганні спаржі зі захисним покриттям

**Зарецька Д. К., Сердюк М. Є., Кривонос І. А., Бандура В. М.** Заморожений напівфабрикат з додавання обліпихи, як сировина для продуктів функціонального призначення 199  
**Zaretska D., Serdyuk M., Kryvonos I., Bandura V.** Frozen semi-finished product with the addition of sea buckthorn as a raw material for products with a functional purpose

**Воробець М. М., Євлаш В. В., Кобаса І. М., Кондрачук І. В.** Формування якості хліба пшеничного з добавкою «клітковина гречана» 207  
**Vorobets M., Evlash V., Kobasa I., Kondrachuk I.** Formation of the quality of wheat bread with the addition of «buckwheat fiber»



---

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

---

**DOI:** 10.31388/2078-0877-2023-23-1-153-163**УДК** 538.975:621.383.5В. В. Кідалов<sup>1</sup>, д-р фіз.-мат. наук ORCID: 0000-0002-5128-1880А. Ф. Дяденчук<sup>1</sup>, канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-6625-9985<sup>1</sup> *Таврійський державний агротехнологічний університет**імені Дмитра Моторного*e-mail: [alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua](mailto:alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua), тел.: +380668288519**ОДЕРЖАННЯ ТА ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ГЕТЕРОСТРУКТУРИ ZnO/SiC/porous-Si/Si**

*Анотація.* У роботі наведено результати одержання гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si та вивчення її структурних та електрофізичних властивостей. Дослідження відбувалося в чотири етапи: отримання поруватих кремнієвих шарів; осадження плівок SiC методом твердофазної епітаксії; осадження плівок ZnO методом магнетронного розпилення; моделювання функціональних характеристик фотоперетворювача на основі виготовленої структури. На третьому етапі зразки були поділені на дві партії в залежності від тривалості процесу осадження (10 та 20 хвилин). За результатами скануючої електронної мікроскопії визначено параметри шарів досліджуваної структури, які в подальшому використано для моделювання фотоелектричних параметрів сонячного елемента ZnO/SiC/porous-Si/Si в симуляторі PC1D. Товщина шару ZnO визначає кількість випромінювання, що надходить до кремнієвого шару фотоперетворювача. Встановлено, що для зразків партії 2 було отримано вищий ККД – ефективність зростає із ростом плівки ZnO.

*Ключові слова:* плівка ZnO, плівка SiC, поруватий кремній, фотоперетворювач.

*Постановка проблеми.* Оксиди металів (TiO<sub>2</sub>, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та ін.) дуже перспективні для багатьох застосувань у мікро- та оптоелектроніці. Серед перелічених оксидів металів ZnO виділяється своїми перевагами: стабільністю, хорошою електронною провідністю, високою хімічною стійкістю, широкою забороненою зоною (3,1-3,3 eV) тощо [1-2]. Однак властивості виготовлених електронних пристроїв на основі оксиду цинку значною мірою залежать від підкладок. Останнім часом активно досліджуються гетероструктури ZnO/Si [3-5]. Однак під час осадження плівки ZnO на кремнієву підкладку виникає технологічна проблема, пов'язана зі значною різницею в теплових коефіцієнтах розширення і постійних ґраток цих



матеріалів, що призводить до появи дислокацій в структурі. Концентрація таких наскрізних дислокацій може призвести до значного псування пристроїв на основі цих гетероструктур. Для зменшення кількості дефектів у гетероструктурі запропоновано використання буферних шарів [6-7], які захищатимуть кремнієву підкладку від хімічної взаємодії з киснем, водяною парою та хлорвмісними сполуками [8] та запобігатимуть появі аморфних та полікристалічних фаз на межі розділу напівпровідників [9]. Одним із варіантів є використання плівки SiC як буферного шару [10].

У зв'язку з цим актуальними є подальші дослідження формування системи ZnO/Si з проміжними шарами SiC і поруватого кремнію та її впливу на властивості поверхні отриманої гетероструктури.

*Аналіз останніх досліджень.* У фотовольтаїці плівка ZnO використовується не лише як вікно сонячного елемента, але й як частина p-n гетеропереходу. Однак наявні дослідження гетеропереходу ZnO/Si свідчать про низьку ефективність фотоперетворення [11-12]. У ряді робіт повідомляється про мінімізацію дефектів на межі оксиду цинку і кремнію та підвищення ефективності сонячного елемента завдяки використанню буферних шарів (Zn, GaN, AlN, SiO<sub>2</sub> та інших) [13-15]. Прикладом буферного шару може бути порувата поверхня кремнієвої підкладки [16-17]. Нами в [18] доведено покращення характеристик фотоперетворення ZnO/porous-Si, що призводить до збільшення чутливості, підвищуючи ймовірність використання даних структур як фотоприймача з широким спектральним діапазоном довжин хвиль. Однак під час одержання гетероструктур ZnO/porous-Si/Si зростає ймовірність утворення проміжного шару SiO<sub>2</sub>, який буде впливати на властивості структур.

З іншого боку, серед матеріалів, що можуть виступати як буферний шар, особливе місце займає карбід кремнію SiC, маючи високу рухливість електронів, високу прозорість, високе поле пробою та високу теплопровідність [19].

Для одержання плівки ZnO на поверхні карбиду кремнію використовують різні методи: металоорганічна епітаксія з пару (MOCVD) [21], золь-гель метод [22], високочастотне магнетронне розпилення [23], осадження атомного шару (ALD) [24], молекулярно-променева епітаксія [20] тощо. Методи отримання складових фотовольтаїчної структури значною мірою впливають не лише на властивості гетероструктури, але й на параметри приладів, які виготовляють на їх основі.

Встановлено, що гетероперехід ZnO/SiC/Si може використовувати сонячну енергію в широкому спектрі [25]. Duan L. та





інші показали, що плівка ZnO на шарі SiC має більш високу якість кристалів, ніж безпосередньо на підкладці Si, а використання буферного шару SiC є ефективним методом вирощування високоякісних плівок ZnO на підкладках Si [21].

Вже в роботі [26] було показано, що ефективність фотоелектричного перетворення тодішніх гетеропереходів ZnO/n-SiC/p-Si зростала в чотири рази, у порівнянні з гетеропереходами n-ZnO/p-Si.

У дослідженні [27] змодельовано сонячний елемент структури Air/ZnO/SiC/c-Si/a-Si(n)/Al за допомогою програмного забезпечення Wafer Ray Tracer. Автори показують, що без шару SiC поглинається лише 57,48 % падаючого світла і генерується 26,85 мА/см<sup>2</sup> фотогенерованого струму. При товщині шару SiC 70 нм можна досягти збільшення світлопоглинання на 22,16 % і фотогенерування струму на 38,54 %.

Таким чином, й надалі залишається актуальним питання виготовлення, дослідження структурних, оптичних, а також електрофізичних властивостей структури ZnO/SiC/porous-Si/Si з метою подальшого використання її як фотоперетворювача сонячних елементів.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є отримання гетероструктур ZnO/SiC/porous-Si/Si, характеристика поверхні виготовлених структур та моделювання функціональних характеристик фотоперетворювача на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si.

*Основна частина.* Фотоперетворювач на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si було виготовлено в кілька етапів:

1. Анодне травлення монокристалічних пластин Si (111) з метою одержання поруватого шару Si [28].
2. Відпал мезопоруватих зразків Si в потоці суміші газів оксиду вуглецю CO та силану SiH<sub>4</sub>, в результаті якого відбувається утворення плівки карбиду кремнію за методикою, опиманою в роботах [29-30].
3. Осадження тонких плівок ZnO високочастотним магнетронним розпиленням цинкової мішені в атмосфері аргону та кисню [8].
4. Моделювання параметрів фотоперетворювачів на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si (рис. 1).

На третьому етапі зразки були поділені на дві групи в залежності від тривалості процесу осадження: перша партія дослідних зразків була отримана під час відпалу зразків SiC/porous-Si/Si в атмосфері аргону з киснем впродовж 10 хвилин (далі – партія 1), друга – 20 хвилин (далі – партія 2). Обидві партії досліджувалися методом скануючої електронної мікроскопії (скануючий електронний

мікроскоп (SEM) Tescan Mira 3 LMU). SEM-мікрофотографії структур наведено на рис. 1.

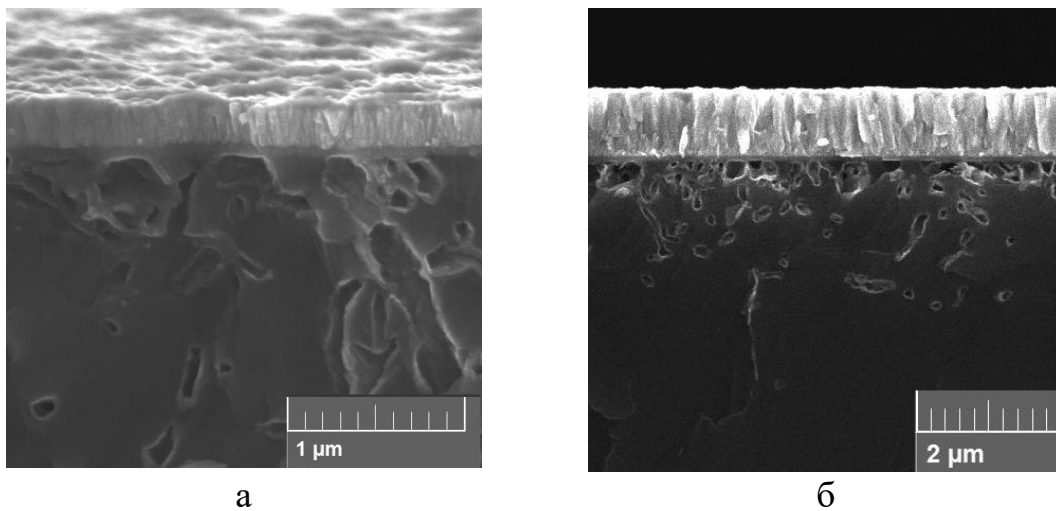


Рис. 1. SEM-зображення поперечного перерізу гетероструктур ZnO/SiC/porous-Si/Si: а – дослідний зразок партії 1; б – дослідний зразок партії 2

За результатами SEM (рис. 1) визначено параметри шарів (табл. 1).

Таблиця 1

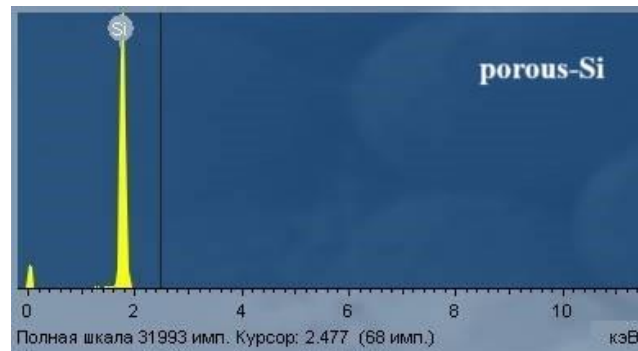
Параметри шарів гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

Шар	Товщина шару, мкм	
	Зразок партії 1	Зразок партії 2
ZnO	0,29	0,97
SiC	0,08	0,09
porous-Si	3,0	2,8
Si	10,0	10,0

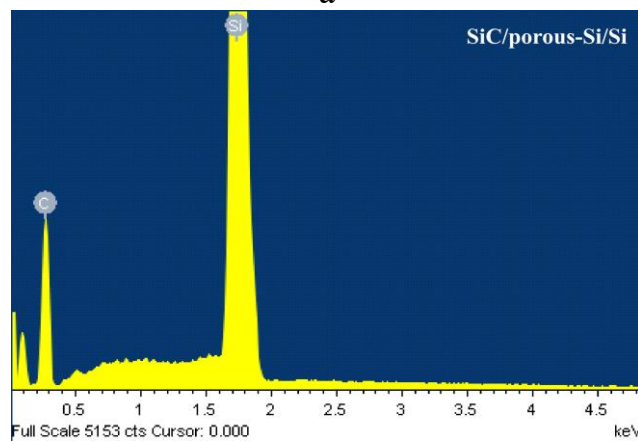
Дослідження хімічного складу кожного з шарів гетероструктури було виконано за допомогою енергодисперсійного спектрометра Oxford Instruments X-Max 80 мм<sup>2</sup>. Спектр EDAX (рис. 2) підтверджує склад кожного із шарів досліджуваної гетероструктури. Результати аналізу EDAX показують наявність спектрів-піків, що відповідають елементам-складникам аналізованої вибірки [31].

На основі отриманої структури було запропоновано виготовити сонячний елемент. Конструкція виготовленого фотоелектричного перетворювача наведена на рис. 3. Плівка ZnO на верхньому шарі структури дозволяє світлу проходити через шар. Усередині активного базового шару електрон-діркові пари генеруються падаючим світлом з відповідною довжиною хвилі. Ці фотогенеровані дірки та електрони

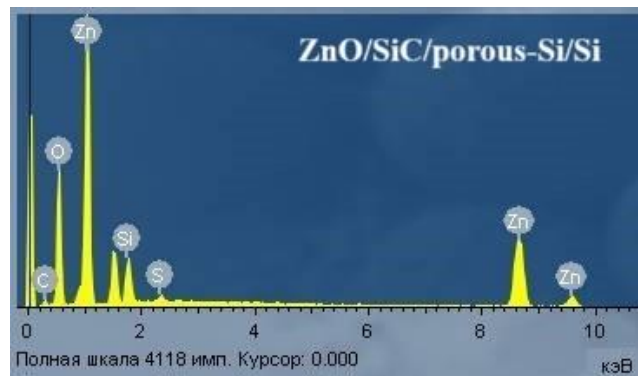
розділяються процесами дифузії та дрейфу, що призводить до появи фотоструму.



а



б



в

Рис. 2. EDAX-дослідження шарів гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

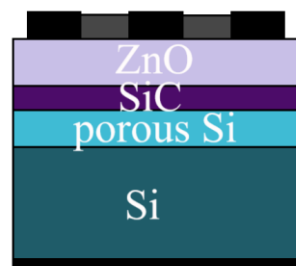


Рис. 3. Схематичне зображення фотоперетворювача на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

Моделювання фотоелектричних параметрів сонячного елемента ZnO/SiC/porous-Si/Si проведено в одновимірному симуляторі напівпровідникових приладів PC1D [32, 33]. Під час моделювання використано фотоелектричні параметри матеріалів ZnO, SiC, поруватий Si та Si, наведені в науковій літературі [34-39]. Товщина шарів обиралась відповідно до результатів скануючої електронної мікроскопії (рис. 4).

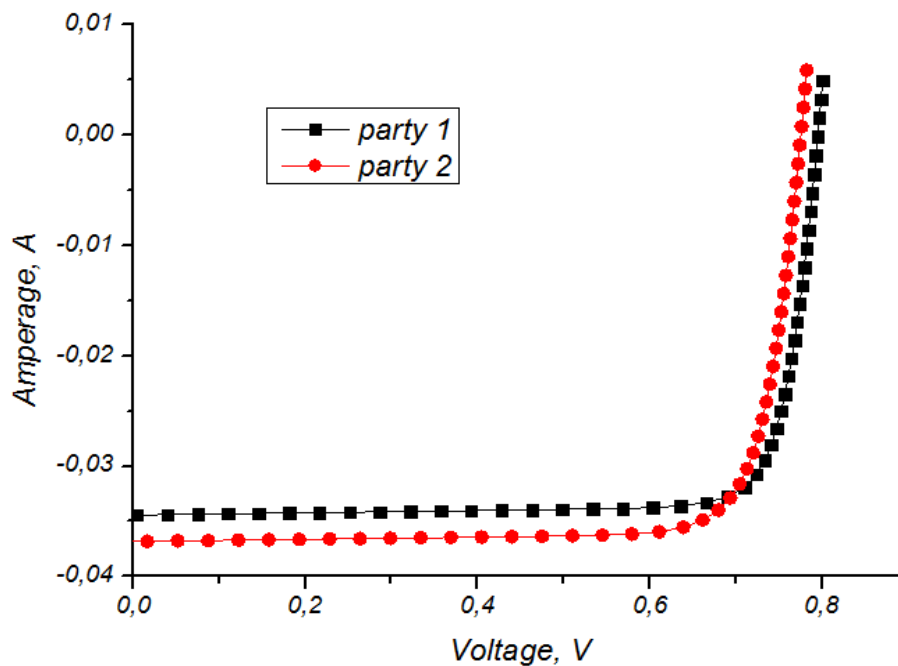


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики фотоперетворювачів ZnO/SiC/porous-Si/Si

Таблиця 2

Основні фотоелектричні параметри гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

Дослідний зразок	Сила струму, $I_{SC}$ , mA	Напруга, $V_{OC}$ , mV	Фактор заповнення FF, %	ККД, %
Партія 1	34,4	795,4	83,0	22,7
Партія 2	36,8	775,6	80,9	23,1

Товщина шару ZnO визначає кількість випромінювання, що надходить до кремнієвого шару фотоперетворювача. З рис. 3 і табл. 2 слідує, що для зразків партії 2 було отримано ККД вищий на 0,4%, тобто ефективність сонячного елемента зростає з ростом товщини плівки ZnO.

*Висновки.* Методом магнетронного розпилення отримано плівки ZnO на підкладках SiC/porous-Si/Si. Зразки були поділені на дві партії в залежності від тривалості процесу осадження (10 та 20 хвилин),



товщина плівок склала 0,29 та 0,97 мкм відповідно. У програмному пакеті PC1D змодельовано функціональні характеристики фотоперетворювача на основі виготовлених структур. Встановлено, що для структур з товщиною плівки ZnO ~290 нм ефективність перетворення сонячного випромінювання склала 22,7%, для плівок товщиною ~970 нм – 23,1%.

#### Подяка

Дослідження виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України, а саме: НДР № 0121U113502 та № 0121U109519.

#### Список використаних джерел

1. Wibowo A., Marsudi M. A., Amal M. I., Ananda M. B., Stephanie R., Ardy H., Diguna L.J. ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications. *RSC advances*. 2020. Vol. 10(70). P. 42838–42859. <https://doi.org/10.1039/D0RA07689A>.
2. Borysiewicz M. A. ZnO as a functional material, a review. *Crystals*. 2019. Vol. 9(10). P. 505. <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>.
3. Koc N. S., Altintas S. P., Gokcen M., Dogruer M., Altug C., Varilci A. Current-voltage characteristics of nano whisker ZnO/Si heterojunction under UV exposition. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. Vol. 342. P. 113618. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113618>.
4. Maqsood S., Ali Z., Ali K., Ishaq M., Sajid M., Farhan A., Rahdar A., Pandey S. Assessment of different optimized anti-reflection coatings for ZnO/Si heterojunction solar cells. *Ceramics International*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.313>.
5. Mandal L., Sadique Anwer Askari S., Kumar M., Imam M. Analysis of ZnO/Si heterojunction solar cell with interface defect. *Advances in Computer, Communication and Control: Proceedings of ETES 2018*. 2019. P. 533–538. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3122-0\\_53](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3122-0_53).
6. Gupta C. P., Singh A. K., Jain P. K., Sharma S. K., Birla S., Sancheti S. Electrical transport properties of thermally stable n-ZnO/AlN/p-Si diode grown using RF sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2021. Vol. 128. P. 105734. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105734>.
7. Sharma A. K., Kumar R., Jha P. K., Kumar M., Chourasia N. K., Chourasia R. K. Bulk Parameters Effect and Comparative Performance Analysis of p-Si/n-CdS/ALD-ZnO Solar Cell. *Silicon*. 2023. Vol. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02518-z>.
8. Kidalov V. V., Kladko V. P., Dyadenchuk A. F., Gudymenko O. I., Baturin V. A., Karpenko A. Y., Kidalov V. V. ZnO/SiC/Porous-Si/Si Heterostructure: Obtaining and Properties. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2022. Vol. 20(3).



9. Kukushkin S. A., Osipov A. V., Romanychev A. I. Epitaxial growth of zinc oxide by the method of atomic layer deposition on SiC/Si substrates. *Phys. Solid State*. 2016. Vol. 58. P. 1448–1452. <https://doi.org/10.1134/S1063783416070246>.
10. Kim H., Jung M. J., Choi B. J. Current transport mechanism of atomic layer deposited ZnO on 3C–SiC/p-Si heterostructure. *Solid State Communications*. 2021. T. 332. No 114341. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2021.114341>.
11. Gulomov J., Accouche O., Aliev R., Ghandour R., Gulomova I. Investigation of n-ZnO/p-Si and n-TiO<sub>2</sub>/p-Si heterojunction solar cells: TCAD+ DFT. *IEEE Access*. 2023. Vol. 99. P. 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268033>.
12. Ali R. S., Sharba K. S., Jabbar A. M., Chiad S. S., Abass K. H., Habubi N. F. Characterization of ZnO thin film/p-Si fabricated by vacuum evaporation method for solar cell applications. *NeuroQuantology*. 2020. Vol. 18(1). P. 26. <https://doi.org/10.14704/nq.2020.18.1.NQ20103>.
13. He J., Yang S., Wei Q. Structural and Optical Property of High Quality GaN Thin Film on Si with ZnO Buffer Layer. *Journal of Photonic Materials and Technology*. 2019. Vol. 5(1). P. 1–4. <https://doi.org/10.11648/j.jmpt.20190501.11>.
14. Li L., Sha L., Yuan Y. Photoluminescence properties of zinc oxide film with local epitaxial growth on silicon using aluminum nitride buffer layer. *Acta Physica Polonica A*. 2020. Vol. 137(6). P. 1110–1115. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.137.1110>.
15. Lam N. D., Van Thanh H., Thien T. D., Nguyen-Tran T. The Roles of the CuO Buffer Layer on the Photocatalytic Activity of the p-Si/p-CuO/n-ZnO Composite Films. *Materials Transactions*. 2023. Vol. 64(2). P. 578–585. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2022145>.
16. Wahabaalla E. A., El-Menyawy E. M., Abdallah T., Youssef G. M. Improving the photoelectrical conversion efficiency of silicon solar cells using ZnO:Al/porous silicon double antireflective layers. *Applied Physics A*. 2019. Vol. 125(12). P. 842. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3127-2>.
17. Algün G., Akçay N. The role of etching current density and porous structure on enhanced photovoltaic performance of ZnO/PS heterojunction solar cells. *Applied Physics A*. 2019. Vol. 125(8). P. 568. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2867-3>.
18. Khudiar S. S., Mutlak F. A. H., Nayef U. M. Synthesis of ZnO nanostructures by hydrothermal method deposited on porous silicon for photo-conversion application. *Optik*. 2021. Vol. 247. No 167903. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167903>.
19. Hotza D., Di Luccio M., Wilhelm M., Iwamoto Y., Bernard S., da Costa J.C.D. Silicon carbide filters and porous membranes: A review of



processing, properties, performance and application. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 610. No 118193.

<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118193>.

20. Zhang Y., Lin N., Li Y., Wang X., Wang H., Kang J., Wilks R., Bär M., Mu R. The isotype ZnO/SiC heterojunction prepared by molecular beam epitaxy – A chemical inert interface with significant band discontinuities. *Sci Rep*. 2016. Vol. 6. No 23106. <https://doi.org/10.1038/srep23106>.

21. Duan L., Lin B., Yao R., Fu Z. The properties of ZnO/SiC/Si heterostructure. *Chinese Journal of Materials Research*. 2006. Vol. 20(3). P. 259.

22. Chung Gwiy-Sang. Characteristics of ZnO Films Deposited on Poly 3C-SiC Buffer Layer by Sol-Gel Method. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. 2011. Vol. 12(3). P. 102–105. <https://doi.org/10.4313/TEEM.2011.12.3.102>.

23. Duy-Thach Phan, Gwiy-Sang Chung. Comparison of ZnO thin films grown on a polycrystalline 3C-SiC buffer layer by RF magnetron sputtering and a sol-gel method. *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257(8). P. 3285–3290. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.003>.

24. Kim H., Jung M. J., Choi S., Choi B. J. Atomic layer deposition of ZnO for modulation of electrical properties in n-GaN Schottky contacts. *Journal of Electronic Materials*. 2021. Vol. 50. P. 1955–1962. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08673-y>.

25. Kobayashi H., Tachibana S., Yamanaka K., Nakato Y., Yoneda K. Improvement of indium-tin-oxide/silicon oxide/n-Si junction solar cell characteristics by cyanide treatment. *J Appl Phys*. 1997. Vol. 81(11). P. 7630–7634. <https://doi.org/10.1063/1.365340>.

26. Xiaopeng Wu, Xiaoqing Chen, Lijie Sun, Shun Mao, Zhuxi Fu. Photoelectric conversion characteristics of ZnO/SiC/Si heterojunctions. *Journal of Semiconductors*. 2010. Vol. 31. No 103002. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/31/10/103002>.

27. Sasmal Sajal, Ray Mrityunjy. Optimization of multijunction solar cell by wafer ray tracer for development of high photogenerated. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. 04. <https://doi.org/10.15623/ijret.2015.0404065>.

28. Kidalov V. V., Dyadenchuk A. F., Khrypko S. L., Khrypko O. S. Investigation the Structures ZnO:Al/SiO<sub>x</sub>/PorSi/p-Si/Al. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2017. Vol. 18(2). P. 180-183. <https://doi.org/10.15330/pcss.18.2.180-183>.

29. Kidalov V. V., Kukushkin S. A., Osipov A. V., Redkov A. V., Grashchenko A. S., Soshnikov I. P., Boiko M. E., Sharkov M. D., Dyadenchuk A. F. Properties of SiC films obtained by the method of substitution of atoms on porous silicon. *ECS Journal of Solid State Science*



*and Technology*. 2018. Vol. 7(4). P. 158.  
<https://doi.org/10.1149/2.0061804jss>.

30. Кідалов В. В., Кукушкін С. А., Осіпов А. В., Редьков А. В., Гращенко А. С., Сошніков І. П., Бойко М. Е., Шарков М. Д., Дяденчук А. Ф. Гетероепітаксійний ріст SiC на підкладках поруватого Si методом заміщення атомів. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2018. Т. 10, № 3. С. 03026 (бсс). [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(3\).03026](https://doi.org/10.21272/jnep.10(3).03026).

31. Amoozadeh A., Rahmani S. Nano-WO<sub>3</sub>-supported sulfonic acid: New, efficient and high reusable heterogeneous nano catalyst. *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2015. Т. 396. P. 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2014.09.020>.

32. Gran J., Kübarsepp T., Sildoja M., Manoocheri F., Ikonen E., Müller I. Simulations of a predictable quantum efficient detector with PC1D. *Metrologia*. 2012. Vol. 49(2). P. 130. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S130>.

33. Thirunavukkarasu G. S., Seyedmahmoudian M., Chandran J., Stojcevski A., Subramanian M., Marnadu R., Alfaify S., Shkir M. Optimization of mono-crystalline silicon solar cell devices using PC1D simulation. *Energies*. 2021. Vol. 14(16). No 4986. <https://doi.org/10.3390/en14164986>.

34. Hashmi G., Rashid M. J., Mahmood Z. H., Hoq M., Rahman M. H. Investigation of the impact of different ARC layers using PC1D simulation: application to crystalline silicon solar cells. *Journal of Theoretical and Applied Physics*. 2018. Vol. 12. P. 327–334. <https://doi.org/10.1007/s40094-018-0313-0>.

35. Shah D. K., KC D., Akhtar M. S., Kim C. Y., Yang O. B. Vertically arranged zinc oxide nanorods as antireflection layer for crystalline silicon solar cell: a simulation study of photovoltaic properties. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(17). P. 6062. <https://doi.org/10.3390/app10176062>.

36. Shah D. K., Devendra K. C., Kim T. G., Akhtar M. S., Kim C. Y., Yang O. B. Influence of minority charge carrier lifetime and concentration on crystalline silicon solar cells based on double antireflection coating: A simulation study. *Optical Materials*. 2021. Vol. 121. No 111500. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111500>.

37. Laohawiroj S., Fangsuwannarak T., Rattanawichai P., Limsiri W., Naidoo N.J., Phatthanakun R. Silicon composite films as an anti-reflection coating layer for third generation photovoltaic. *Suranaree Journal of Science & Technology*. 2022. Vol. 29(3).

38. Dyadenchuk A., Domina N., Oleksenko R. Simulation of Solar Element Characteristics Based on Porous Silicon. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System*





(MEES). 2022. Р. 1–4.  
<https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005773>.

39. Дяденчук А. Ф., Філіпович Є. В. Моделювання функціональних характеристик сонячних елементів на основі ZnO і TiO<sub>2</sub>. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 1. С. 1–11.  
<https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v12i1.299>.

*Стаття надійшла до редакції 20.09.2023 р.*

**V. Kidalov<sup>1</sup>, A. Dyadenchuk<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup> Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

### **OBTAINING AND STUDYING THE ZnO/SiC/porous-Si/Si HETEROSTRUCTURE PROPERTIES**

#### *Summary*

The paper presents the results of obtaining the ZnO/SiC/porous-Si/Si heterostructure and studying its structural and electrophysical properties. The research took place in four stages. At the first stage, porous layers on a silicon substrate were obtained. At the second stage, SiC films were deposited on the porous silicon surface by the solid-phase epitaxy method. ZnO films were deposited on the surface of SiC/porous-Si/Si heterostructures by magnetron sputtering. At the last stage, the functional characteristics of the photoconverter were modeled on the basis of the manufactured structure. The study of the chemical composition of each of the layers of the heterostructure was performed using an Oxford Instruments X-Max 80 mm<sup>2</sup> energy dispersive spectrometer. The EDAX spectrum confirms the composition of each of the layers of the investigated heterostructure. At the third stage, the samples were divided into two batches depending on the duration of the deposition process (10 and 20 minutes). Based on the obtained structure, it was proposed to manufacture a solar cell.

Based on the results of scanning electron microscopy, the parameters of the layers of the studied structure were determined, which were subsequently used to simulate the photovoltaic parameters of the ZnO/SiC/porous-Si/Si solar cell in the PC1D simulator. Other parameters of ZnO, SiC, porous Si and Si materials are taken from scientific literature.

It was found that for structures with a ZnO film thickness of ~290 nm, the solar radiation conversion efficiency was 22.7%, for films with a thickness of ~970 nm – 23.1%. That is, for the samples of batch 2, the efficiency was obtained higher by 0.4%, that is, the efficiency of the solar cell increases with the increase in the thickness of the ZnO film. The thickness of the ZnO layer determines the amount of radiation that reaches the silicon layer of the photoconverter.

**Keywords:** ZnO film, SiC film, porous Si, photoconverter.

**ПРАЦІ**  
**Таврійського державного агротехнологічного університету**

*Наукове фахове видання*

**Випуск 23, том 1**

*Заснований у 1998 р*  
*Виходить три рази на рік*

Свідоцтво про державну реєстрацію  
Друкованого засобу масової інформації  
Міністерство юстиції  
КВ 24285-14125 ПР від 27.12.2019 р.

Відповідальний за випуск – д.т.н., професор Панченко А.І.

---

Підписано до друку 01.11.2023 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Ум.-друк. арк. 15 Наклад 100.  
ТОВ «Науково-виробнича компанія «Інтер-М»  
Свідоцтво 33 № 26 від 23.06.2008 р.  
69014, Україна, м. Запоріжжя, вул. Колерова,5