

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 2
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 2
Issue 23, volume 2**

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

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2

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. 2. 217 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

Beloev 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)
Лясковська 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 2****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 (накази 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: 10.31388/2078-0877-2023-23-2

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 2****Founder**

Dmytro Motorny 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 Motorny 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 adress: 72312, Zaporizhzhia region
Melitopol, 18, B. Khmel'nitskyi Ave.
Actual address: 69600, Zaporizhzhia region
Zaporizhzhia, 66, Zhukovskyy Str.
<https://oj.tsatu.edu.ua>
DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2



ЗМІСТ / CONTENTS

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- Панченко А. І., Волошина А. А., Холод І. М., Волошин А. А.** Вплив геометричних параметрів розподільних систем на стабілізацію вихідних характеристик планетарних гідромашин 6
Panchenko A., Voloshina A., Kholod I., Voloshin A. Influence of geometric parameters of distribution systems on stabilization of the output characteristics of planetary hydromashines
- Кюрчев С.В., Самойчук К. О., Ялпачик В. Ф., Ковальов О. О.** Підвищення якості продуктів при використанні удосконаленого способу гомогенізації і нормалізації молока 25
Kiurchev S., Samoichuk K., Yalpachik V., Kovalyov A. Improving product quality using an improved method of milk homogenization and normalization
- Самойчук К. О., Самохвал В. А., Червоткіна О. О.** Дослідження ефективності роботи системи охолодження при інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів 33
Samoichuk K., Samokhval V., Chervotkina O. Studying the efficiency of the cooling system during the intensification of extrusion of industrial oils in screw press extruders for the manufacture of fuel briquettes
- Кюрчев С. В., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О.** Дослідження холоду при зберіганні ягід 46
Kiurchev S., Verkholtantseva V., Palianychka N. Research on cold storage of berries
- Тримбач С. П., Степаненко С. П.** Теоретичні дослідження швидкості переміщення частинок сипкого матеріалу в процесі гранулювання 54
Trimbach S., Stepanenko S. Theoretical studies of the movement velocity of particles of bulk material in the granulation process
- Соломка О. В., Ачкевич О. М., Ачкевич В. І.** Застосування систем автоматизованого проектування в сільськогосподарському машинобудуванні 67
Solomka O., Achkevych O., Achkevych V. Application of automated design systems in agricultural engineering
- Коробка С. В., Стукалець І. Г., Сиротюк С. В., Скляр О. Г., Скляр Р. В., Болтянський Б. В., Баранович С. М.** Математичне моделювання процесу сушіння фруктів у геліосушарці 78
Korobka S., Stukalets I., Syrotyuk S., Skliar O., Skliar R., Boltianskyi B., Baranovych S. Mathematical modeling of the process of fruit drying in a solar dryer
- Бойко В. Б., Улексін В. О., Золотовська О. В., Лепеть Є. І., Бойко Б. В.** Проект мехатронної системи експериментальної гідропневматичної сівалки 99
Boiko V., Ulexin V., Zolotovska O., Lepet E., Boiko B. Project of mechatronic system of experimental hydropneumatic seeder



- Червоткіна О. О., Фучадчи Н. О., Паляничка Н. О., Самохвал В. А.** Вплив різних параметрів на процес гранулювання рослинної сировини та якість гранул 113
Chervotkina O., Fuchadzy N., Palianychka N., Samohval V. Influence of different parameters on the process of granou-luvanne of rosliny syrovine and yacterity granules
- Кошулько В. С., Пацула О. М.** Розробка брикетувального гвинтового пресу лушпинної фракції макухи олійних культур 124
Koshulko V., Patsula O. Development of a briquetting screw press for the husk fraction of the cake of oil crops

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

- Галько С. В., Мірошник О. О., Сивенко М. М., Qawaqzeh M. Z., Al_Issa Huthaifa.** Визначення оптимальних параметрів накопичуючих та генеруючих джерел електричної енергії в автономних локальних електричних системах 134
Halko S., Miroschnik O., Syvenko M., Qawaqzeh M.Z., Al_Issa Huthaifa. Determination of optimal parameters of accumulating and generating sources of electric energy in autonomous local electrical systems
- Дяденчук А. Ф., Філіпович Є. В.** Моделювання фотоелектричних характеристик гетероперехідного сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si 152
Dyadenchuk A., Filipovich Ye. Simulation of the photoelectric characteristics of the ZnO/porous-Si/Si heterojunction solar cell
- Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В., Чепіжний А. В., Зубко В. М., Тимошенко Г. А.** Пошук місця пошкодження обмотки електроенергетичного обладнання за зміною робочої температури 167
Yurchenko O., Barsukova H., Chepizhnyu A., Tymoshenko H., Zubko V. Search for the location of damage to the electrical equipment winding due to a change in the working temperature
- Попова І. О., Чаусов С. В.** Дослідження схемного рішення пристрою для застосування в якості фільтра лінійних несиметричних напруг 177
Porova I., Chausov S. Investigation of the circuit solution of a device for using linear unbalanced voltages as a filter

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Колісниченко Т. О., Прісс О. П., Кюрчева Л. М., Сефіханова К. А.** Дослідження органолептичних показників якості емульсійних соусів з йодміщуючими добавками 186
Kolisnychenko T., Priss O., Kiurcheva L., Sefikhanova K. Investigation of organoleptic quality indicators of emulsion sauces with iodine replacement additives
- Ткаченко Л. В., Вітряк О. П.** Технологія коктейлів підвищеної біологічної цінності з використанням молочної сироватки 195
Tkachenko L., Vitriak O. Technology of cocktails of increased biological value using milk whey
- Семко Т. В., Пахомська О. В.** Аюрведа - сучасна система оздоровлення організму людини 206
Semko T., Pahomska O. Ayurveda modern health system human organism



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-152-166

УДК 538.975:621.383.5

А. Ф. Дяденчук¹, канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-6625-9985Є. В. Філіпович², здобувач ВО ORCID: 0000-0002-9633-7251¹ Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного² Національний університет «Запорізька політехніка»e-mail: alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua, тел.: +38066-828-85-19

МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОПЕРЕХІДНОГО СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ZnO/porous-Si/Si

Анотація. Робота спрямована на дослідження перспективних для сонячної енергетики фоточутливих структур на основі поруватого Si та ZnO. Запропоновано схему пристрою моделі сонячної батареї на основі гетероструктур ZnO/porous-Si/Si. За допомогою програми PC1D були розраховані світлові характеристики виготовленої конструкції (напруга холостого ходу V_{oc} , струм короткого замикання I_{sc} , коефіцієнт заповнення FF і ККД η), а також побудовані вольт-амперні характеристики. Досліджено вплив товщини шарів porous-Si та ZnO, текстурування та рівня легування шару ZnO, а також вплив температури на продуктивність гетероперехідного сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si з метою отримання пристрою з хорошою ефективністю перетворення. Встановлено, що ефективність перетворення енергії сонячної батареї ZnO/porous-Si/Si може досягати 23,9 %.

Ключові слова: фотоперетворювач, поруватий кремній, комп'ютерне моделювання, плівка ZnO.

Постановка проблеми. Дефіцит викопного палива та пагубний його вплив на оточуюче середовище призводить до зростання залежності людської діяльності від відновлюваних джерел енергії. Однією з найбільш перспективних серед відновлюваних джерел енергії вважається сонячна енергія [1]. На сьогодні достатнього поширення отримали гетероперехідні монокристалічні кремнієві сонячні елементи, проте їх ефективність не перевищує 19 %. Однак вартість виробництва та монтажу монокристалічних кремнієвих панелей досить висока. Меншою є вартість полікристалічних кремнієвих фотоперетворювачів (~10 %), проте ефективність даних панелей зменшується ~5 %.

Прагнучи до здешевлення виробництва і підвищення ККД сонячних елементів (СЕ), вчені вдаються до різноманітних маніпуляцій з конструкціями фотоперетворювачів, матеріалами, які



використовуються при їх виробництві тощо [2-4]. Підвищити ефективність, не збільшуючи при цьому вартість фотоперетворювача (ФП), можна завдяки використанню антивідбивного покриття, які дозволяють за рахунок збільшення кількості поглинутого поверхнею сонячної батареї світла значною мірою підвищити ефективність сонячних елементів. Наразі у фотоелектричній промисловості домінують такі антивідбивні покриття як ІТО, TiO_2 , SnO_2 , LiF , MgF_2 тощо [5-7], проте найбільшого розповсюдження отримали прозорі провідні оксиди (ППО). Крім цього останнім часом з'являються роботи, в яких як антивідбивні покриття використовують поруваті напівпровідники [8].

Тому актуальним є питання дослідження фотоперетворювачів із використанням як поруватих кремнієвих шарів, так і антивідбивних покриттів.

Аналіз останніх досліджень. Відомими прозорими провідними оксидами, які широко використовуються як вікна, а також як випромінювачі на кремнієвій підкладці p-Si, є CdO , SnO_2 та ІТО [9-11]. Однак деякі з них мають певні недоліки, такі як дефіцит, висока вартість основного інгредієнта, токсичність і низька стабільність. Кандидатом з мінімальною кількістю недоліків є оксид цинку ZnO , оскільки він при кімнатній температурі володіє відносно великою прямою забороненою зоною (3,3-3,4 eV), великою енергією зв'язку екситонів 60 MeV [12], низьким питомим опором, рухливістю Холла близько $200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [13], високим коефіцієнтом пропускання для видимого світла тощо. Завдяки цьому ZnO є перспективним прозорим струмопровідним оксидом як альтернатива FTO та ІТО [14].

У більшості застосувань ZnO використовується як віконний шар сонячних елементів для поглинання максимуму падаючого світла [15-17]. Дослідження сонячних елементів з ZnO як ППО не є новим, однак ще існує низка нерозв'язаних питань. Так у роботі [18] автори вивчали вплив температури осадження плівки ZnO на параметри сонячних елементів ZnO/Si . У [19] було досліджено електронну структуру інтерфейсу між легованим бором оксигенованим аморфним кремнієвим «віконним шаром» ($\text{a-SiO}_x\text{:H(B)}$) та оксидом цинку, легованим алюмінієм (ZnO:Al). Леговані плівки ZnO (ZnO:Ga , ZnO:Al , ZnO:B , ZnO:In тощо) також поліпшують оптичні властивості структур та сонячних елементів на їх основі [20-22]. Jiangnan Ding та інші [23] повідомляють про зростання ККД до 17,13 % при використанні нелегованих комбінованих шарів ZnO/ZnO:Al в гетероструктурних кремнієвих сонячних елементах. Результати в [24] доводять поліпшення електричних та оптичних властивостей плівок Ga:ZnO по відношенню до нелегованої плівки ZnO , одночасно авторами досліджено інтерфейс між плівкою та підкладкою Si з метою



виявлення конкретних проблем, які можуть перешкоджати оптимальному електричному контакту між ними.

З іншого боку, ZnO може бути не лише віконним шаром в СЕ, але й виступати частиною р-п переходу, що розділяє фотозгенеровані носії, у сонячному елементі на основі ZnO/p-Si [25]. Теоретично прогнозується, що гетероперехідний сонячний елемент Si/ZnO матиме ефективність перетворення до 25 % [26]. Проте в переважній більшості робіт доведено, що ефективність перетворення сонячних елементів ZnO/Si значною мірою залежить від властивостей інтерфейсу між плівками ZnO та кремнієвою підкладкою [27, 17]. Наприклад, Chen L. та інші [17] пропонують модель сонячних батарей з гетеропереходом n-ZnO/p-Si та буферним тонким шаром ZnO:В, які, згідно моделювання, можуть досягати ККД ~17,16 %. Кандидатом на використання як буферного шару в сонячних елементах на основі Si є сульфід кадмію. Nawfal Jamil та інші [28] експериментально встановили, що ККД сонячних елементів ZnO/CdS/Si становить 8,9 %. Останнім часом особливу увагу дослідників привертають порувати наноматеріали і наноматеріали із спеціальними фізико-хімічними властивостями, представником яких є поруватий кремній, що використовуються як самостійні покриття, а також буферні шари. Так у роботі [29] періодичний масив стовпців Si використовується для формування фотоелектричної системи n-ZnO/p-Si завдяки зменшенню об'єму активного матеріалу та максимізації оптичного поглинання. Автори роботи [30] демонструють покращення ефективності (до 18,97 %) гетеропереходів c-Si/ZnO за наявності трапецієподібних пірамід c-Si на вершині активного шару c-Si.

І хоча експериментально виготовлені сонячні елементи в досліджуваних роботах показують ефективність нижче теоретично прогнозованих значень [31], моделювання є ефективним засобом дослідження сонячних елементів, завдяки якому можна підібрати оптимальні параметри шарів, оптимізувати конструкцію сонячного елемента, дослідити взаємодію шарів комірки, мінімізувати дефекти інтерфейсу між шарами гетероструктури тощо, при цьому не витрачаючи ресурси (матеріали, кошти) на експериментальний підбір даних параметрів.

Для оцінки оптимального числового значення ключових фотоелектричних параметрів для сонячних елементів можуть бути використані такі програмні пакети, як AFORS-НЕТ, PC1D, AMPS-1D, SCAPS та ін. Так у роботі [32] авторами отримано ККД $\eta=24,8\%$ моделюванням в програмі PC1D сонячної комірки на основі гетероструктури ZnO/Si при товщині основи 400 мкм, товщині випромінювача 20 мкм, концентрації легування $1,1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в основі і концентрації легування $5,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ у випромінювачі.



Дещо нижчої ефективності фотоелектричного перетворення 20,23 % було досягнуто моделюванням для c-Si сонячних елементів пірамідально-текстурованої лицьової поверхні з використанням нанострижневих масивів ZnO як антивідбивного шару [33]. Крім того, моделювання в програмі PC1D демонструє, що фотоелектрична властивість для даних сонячних елементів набагато краще, ніж для c-Si сонячних елементів без шару ZnO.

Таким чином, в деяких наукових роботах пропонується використовувати ZnO як віконний або антивідбивний шар сонячної батареї для підвищення ефективності, відомі наукові дослідження, в яких повідомляється про використання ZnO як n-шару в гетероструктурних кремнієвих сонячних елементах, також відомі роботи, в яких як буферний шар використовується періодичний масив стовпців Si, однак не так багато є досліджень використання ZnO як n-шару, так і антивідбивного покриття з використанням проміжного шару porous-Si одночасно для сонячної батареї.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є проведення чисельного моделювання та оптимізації функціональних характеристик фотоперетворювача на основі гетероструктур ZnO/porous-Si/Si, а також дослідження впливу технологічних параметрів на характеристики конструкції.

Основна частина. Моделювання основних характеристик сонячного елемента на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si проведено у вільно розповсюдженій програмі PC1D [34, 35]. Це програмне забезпечення, розроблене Університетом Нового Південного Уельсу (Австралія), дозволяє зв'язати електричні характеристики напівпровідникового пристрою з його топологією. Результати моделювання дозволили отримати числові значення напруги холостого ходу V_{oc} і струму короткого замикання I_{sc} . Значення коефіцієнту заповнення FF та ефективності η теоретично розраховано за формулами [36, 37]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}},$$
$$\eta = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF. \quad (1)$$

Моделювання було виконано шляхом зміни товщини шару ZnO і товщини porous-Si шляхом фіксації другої з метою вивчення ролі кожного параметра на продуктивності комірки. У першому випадку товщина поруватого кремнієвого шару фіксувалася на значенні 0,2 мкм, у другому – 500 мкм, при цьому значення товщини покриття ZnO змінювалося від 10,0 нм до 2,0 мкм. Товщина кремнієвої підкладки залишалася незмінною.

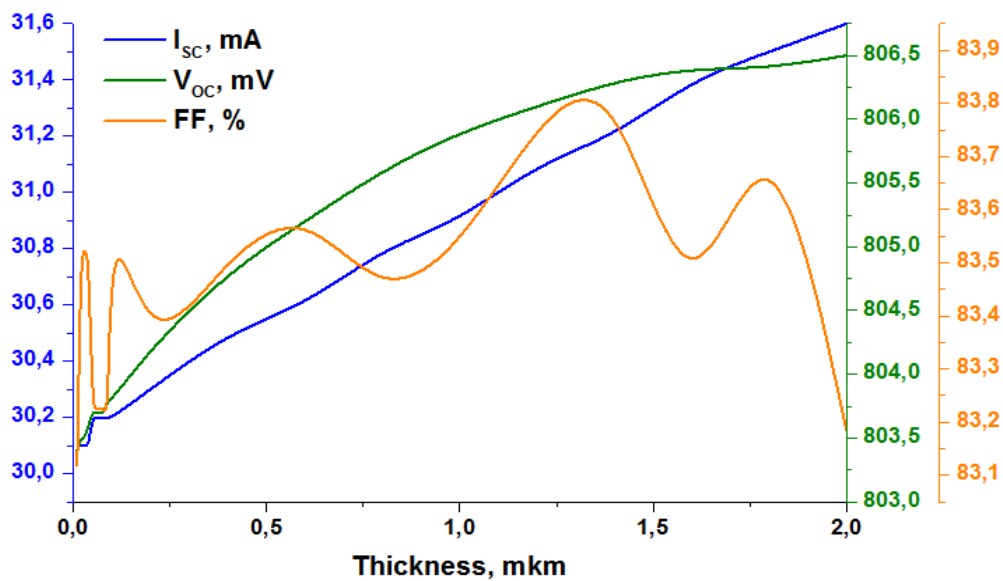
Електричні та оптичні параметри матеріалів, використані в цьому

моделюванні (табл. 1), були вибрані з баз даних програмних пакетів для моделювання сонячних елементів та наукової літератури [38-41].

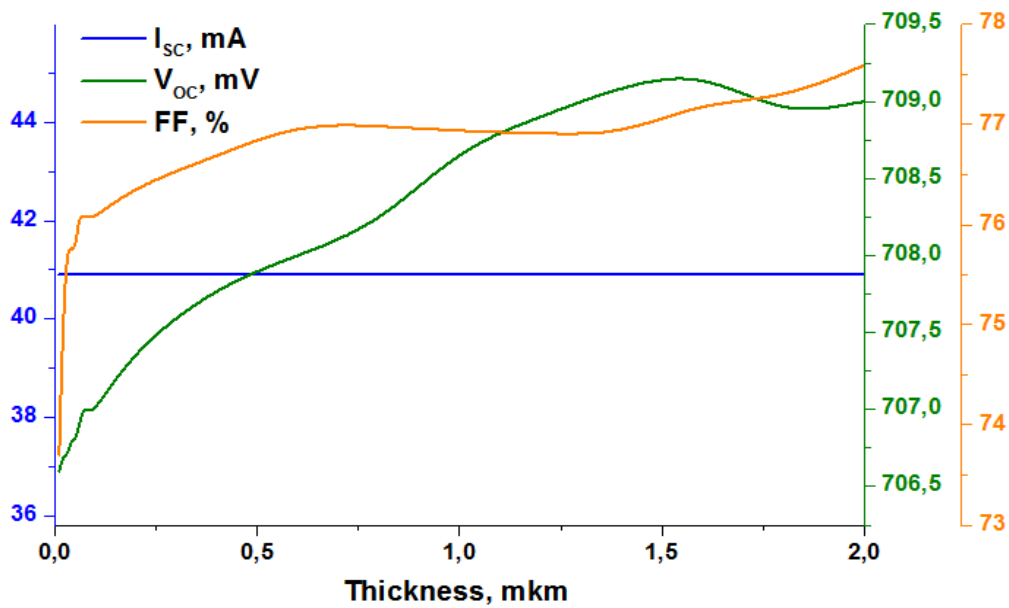
Таблиця 1
Параметри моделювання сонячних елементів

Параметр	Значення для шару		
	ZnO	Si	porous-Si
Електронна спорідненість, eV	4.0	4.05	4.05
Діелектрична проникність	9.0	11.9	1.6
Ширина забороненої зони, eV	3.3	1.124	2.05
Рухливість електронів, $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	100	1107	30
Рухливість дірок, $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	25.0	424.6	2.0
Концентрація легування акцепторів, cm^{-3}	0	$1 \cdot 10^{16}$	варіюється
Концентрація легування донорів, cm^{-3}	варіюється	0	0

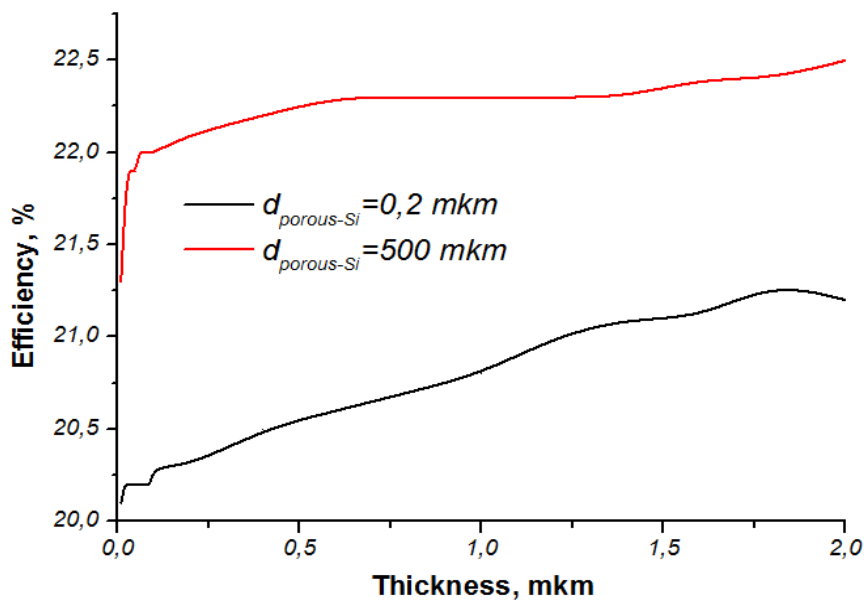
Вплив товщини шарів ZnO та porous-Si на електрофізичні властивості сонячного елемента. Товщина шару ZnO визначає кількість випромінювання, що надходить до кремнієвого шару фотоперетворювача, тому доцільним є дослідження впливу товщини шарів ZnO та porous-Si на електричні властивості ФП. На рис. 1 показано зміни струму короткого замикання I_{SC} , напруги холостого ходу V_{OC} , фактору заповнення FF, ефективності при різних значеннях товщини плівки ZnO та шару porous-Si.



а



б



в

Рис. 1. Залежність оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від різних значень товщини плівки ZnO:
а – струм короткого замикання I_{sc} , напруга холостого ходу V_{oc} , фактор заповнення FF при товщині поруватого шару $d_{porous-Si}=0,2$ мкм;
б – струм короткого замикання I_{sc} , напруга холостого ходу V_{oc} , фактор заповнення FF при товщині поруватого шару $d_{porous-Si}=500$ мкм;
в – ефективність фотоперетворювача при різних значеннях товщини поруватого шару.

Встановлено, що для ZnO товщиною 2 мкм було отримано найвищий ККД 22,5 %, тобто ККД зростає, коли товщина покриття ZnO збільшується до 1,8 мкм, і зменшується з подальшим збільшенням товщини, що вказує на оптимальну товщину для кращої продуктивності. Результат очікуваний, оскільки поглинені фотони прямо пропорційні товщині активного шару. Однак подальше збільшення товщини активного шару викликає рекомбінацію вільних носіїв заряду, що сприяє зниженню ККД [42].

Відмічається, що для розглянутих товщин поруватого кремнієвого шару значною мірою відрізняються значення фактору заповнення $\sim 10\%$. Значення струму короткого замикання, у другому випадку (рис. 1, б) в заданому діапазоні товщин змін не зазнає.

Вплив рівня легування шару ZnO на електрофізичні властивості сонячного елемента. Значна частина світла поглинається поверхнею сонячного елемента, що призводить до високої швидкості генерації, тому вивчення впливу концентрації легуючих домішок повинні бути детально досліджені.

Під час моделювання товщина шару ZnO становила 2,0 мкм, для шару поруватого Si – 200 нм, решта параметрів відповідала зазначеним в табл. 1. Результати моделювання наведено на рис. 2.

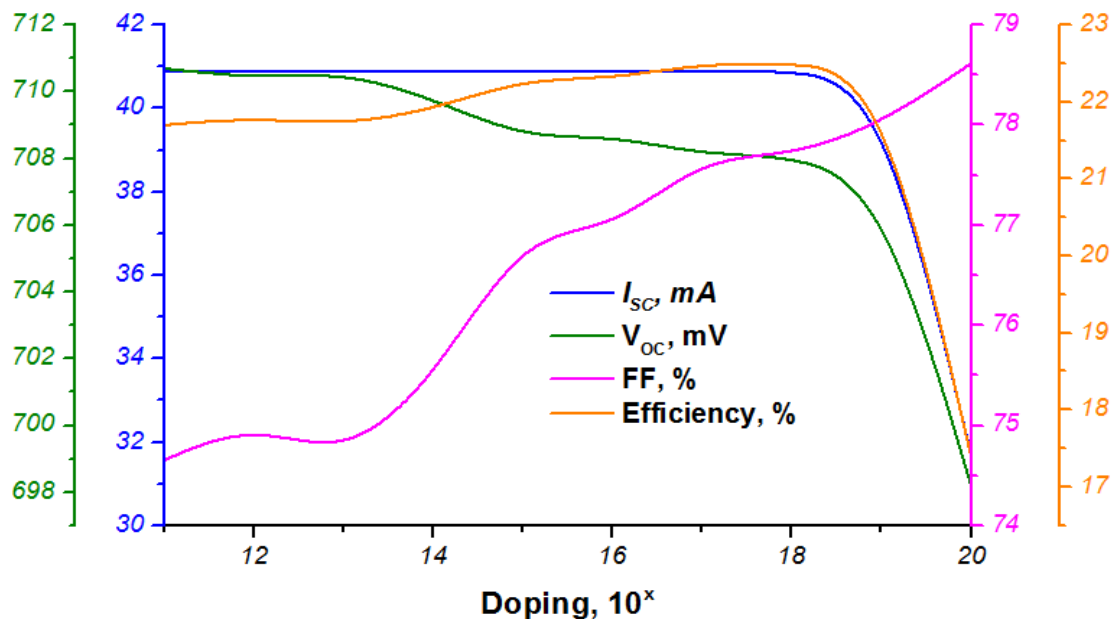


Рис. 2. Залежності оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від рівня легування покриття ZnO.

Згідно рис. 2 висока концентрація легування в шарі ZnO призводить до зниження загальної ефективності через зниження пропускання світла, поглинання та вищої швидкості рекомбінації [43]. Але при значеннях легування 10^{12} - 10^{16} cm^{-3} ефективність SE також знижується, що найімовірніше пов'язано зі зниженням швидкості



дрейфу та зростанням опору структури.

Таким чином, при високих значеннях концентрації легування та товщини плівки ZnO світло майже не проникає в кремнієву підкладку, що впливає на генерацію носія заряду і призводить до зниження ефективності пристрою. Максимальне значення ККД досягається при концентрації легування донорів $\sim 10^{18}$ см⁻³.

Вплив текстурування шарів ZnO на електрофізичні властивості сонячного елемента. Ефективність сонячних елементів із гетеропереходом ZnO/Si можна підвищити шляхом максимізації шорсткості поверхні ZnO на кремнієвих мікропорах. Важливою технікою для зменшення відбиття світла є текстурування поверхні, у зв'язку з цим було проведено моделювання фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si при значеннях кута текстурування в межах 40-85° (табл. 2).

Таблиця 2

Зміна оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si при зміні кута текстурування поверхні фотоперетворювача

Кут текстурування, градуси	Сила струму, I _{SC} , мА	Напруга, V _{OC} , мВ	Фактор заповнення FF, %	ККД, %
40	40,9	708,7	76,6	22,2
45	40,9	708,7	76,6	22,2
50	40,9	708,7	76,9	22,3
55	40,9	708,7	76,9	22,3
60	41	708,7	76,7	22,3
65	41	708,7	77,1	22,4
70	41,1	708,6	76,9	22,4
75	41,1	708,4	77,3	22,5
80	41,2	708,3	77,4	22,6
85	41,3	708	77,6	22,7

Аналіз зміни оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si в залежності від кута текстурування поверхні фотоперетворювача (табл. 2) показує, що ефективності перетворення сонячної енергії набуває максимального значення при куті 85° за рахунок зменшення відбиття світла від лицьової поверхні та уловлювання світла в сонячних елементах. Збільшення кількості фотонів, які можуть бути поглинені сонячним елементом, призводить відповідно до більшої щільності струму короткого замикання.

Таким чином, за рахунок текстурування поверхні відбувається збільшення площі гетеропереходу, що призводить до появи більшої кількості електронно-діркових пар під час освітлення та підвищення ефективності сонячних батарей (рис. 3).

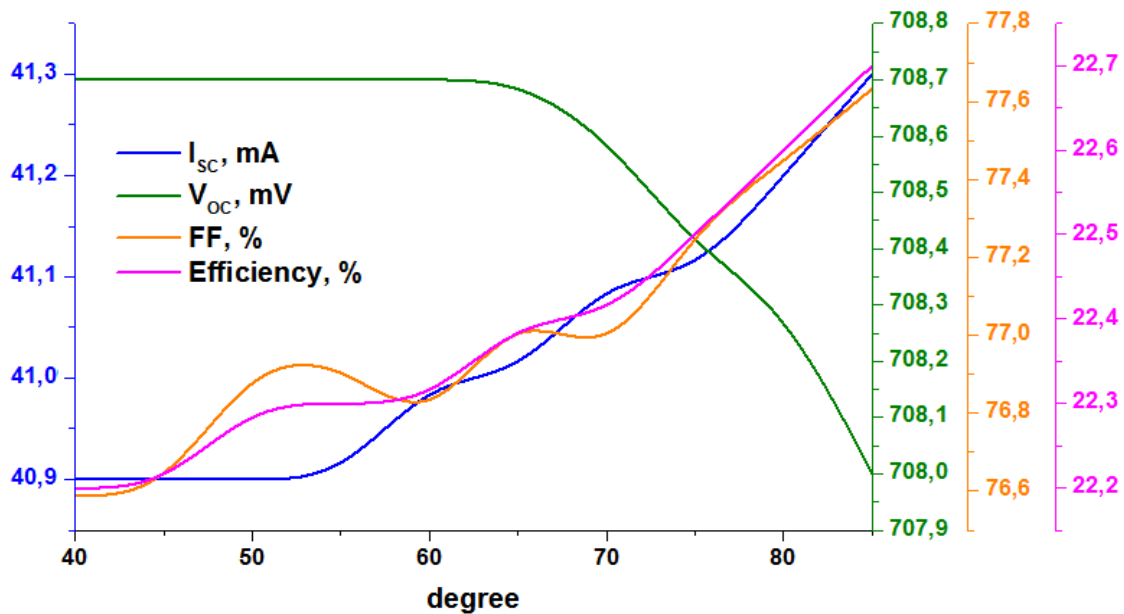


Рис. 3. Залежності оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від кута текстурування поверхні фотоперетворювача.

Вплив температури сонячного елемента на електрофізичні властивості. Робоча температура значною мірою впливає на ефективність фотоелектричної панелі. З метою дослідження даного впливу було проведено моделювання фотоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від різних значень температур у діапазоні від 280 К до 340 К. Отримані значення представлені на рис. 4.

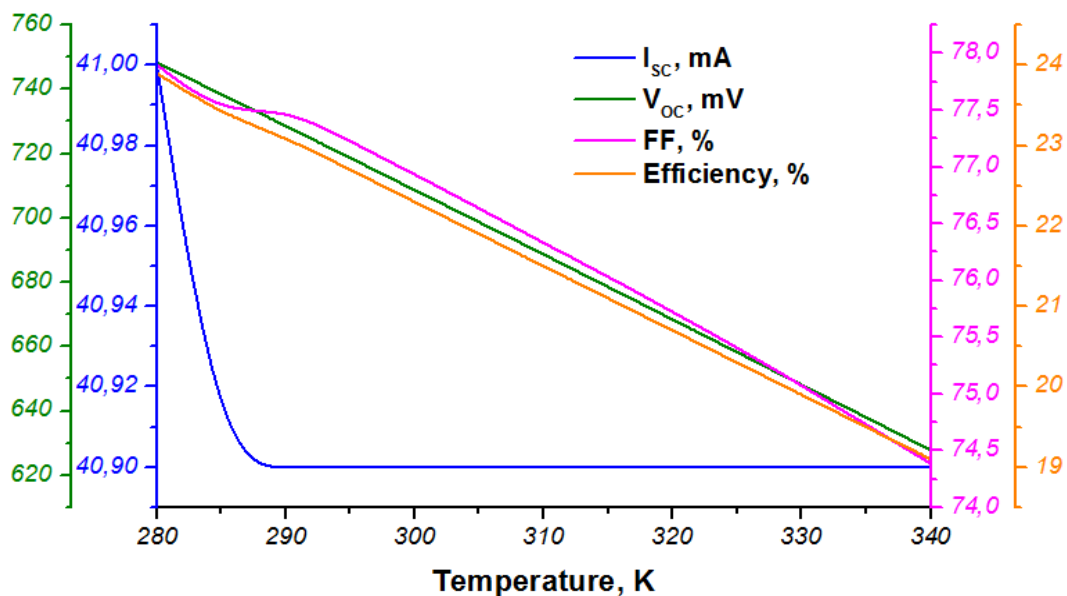


Рис. 4. Оптоелектричні параметри фотоперетворювача на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si при різних значеннях температури.

Рис. 4 демонструє, що підвищення температури значною мірою



впливає на продуктивність сонячної батареї, призводячи до зменшення ККД. Найкраще значення ефективності досягається при 280 К, де коефіцієнт заповнення FF становить майже 78 %. Вплив температури є результатом властивих кремнієвим сонячним елементам характеристик – підвищення напруги зі зниженням температури.

Висновки. За допомогою програми PC1D досліджено фотоелектричні параметри гетероструктурного сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si. Вивчено вплив товщини шарів ZnO та porous-Si на електрофізичні властивості сонячного елемента. Встановлено, що для ZnO товщиною 2 мкм та при товщині porous-Si 500 мкм можна отримати найвищий ККД 22,5 %. Зростання концентрації легування в шарі ZnO призводить до зниження загальної ефективності пристрою через зниження пропускання світла. Максимальне значення ККД досягається при концентрації легування донорів $\sim 10^{18}$ см⁻³. Дослідження текстурування поверхні сонячного елемента показує, що ефективність перетворення сонячної енергії набуває максимального значення 22,7 % при куті 85° за рахунок зменшення відбиття світла від лицьової поверхні та уловлювання світла в сонячних елементах. Також встановлено, що підвищення температури з 280 К до 340 К призводить до зменшення ККД на 4,8%. Найкраще значення ефективності 23,9 % досягається при 280 К.

Список використаних джерел

1. Ibraheem Rafah. Modeling and Analysis of Different Antireflection Polymer Coating on Silicon Solar Cell Using Pc1d Software. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2020. Vol. 43. P. 222-232.
2. Kim J. Y., Lee J. W., Jung H. S., Shin H., Park N. G. High-efficiency perovskite solar cells. *Chemical reviews*. 2020. Vol. 120(15). P. 7867-7918. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00107>.
3. Powalla M., Paetel S., Ahlswede E., Wuerz R., Wessendorf C. D., Magorian Friedlmeier T. Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, Cu (In, Ga) Se₂-, and perovskite-based materials. *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5(4). <https://doi.org/10.1063/1.5061809>.
4. Blakers A., Zin N., McIntosh K. R., Fong K. High efficiency silicon solar cells. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 33. P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.033>.
5. Köhnen E., Jošt M., Morales-Vilches A. B., Tockhorn P., Al-Ashouri A., Macco B., Kegelmann L., Korte L., Rech B., Schlattmann R., Stannowski B. Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance.



Sustainable Energy & Fuels. 2019. Vol. 3(8). P. 1995-2005.
<https://doi.org/10.1039/c9se00120d>.

6. Zahid M. A., Khokhar M. Q., Kim Y., Yi J. Utilization of CaF₂/ITO Double Layer Anti Reflective Coating for Increasing the Efficiency in Rear Emitter SHJ Solar Cells. *Crystal Research and Technology*. 2022. Vol. 57(8). P. 2100233.
<https://doi.org/10.1002/crat.202100233>.

7. Ho W. J., Yang H. Y., Liu J. J., Lin P. J., Ho C. H. Plasmonic effects of two-dimensional indium-nanoparticles embedded within SiO₂ anti-reflective coating on the performance of silicon solar cells. *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 508. P. 145275.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145275>.

8. Дяденчук А. Ф., Кідалов В. В. Гетероструктури n-ZnO:Al/porous-CdTe/p-CdTe в якості фотоелектричних перетворювачів. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2017. Т. 15, № 3. С. 487-494.

9. Omar A., Ali M. S., Abd Rahim N. Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: A review. *Solar Energy*. 2020. Vol. 207. P. 1088-1121.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.028>.

10. Zaien M., Ahmed N. M., Hassan Z. Fabrication and Characterization of an n-CdO/p-Si Solar Cell by Thermal Evaporation in a Vacuum. *Int. j. Electrochem. Sci*. 2013. Vol. 8. P. 6988-6996.
[https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)14822-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14822-X).

11. Xu M., Xu Z., Sun Z., Chen W., Wang L., Liu Y., ... Pan S. Surface Engineering in SnO₂/Si for High-Performance Broadband Photodetectors. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023. Vol. 15(2). P. 3664-3672. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c20073>.

12. Yildirim H. Excitons in nonpolar ZnO/BeZnO quantum wells: Their binding energy and its dependence on the dimensions of the structures. *Physica B: Condensed Matter*. 2022. Vol. 639. P. 413974.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413974>.

13. Vyas S. A short review on properties and applications of zinc oxide based thin films and devices: ZnO as a promising material for applications in electronics, optoelectronics, biomedical and sensors. *Johnson Matthey Technology Review*. 2020. Vol. 64(2). P. 202-218.
<https://doi.org/10.1595/205651320X15694993568524>.

14. Kanmaz İ. Simulation of CdS/p-Si/p+-Si and ZnO/CdS/p-Si/p+-Si heterojunction solar cells. *Results in Optics*. 2023. Vol. 10. P. 100353.
<https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100353>.



15. Dwivedi D. K. Modeling of CZTSSe solar photovoltaic cell for window layer optimization. *Optik*. 2020. Vol. 222. P. 165407. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165407>.
16. Boudour S., Bouchama I., Hadjab M., Laidoudi S. Optimization of defected ZnO/Si/Cu₂O heterostructure solar cell. *Optical Materials*. 2019. Vol. 98. P. 109433. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109433>.
17. Chen L., Chen X., Liu Y., Zhao Y., Zhang X. Research on ZnO/Si heterojunction solar cells. *Journal of Semiconductors*. 2017. Vol. 38(5). P. 054005. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/38/5/054005>.
18. Najim S. A. Fabrication of p-Si/ZnO Thin Films Solar Cell by CVD at Different Substrate Temperatures. *College Of Basic Education Researches Journal*. 2019. Vol. 15(4).
19. Gerlach D., Wilks R. G., Wippler D., Wimmer M., Lozac'h M., Félix R., ... Bär M. The silicon/zinc oxide interface in amorphous silicon-based thin-film solar cells: Understanding an empirically optimized contact. *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103(2). <https://doi.org/10.1063/1.4813448>.
20. Lai K. C., Liu C. C., Lu C. H., Yeh C. H., Houg M. P. Characterization of ZnO: Ga transparent contact electrodes for microcrystalline silicon thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010. Vol. 94(3). P. 397-401. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.12.002>.
21. Abass K. H., Mohammed M. K. Fabrication of ZnO: Al/Si solar cell and enhancement its efficiency via Al-doping. *Nano Biomedicine and Engineering*. 2019. Vol. 11(2). P. 170-177. <https://doi.org/10.5101/nbe.v11i2.p170-177>.
22. Abe Y., Kagei T., Sichanugrist P., Konagai M. Development of double-textured ZnO: B substrates for improving microcrystalline silicon solar cell performance. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014. Vol. 4(6). P. 1374-1379. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2358085>.
23. Ding J., Zhou Y., Dong G., Liu M., Yu D., Liu F. Solution processed ZnO as the efficient passivation and electron selective layer of silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2018. Vol. 26(12). P. 974-980. <https://doi.org/10.1002/pip.3044>.
24. Hussain B., Ebong A., Ferguson I. Zinc oxide as an active n-layer and antireflection coating for silicon based heterojunction solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 139. P. 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.03.017>.
25. Chala S., Sengouga N., Yakuphanoglu F., Rahmane S., Bdirina M., Karteri İ. Extraction of ZnO thin film parameters for modeling a ZnO/Si solar cell. *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.035>.



26. Wenas W. W., Riyadi S. Carrier transport in high-efficiency ZnO/SiO₂/Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. Vol. 90. P. 3261-7 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.026>.

27. Vallisree S., Thangavel R., Lenka L. T. Modelling, simulation, optimization of Si/ZnO and Si/ZnMgO heterojunction solar cells. *Materials Research Express*. 2018. Vol. 6(2). P. 025910. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf023>.

28. Jamil N. Y., Ivashchenko M. M., Abdulla S. N., Muhammed A. A. K., Pogrebnjak A. D. Design and Fabrication Heterojunction Solarcell of Si-CdS-ZnO Thin Film. In Proceedings of the international conference nanomaterials: applications and properties (No. 1, no. 4, pp. 04NMEEEE09-04NMEEEE09). Sumy State University Publishing. 2012.

29. Zhang M., Gao X., Barra A., Chang P., Huang L., Hellwarth R., Lu J. G. Core-shell structured Si/ZnO photovoltaics. *Materials Letters*. 2015. Vol. 140. P. 59-63. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.083>.

30. Zhao F., Lin J., Lei Z., Yi Z., Qin F., Zhang J., ... Wu P. Realization of 18.97% theoretical efficiency of 0.9 μm thick c-Si/ZnO heterojunction ultrathin-film solar cells via surface plasmon resonance enhancement. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2022. Vol. 24(8). P. 4871-4880. <https://doi.org/10.1039/D1CP05119A>.

31. Chabane L., Zebbar N., Trari M., Kechouane M. Opto-capacitive study of n-ZnO/p-Si heterojunctions elaborated by reactive sputtering method: Solar cell applications. *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 636. P. 419-424. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.06.041>.

32. Naim H., Shah D. K., Bouadi A., Siddiqui M. R., Akhtar M. S., Kim C. Y. An In-Depth Optimization of Thickness of Base and Emitter of ZnO/Si Heterojunction-Based Crystalline Silicon Solar Cell: A Simulation Method. *Journal of Electronic Materials*. 2022. Vol. 51(2). P. 586-593. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09341-5>.

33. Huang F., Guo B., Li S., Fu J., Zhang L., Lin G., ... Cheng Q. Plasma-produced ZnO nanorod arrays as an antireflective layer in c-Si solar cells. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. P. 4011-4023. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3099-1>.

34. Singh Bhim, Vivek Gupta. Modelling and simulation of silicon solar cells using PC1D. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 54. P. 810-813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.092>.

35. Sharma Rajinder. Silicon nitride as antireflection coating to enhance the conversion efficiency of silicon solar cells. *Turkish Journal of Physics*. 2018. Vol. 42(4). P. 350-355. <https://doi.org/10.3906/fiz-1801-28>.

36. Dyadenchuk A. F., Kidalov V. V. Films CdS Grown on porous Si Substrate. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2018. Vol. 10(1). No 01007-1-01007-4.



37. Muhfidin Rivani, Song Yu. Temperature Effects on the Performance of Silicon Solar Cells using PC1D. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial and Technology and Information Design, ICITID 2021, 30 August 2021, Yogyakarta, Indonesia*. 2021. <http://dx.doi.org/10.4108/eai.30-8-2021.2311501>.

38. Abdullah C. A. C., Razak D. F. A., Yunus M. B. M., Zaki M., Yusoff M. Structural and Optical Properties of N-Type and P-Type Porous Silicon Produced at Different Etching Time. *Int. J. Electroactive Mater.* 2019. Vol. 7. P. 28-37.

39. Yadav C., Kumar S. Numerical simulation for optimization of ultra-thin n-type AZO and TiO₂ based textured p-type c-Si Heterojunction Solar Cells. *Silicon*. 2021. P. 1-9. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01212-2>.

40. Bilyalov R., Stalmans L., Beaucarne G., Loo R., Caymax M., Poortmans J., Nijs J. Porous silicon as an intermediate layer for thin-film solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001. Vol. 65(1-4). P. 477-485. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00130-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00130-6).

41. Ray J., Chaudhuri T. K., Panchal C., Patel K., Patel K., Bhatt G., Suryavanshi P. PbS-ZnO Solar Cell: A Numerical Simulation. *Journal of Nano-and Electronic Physics*. 2017. Vol. 9(3).

42. Husen M. J., Aga F. G., Dibaba S. T. Theoretical Performance Analysis of Inverted P3HT: PCBM Based Bulk Hetero-Junction Organic Solar Cells through Simulation. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 2023. P. 6. <https://doi.org/10.1155/2023/4204298>.

43. King R. R., Mitchell K. W., Gee J. M. Back Surface Cell Structures for Reducing Recombination in CZ Silicon Solar Cells. *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, Waikoloa, USA. 1994. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.519966>.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2023 р.

A. Dyadenchuk¹, Ye. Filipovich²

¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

² National University «Zaporizhzhia polytechnic»

SIMULATION OF THE PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF THE ZnO/porous-Si/Si HETEROJUNCTION SOLAR CELL

Summary

The work is aimed at researching photosensitive structures based on porous Si and ZnO promising for solar energy. A device scheme of a solar cell model based on ZnO/porous-Si/Si heterostructures is proposed. Using the PC1D program, the light characteristics of the manufactured structure were calculated (no-load voltage V_{oc} ,



short-circuit current I_{SC} , filling factor FF and efficiency η), as well as the current-voltage characteristics were constructed. The effect of the thickness of the porous-Si and ZnO layers, the texturing and doping level of the ZnO layer, as well as the effect of temperature on the performance of the ZnO/porous-Si/Si heterojunction solar cell were investigated in order to obtain a device with good conversion efficiency. It was established that for ZnO with a thickness of 2 μm and with a thickness of porous-Si of 500 μm , the highest efficiency of 22.5% can be obtained. An increase in the doping concentration in the ZnO layer leads to a decrease in the overall efficiency of the device due to a decrease in light transmission. The maximum value of the efficiency is reached at the donor doping concentration of $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. The study of the texturing of the surface of the solar cell shows that the solar energy conversion efficiency reaches a maximum value of 22.7% at an angle of 85° due to the reduction of light reflection from the front surface and the capture of light in the solar cells. It was also found that increasing the temperature from 280 K to 340 K leads to a decrease in efficiency by 4.8%. The best efficiency value of 23.9% is achieved at 280 K.

Keywords: photoconverter, porous silicon, computer simulation, ZnO film.

ПРАЦІ
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 23, том 2

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