



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 eВ), великою енергією зв'язку екситонів 60 MeВ [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

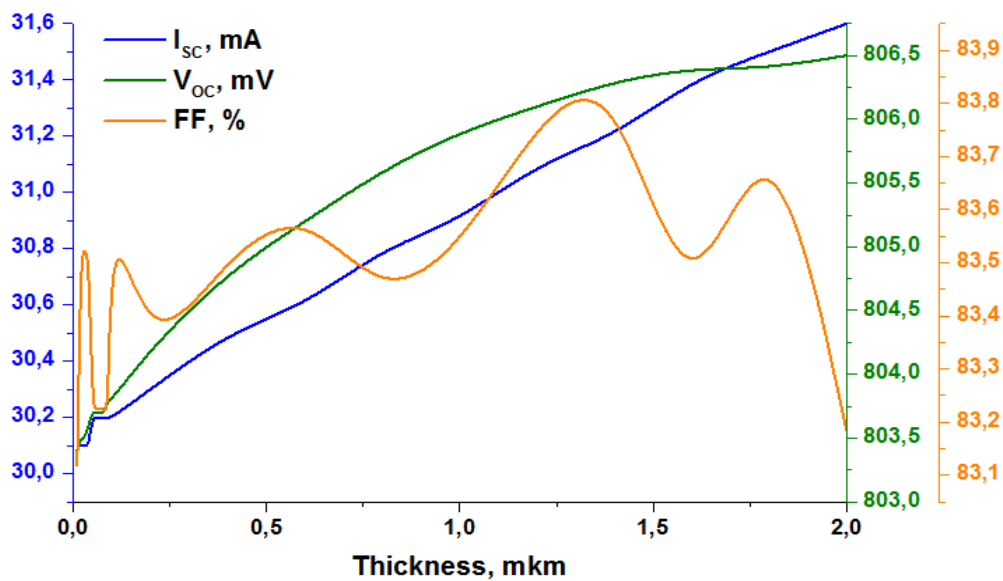


моделюванні (табл. 1), були вибрані з баз даних програмних пакетів для моделювання сонячних елементів та наукової літератури [38-41].

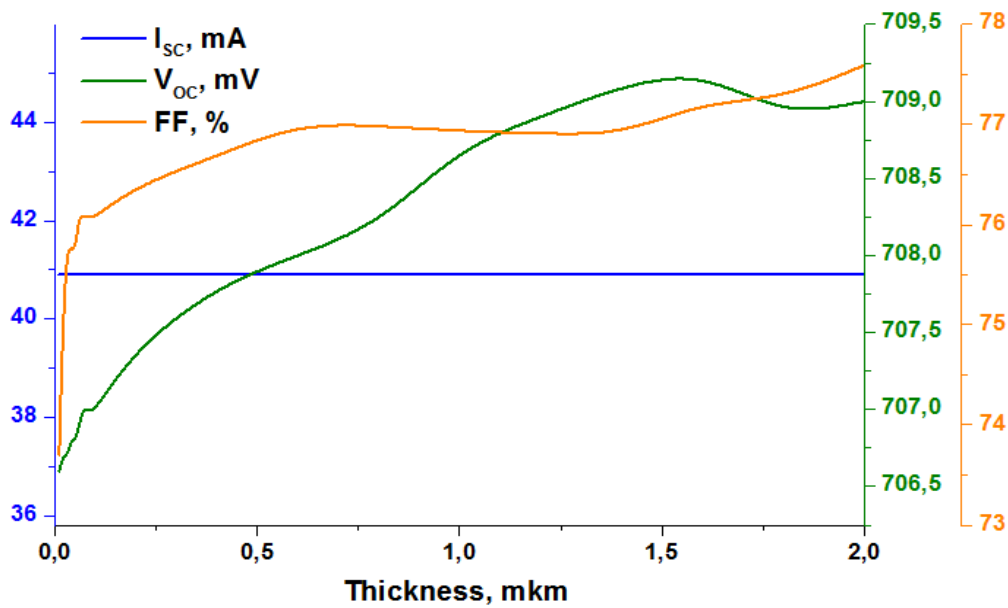
Таблиця 1
Параметри моделювання сонячних елементів

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

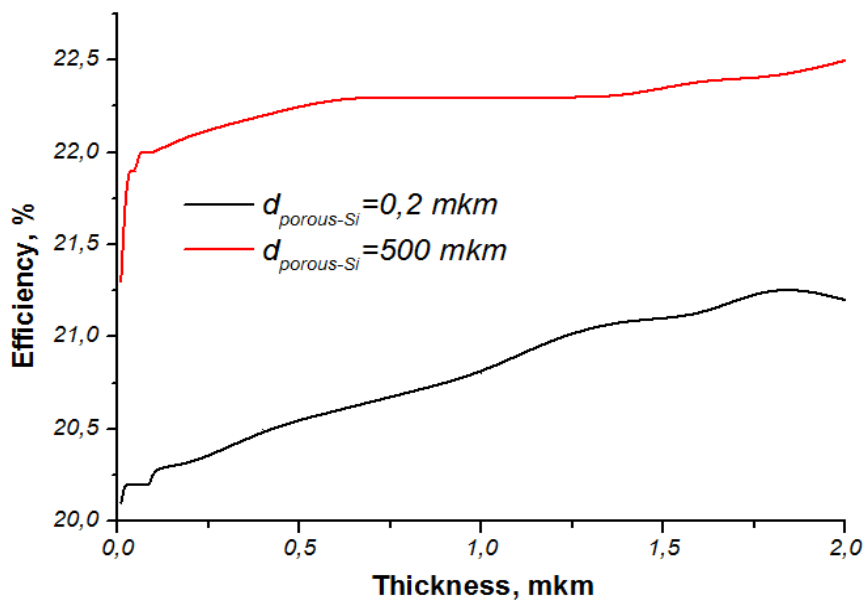
Вплив товщини шарів ZnO та porous-Si на електрофізичні властивості сонячного елемента. Товщина шару ZnO визначає кількість випромінювання, що надходить до кремнієвого шару фотоперетворювача, тому доцільним є дослідження впливу товщини шарів ZnO та porous-Si на електричні властивості ФП. На рис. 1 показано 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.

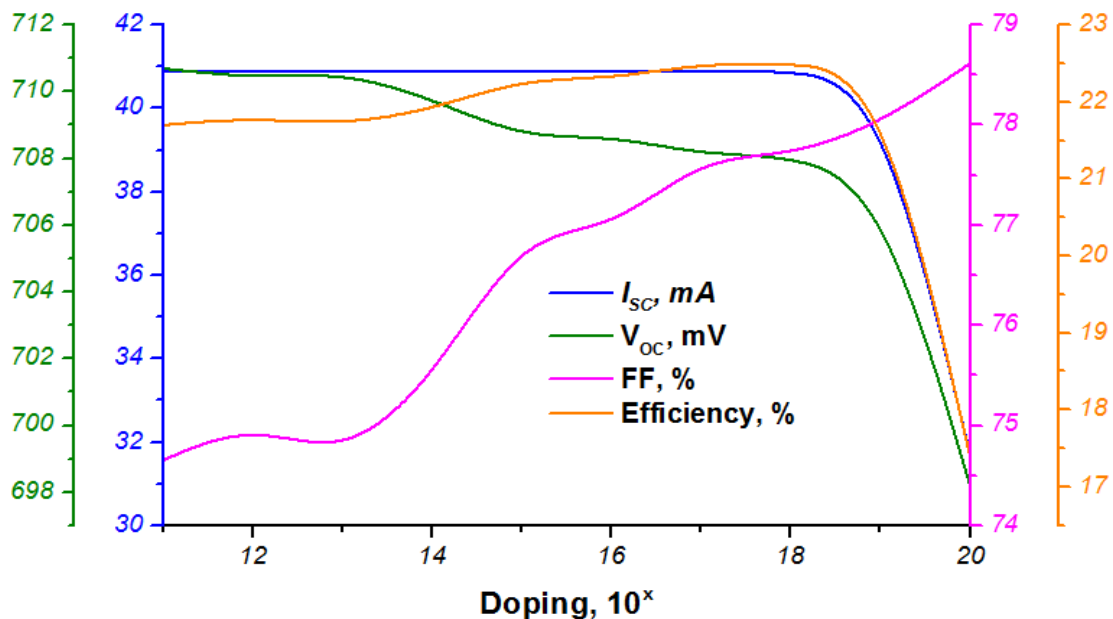


Рис. 2. Залежності оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від рівня легування покриття ZnO.

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} , mA	Напруга, V _{OC} , mV	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).

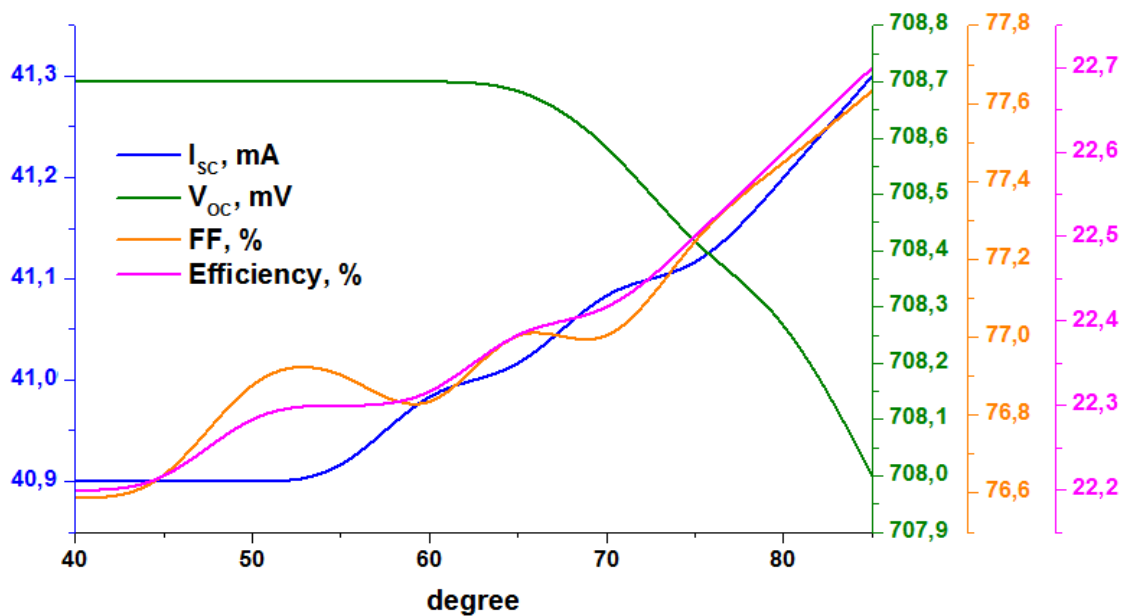


Рис. 3. Залежності оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від кута текстурування поверхні фотоперетворювача.

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.

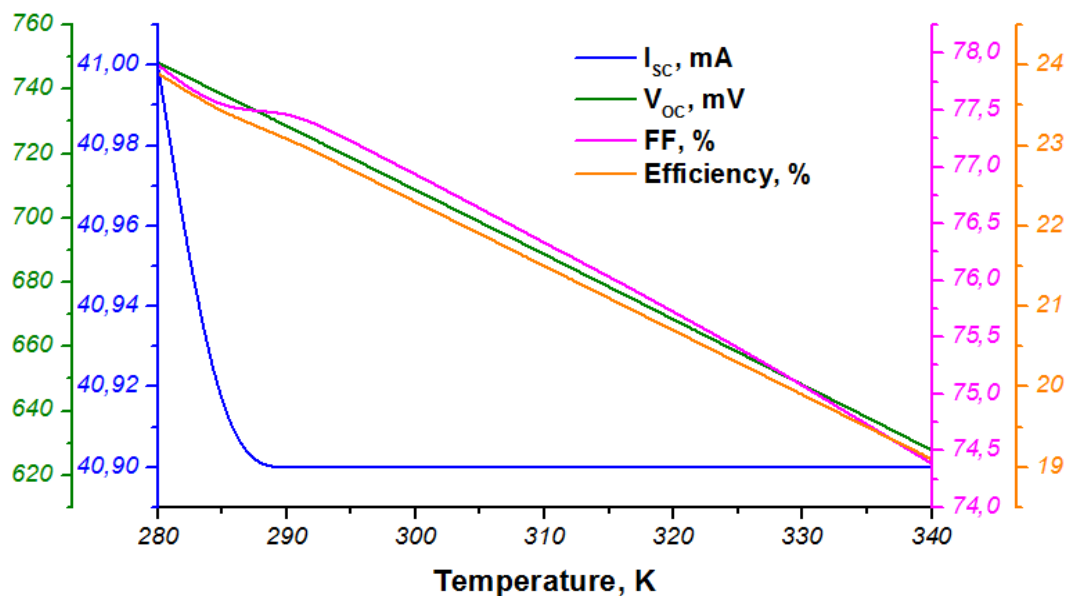


Рис. 4. Оптоелектричні параметри фотоперетворювача на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si при різних значеннях температури.

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. Yıldırım 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. 04NMEEE09-04NMEEE09). 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.