



---

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-1>

УДК 621.383.51:621.315.592

С. В. Носань, асистент

ORCID: 0009-0001-2303-8621

А. Ф. Дяденчук, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6625-9985

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: [alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua](mailto:alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua)

### ВПЛИВ ІНЖЕНЕРІЇ ЛЕГУВАННЯ ТА ПРОСТОРОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ СТРУКТУРИ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ZnO/POROUS-Si/Si

*Анотація.* У роботі досліджено вплив концентрації легування й товщини шарів на енергетичну ефективність фотоперетворювачів на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si. За допомогою моделювання в середовищі PC1D проаналізовано зміну фотогенерації, рекомбінаційних процесів і параметрів ВАХ залежно від варіації товщини шарів ZnO й поруватого кремнію, а також рівня легування ZnO. Установлено, що оптимальні значення товщини ZnO (10 мкм) і porous-Si (1 мкм), а також концентрація легування ZnO на рівні  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> забезпечують максимальну ефективність перетворення 22,6 %. Показано, що надмірне легування призводить до зростання рекомбінаційних втрат і зниження продуктивності. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції високоефективних фотоперетворювачів на основі кремнієвих гетероструктур.

*Ключові слова:* гетероструктура, легування, товщина шарів, PC1D, фотоперетворювач.

*Постановка проблеми.* Одним із ключових напрямів розвитку сучасної відновлюваної енергетики є підвищення ефективності сонячних елементів (СЕ) [1, 2]. Ефективним методом покращення фотоперетворювачів (далі – ФП) є оптимізація їхньої структури. Оскільки зміна будь-якого етапу виробничого процесу є складним і дорогим завданням, дедалі більше уваги приділяється моделюванню. Моделювання дає змогу швидко протестувати різні варіанти дизайну без необхідності створювати фізичні прототипи. Інструментом, який останнім часом широко використовується для моделювання сонячних елементів, є програмне забезпечення PC1D [3; 4], яке дає можливість аналізувати роботу напівпровідникових пристроїв на основі фізичних моделей.

Важливим аспектом моделювання є здатність досліджувати вплив параметрів, таких як легування й товщина активних шарів фотоперетворювачів. Легування активних шарів ФП дає змогу змінювати концентрацію носіїв заряду, що безпосередньо впливає на провідність та інші електричні властивості матеріалу. Товщина шарів визначає ефективність поглинання сонячної радіації, а також впливає на генерацію та рекомбінацію носіїв заряду. Можливість контролювати легування й товщину шарів дає змогу досягти кращого балансу між мінімізацією втрат енергії та збільшенням кількості носіїв заряду, які перетворюються на електричний струм. Це особливо важливо на тлі все більшого попиту на більш економічні й високопродуктивні технології перетворення сонячної енергії, де кожне підвищення ефективності має значний вплив на загальну продуктивність системи. Таким чином, моделювання допомагає тонко налаштувати



конструкцію сонячних елементів для максимізації використання доступної енергії та зниження виробничих витрат [5–7].

*Аналіз останніх досліджень.* Сучасні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності сонячних елементів, зокрема через оптимізацію товщини активного шару та використання різних легуючих домішок [8–9], зосереджені на вивченні впливу легування на продуктивність сонячних елементів, оптимізації товщини активного шару, моделюванні та виборі оптимальних методів моделювання. Дослідження впливу товщини та концентрації легування n-шару кремнієвих сонячних елементів із використанням моделювання PC1D [10] показало, що оптимізація цих параметрів дає змогу досягти високої ефективності – більше ніж 20 %, що може бути використано для розробки високопродуктивних монокристалічних сонячних елементів.

Контрольоване легування зменшує втрати при рекомбінації та підвищує концентрацію носіїв заряду, що підвищує ефективність перетворення сонячної енергії. Легування значно підвищує стабільність і продуктивність фотогальванічних елементів. Наприклад, дослідження [11] аналізує вплив технологій легування на підвищення теоретичної ефективності кристалічного кремнію.

Зменшення товщини знижує витрати на матеріал і втрати на поглинання світла, але надмірне зменшення товщини може призвести до втрат через рекомбінацію носіїв заряду на поверхні. Автори [12] розглядають роль тонкого кремнієвого шару в захопленні світла та зменшенні втрат рекомбінації, а в праці [13] аналізують вплив товщини шару на характеристики гетеропереходів у сонячних елементах.

Нещодавно значне підвищення ефективності перетворення світла завдяки покращенню поглинання та зменшенню втрат рекомбінації було досягнуто завдяки використанню наноструктурованих матеріалів, зокрема поруватого кремнію-Si. Раніше ми досліджували гетероструктури на основі поруватого кремнію [14–16].

Поєднання кремнію з оксидом цинку є досить перспективним [17–18]. У дослідженні [19] та інших обговорюється використання оксиду цинку ZnO як прозорого електрода з високою провідністю й низьким поглинанням, що робить його ефективним для гетеропереходів із кремнієм. ZnO, нанесений на поруватий кремній, забезпечує кращий збір електронів і кращу взаємодію між різними шарами елемента [20].

Поруватий кремній як буферний шар виконує кілька важливих функцій, зокрема покращує пасивацію поверхні, зменшує ефекти рекомбінації носіїв заряду та підвищує поглинання світла завдяки своїй наноструктурі [21], що дає змогу суттєво покращити властивості гетеропереходу.

Хоча гетероструктура ZnO/porous-Si/Si та її застосування в сонячній енергетиці не є новою, питання оптимізації структури поруватого кремнію, моделювання фотогальванічних властивостей гетероструктури за допомогою програмного забезпечення тощо досі недостатньо досліджені.

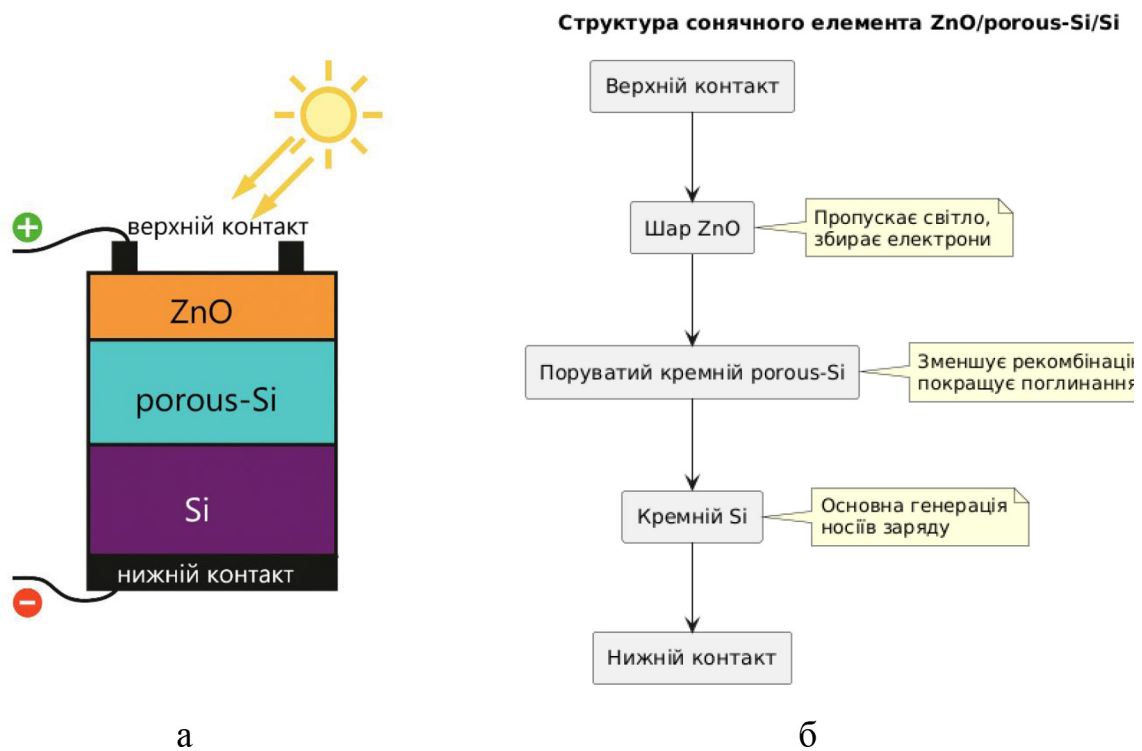
*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є дослідження впливу легування й товщини на ефективність сонячних елементів за допомогою моделювання PC1D. Результати дослідження допоможуть краще зрозуміти, як зміни цих параметрів можуть підвищити ефективність фотогальванічних пристроїв, а також сприятимуть розробці більш ефективних сонячних елементів у майбутньому.

*Основна частина.* Дослідження зосереджувалося на таких факторах, як товщина й концентрація легування, щоб вивчити їх вплив на вольт-амперну характеристику фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si, інші основні параметри були фіксовані. Для чисельного моделювання використовувалися початкові фізичні параметри ZnO, поруватого Si та Si, наведені в роботі [22]. Хоча виробництво та продуктивність електричної енергії вимагають урахування всіх параметрів, для спрощення та розуміння впливу параметрів деякі фактори будуть фіксовані.

Схематичне представлення сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si, де шар ZnO відіграє роль антивідбивного покриття й віконного шару, подано на рис. 1. У представленому фотоперетворювачі кожен шар виконує специфічну функцію, що впливає на ефективність перетворення енергії (рис. 1, б).

Як видно з рис. 1, поєднання прозорого електрода ZnO, буферного шару porous-Si й базового шару Si забезпечує ефективне поглинання світла, зменшення рекомбінації та генерацію носіїв заряду, що підтверджено результатами моделювання.

Фотовольтаїчні характеристики отримані з товщиною шарів ZnO та поруватого Si в діапазоні 1–10 мкм, максимальна сила струму досягалася при товщинах 10 та 1 мкм та мінімальна при 1 і 10 мкм, для шарів ZnO й поруватого Si відповідно (рис. 2). Вплив товщини шару на ВАХ припиняється при товщинах близько 15 мкм, оскільки матеріал стає об'ємним і носій рекомбінації зменшується.



**Рис. 1. Схема фотоперетворювача з гетероструктурою ZnO/porous-Si/Si:**  
а) поперечний переріз сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si;  
б) функціональна схема шарів

Більша частина світла поглинається саме поблизу поверхні. Роблячи передній шар дуже тонким, значна частка носіїв, що походять від вхідного світла, утворюється в межах дифузійної довжини р-п-переходу. Напруга розриву показувала приблизно 711,7 мВ, ефективність – 22,6 %.

Для визначення оптимальної концентрації легування та її впливу на ефективність концентрацію допування шарів ZnO змінювали, тоді як концентрацію Si й поруватого Si підтримували на рівні  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Залежність ефективності від значення легуючої домішки показана на рис. 4.

Концентрація домішок постійно зростає з  $10^{13}$  до  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, струм і напруга також поступово збільшуються. Найвищі значення досягнуті при легуванні  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, а саме: 41,0 мА, 710,8 мВ і 22,6 %. З рис. 5 видно, що надмірне легування погіршує якість матеріалу до такої міри, що носії рекомбінуються ще до досягнення гетеропереходу. Тобто вищі концентрації легування призводять до збільшення рекомбінації носіїв або скорочення терміну життя носіїв меншості [10].

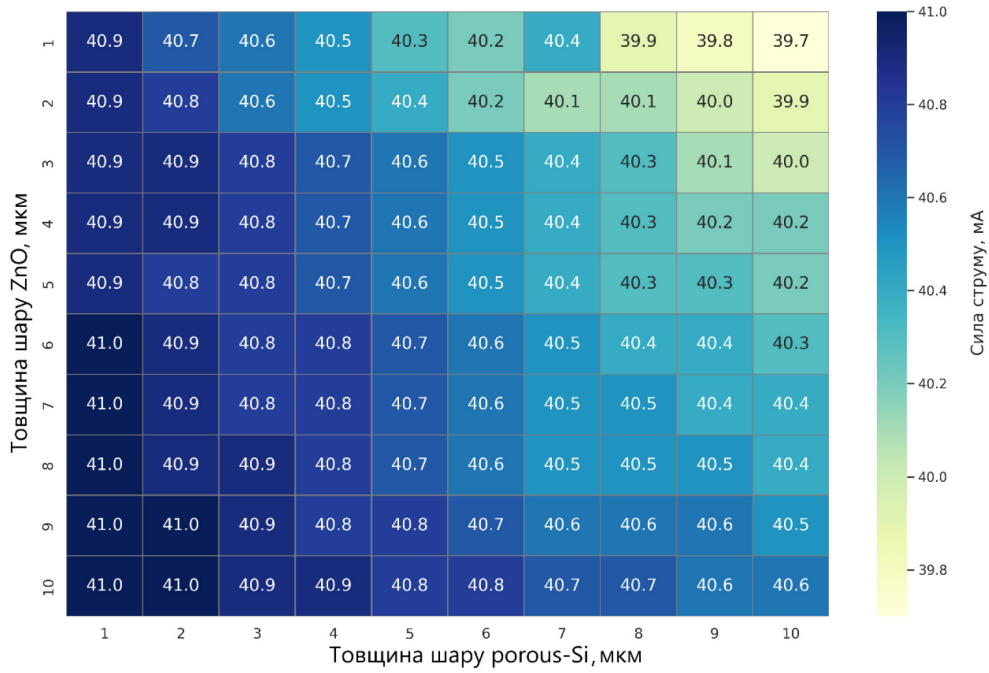


Рис. 2. Залежність сили струму від товщини шарів ZnO та porous-Si

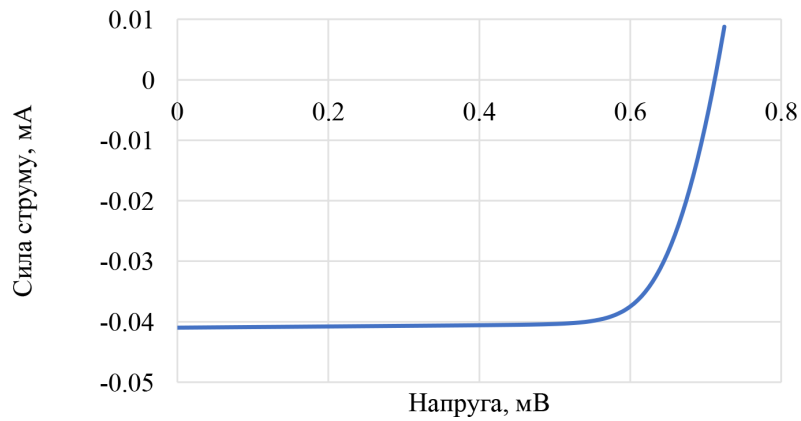


Рис. 3. ВАХ фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si

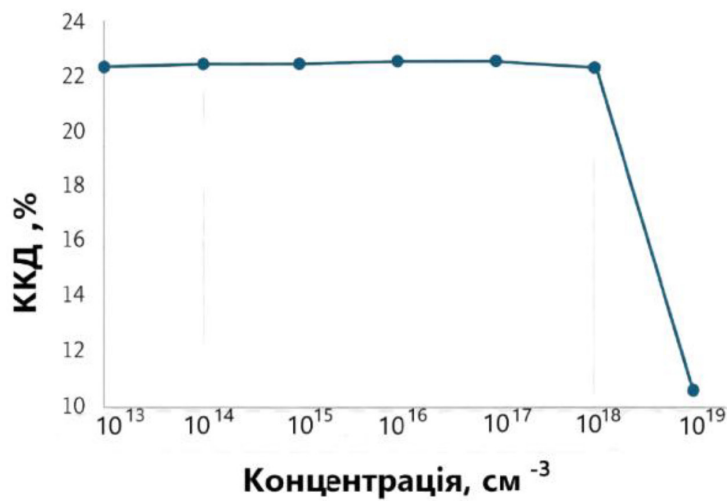


Рис. 4. Залежність ефективності фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si від рівня легування шару ZnO



**Висновки.** Дослідження впливу товщини шару та концентрації легування на ефективність сонячних елементів на основі гетеропереходу ZnO/porous-Si/Si показало, що оптимізація цих параметрів дає змогу досягти високої ефективності. Максимальна ефективність становила 22,6 % при оптимальних значеннях товщини та легування. Однак варто розуміти, що надмірне легування може негативно вплинути на якість матеріалу, підкреслюючи важливість вибору правильних параметрів для досягнення максимальної продуктивності. Отримані результати можна використати для розробки більш ефективних сонячних елементів у майбутньому.

#### Список використаних джерел

1. Ranabhat K., Patrikeev L., Revina A.A.E., Andrianov K., Lapshinsky V., Sofronova E. An introduction to solar cell technology. *Journal of Applied Engineering Science*. 2016. Vol. 14, № 4. P. 481–491.
2. Asim N., Sopian K., Ahmadi S., Saeedfar K., Alghoul M.A., Saadatian O., Zaidi S.H. A Review on the Role of Materials Science in Solar Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, № 8. P. 5834–5847.
3. Thirunavukkarasu G. S., Seyedmahmoudian M., Chandran J., Stojcevski A., Subramanian M., Marnadu R. et al. Optimization of Mono-Crystalline Silicon Solar Cell Devices Using PC1D Simulation. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 16. Art. 4986.
4. Belarbi M., Benyoucef A., Benyoucef B. Study Of The Equivalent Circuit Of A Dye-Sensitized Solar Cells. *Advances in Energy International Journal (AEIJ)*. 2014. Vol. 1, № 2.
5. Premkumar M., Chandrasekaran K., Sowmya R. Mathematical modelling of solar photovoltaic cell/panel/array based on the physical parameters from the manufacturer's datasheet. *International Journal of Renewable energy development*. 2020. Vol. 9(1). P. 7.
6. Kowsar A., Debnath S. C., Shafayet-Ul-Islam M., Hossain M. J., Hossain M., Chowdhury A. K.,... Farhad S. F. U. An overview of solar cell simulation tools. *Solar Energy Advances*. 2025. Vol. 5. P. 100077.
7. Dyadenchuk A. F., Oleksenko R. I. Modeling of photoconverter parameters based on CdS/porous-CdTe/CdTe heterostructure. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15(2). P. 65–69.
8. Bag A., Radhakrishnan R., Nekovei R., & Jeyakumar R. Effect of absorber layer, hole transport layer thicknesses, and its doping density on the performance of perovskite solar cells by device simulation. *Solar Energy*. 2020. Vol. 196. P. 177–182.
9. Jan S. T., Noman M. Influence of layer thickness, defect density, doping concentration, interface defects, work function, working temperature and reflecting coating on lead-free perovskite solar cell. *Solar Energy*. 2022. Vol. 237. P. 29–43.
10. Hashmi G., Akand A.R., Hoq M., & Rahman H. Study of the enhancement of the efficiency of the monocrystalline silicon solar cell by optimizing effective parameters using PC1D simulation. *Silicon*. 2018. Vol. 10(4). P. 1653–1660.
11. Richter A., Hermle M., & Glunz S. W. Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2013. Vol. 3(4). P. 1184–1191.
12. Branz H. M., Yost V. E., Ward S., Jones K. M., To B., Stradins P. Nanostructured black silicon and the optical absorption enhancement in thin-film solar cells. *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 94(23). P. 231121.
13. Holman Z. C., Descoeurdes A., Barraud L., Fernandez F. Z., Seif J. P., De Wolf S., Ballif C. Current losses at the front of silicon heterojunction solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2012. Vol. 2(1). P. 7–15.
14. Dyadenchuk A. Modeling of photovoltaic characteristics of a TiO<sub>2</sub>/porous-Si/Si-based heterojunction solar cell. *Nano Hybrids and Composites*. 2024. Vol. 43. P. 13–22.
15. 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 Systems (MEES)*. IEEE, October 2022. P. 1–4.
16. Kidalov V. V., Dyadenchuk A. F., Bacherikov Yu. Yu., Rogozin I. V., Kidalov V. V. ZnO growth on macroporous Si substrates by HF magnetron sputtering. *J. Nano-Electron. Phys.* 2020. Vol. 12, № 3. P. 03016.
17. Chala S., Sengouga N., Yakuphanoglu F., Rahmane S., Bdirina M., Karteri I. Extraction of ZnO thin film parameters for modeling a ZnO/Si solar cell. *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 871–880.
18. Kidalov V., Dyadenchuk A., Bacherikov Y., Zhuk A., Gorbaniuk T., Rogozin I., Kidalov V. Structural and optical properties of ZnO films obtained on mesoporous Si substrates by the method of HF magnetron sputtering. *Turkish Journal of Physics*. 2020. Vol. 44(1). P. 57–66.



19. 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.
20. Morales-Morales F., Benítez-Lara A., Hernández-Sebastián N., Ambriz-Vargas F., Jiménez-Vivanco M. R., López R., Morales-Sánchez A. Study of zinc oxide/porous silicon interface for optoelectronic devices. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2022. Vol. 148. P. 106810.
21. Sundarapura P., Zhang X.-M., Yogai R., Murakami K., Fave A., Ihara M. Nanostructure of Porous Si and Anodic SiO<sub>2</sub> Surface Passivation for Improved Efficiency Porous Si Solar Cells. *Nanomaterials*, 2021. Vol. 11(2). P. 459.
22. Dyadenchuk A. F., Oleksenko R. I. Simulation photoconverters of porous-Si/Si with different anti-reflective coatings. *International Journal of Mathematics and Physics*. 2023. Vol. 14(2). P. 89–94.

*Дата першого надходження статті до видання:* 03.02.2026

*Дата прийняття статті до друку після рецензування:* 28.02.2026

*Дата публікації (оприлюднення) статті:* 28.04.2026

*Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)*



**S. Nosan, A. Dyadenchuk**

*Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

## **INFLUENCE OF DOPING ENGINEERING AND SPATIAL STRUCTURE CONFIGURATION ON THE ENERGY EFFICIENCY OF ZnO/POROUS-Si/Si PHOTOCONVERTERS**

### *Summary*

This paper presents a comprehensive study of the influence of doping engineering and layer-thickness optimization on the energy conversion efficiency of ZnO/porous-Si/Si heterostructure-based photovoltaic devices. Using the PC1D simulation environment, the research examines how variations in the thickness of ZnO and porous silicon layers, as well as changes in the doping concentration of the ZnO film, affect photogeneration, recombination dynamics, and the resulting current–voltage characteristics. The modeling results demonstrate that the interplay between optical absorption, carrier transport, and recombination processes is highly sensitive to both geometric and doping parameters of the structure.

It was established that the optimal configuration – ZnO thickness of 10 μm, porous-Si thickness of 1 μm, and ZnO doping concentration of 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> – provides the highest simulated conversion efficiency of 22.6 %. Increasing the ZnO thickness beyond this range leads to reduced performance due to enhanced bulk recombination, while excessive doping results in a significant decrease in minority-carrier lifetime and overall device efficiency. The study highlights the importance of balancing optical and electrical properties when designing heterostructure-based solar cells, particularly those incorporating porous silicon as a functional buffer layer.

The obtained results contribute to a deeper understanding of the mechanisms governing the operation of ZnO/porous-Si/Si photoconverters and demonstrate the potential of structural and doping optimization for improving the performance of silicon-based photovoltaic technologies.

**Keywords:** heterostructure, doping, layer thickness, PC1D, photoconverter.