

УДК 621.383.51:621.315.592:004.942

Альона Дяденчук, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри вищої математики і фізики,
Сергій Носань, асистент кафедри електротехніки і
електромеханіки імені професора В.В.Овчарова,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛЕГУВАННЯ ТА ГЕОМЕТРІЇ ШАРІВ У ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОПЕРЕТВОРЕННЯ

Анотація. У роботі досліджено вплив концентрації легування та товщини шарів на ефективність фотоперетворювачів на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si. Моделювання виконано у середовищі PC1D та доповнено чисельними експериментами в Matlab, що дозволило оцінити поведінку фотогенерації, рекомбінаційних процесів та параметрів ВАХ за різних конфігурацій структури. Встановлено, що оптимальні значення товщини ZnO (10 мкм), porous-Si (1 мкм) та концентрації легування ZnO (10^{19} см⁻³) забезпечують максимальну ефективність 22,6%. Надмірне легування призводить до зростання рекомбінаційних втрат, що підтверджено моделями Matlab. Результати можуть бути використані для оптимізації конструкції високоефективних кремнієвих фотоперетворювачів.

Ключові слова: фотоперетворювач; легування; товщина шарів; рекомбінаційні процеси; моделювання PC1D; Matlab; ефективність сонячних елементів.

Abstract. The work investigates the influence of doping concentration and layer thickness on the efficiency of photoconverters based on the ZnO/porous-Si/Si heterostructure. The modeling was performed in the PC1D environment and supplemented with numerical experiments in Matlab, which allowed us to evaluate the behavior of photogeneration, recombination processes and I-V characteristics parameters for different configurations of the structure. It was found that the optimal values of the ZnO thickness (10 μ m), porous-Si (1 μ m) and ZnO doping concentration (10^{19} cm⁻³) provide the maximum efficiency of 22.6%. Excessive doping leads to an increase in recombination losses, which is confirmed by Matlab models. The results can be used to optimize the design of high-efficiency silicon photoconverters.

Keywords: photoconverter; doping; layer thickness; recombination processes; PC1D modeling; Matlab; solar cell efficiency.

Підвищення ефективності сонячних елементів залишається одним із ключових напрямів розвитку сучасної відновлюваної енергетики [1]. Одним із перспективних шляхів є оптимізація просторової структури та електрофізичних параметрів гетероструктур, зокрема на основі комбінації ZnO та поруватого кремнію. ZnO виступає прозорим провідним шаром і антивідбивним покриттям, тоді як porous-Si забезпечує покращену пасивацію поверхні та зменшення рекомбінаційних втрат [2].

Моделювання дозволяє досліджувати вплив параметрів структури без необхідності виготовлення фізичних зразків, що значно скорочує витрати та прискорює оптимізацію. Програмне забезпечення PC1D широко застосовується для аналізу сонячних елементів [3], тоді як Matlab дає змогу створювати додаткові чисельні моделі для виявлення закономірностей та оптимумів [4].

Сучасні дослідження демонструють, що ефективність кремнієвих сонячних елементів суттєво залежить від товщини активних шарів та концентрації легування [5, 6]. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягати ефективності понад 20% у монокристалічних структурах [7]. ZnO розглядається як перспективний прозорий електрод завдяки високій провідності та низькому поглинанню [2, 8]. Поруватий кремній покращує пасивацію поверхні та зменшує рекомбінаційні втрати [9]. Наші попередні роботи показали, що включення porous-Si у структуру фотоперетворювача суттєво впливає на параметри ВАХ та фотогенерацію [2, 10-11]. Однак питання оптимізації легування ZnO та геометрії шарів у гетероструктурі ZnO/porous-Si/Si досі залишаються недостатньо вивченими.

З урахуванням вищезазначеного, *метою дослідження* є визначення оптимальних значень товщини шарів та концентрації легування у гетероструктурі ZnO/porous-Si/Si, які забезпечують максимальну ефективність фотоперетворення, шляхом моделювання у PC1D та Matlab.

Дослідження було зосереджене на аналізі того, як зміна просторової конфігурації та рівня легування впливає на фотоелектричні характеристики

гетероструктури ZnO/porous-Si/Si. Вихідною моделлю слугувала тришарова структура, у якій ZnO виконує роль прозорого електрода та віконного шару, porous-Si – буферного шару з покращеною пасивацією поверхні, а монокристалічний Si – базового поглинального шару [12]. Для забезпечення коректності моделювання використовували фізичні параметри матеріалів, наведені у сучасних джерелах, а також експериментальні дані, отримані авторами у попередніх роботах.

На першому етапі було досліджено вплив товщини шарів на фотогенерацію та рекомбінаційні процеси. Моделювання у PC1D показало, що поведінка структури суттєво залежить від того, наскільки глибоко світло проникає в активні області та в яких зонах відбувається основна генерація носіїв. Виявлено, що збільшення товщини ZnO до певної межі сприяє покращенню поглинання у короткохвильовому діапазоні, однак подальше зростання товщини призводить до посилення об'ємної рекомбінації, що знижує корисний струм. Аналогічно, porous-Si демонструє оптимальну поведінку лише в межах невеликої товщини: надто тонкий шар не забезпечує достатньої пасивації, тоді як надто товстий – створює додаткові втрати через дефектність та збільшення шляху дифузії носіїв. На рис. 1, що ілюструє залежність ефективності від товщини ZnO та porous-Si, чітко простежується область максимуму, яка відповідає комбінації 10 мкм та 1 мкм відповідно. Поверхня має виражений пік, що підтверджує наявність оптимальної геометрії структури.

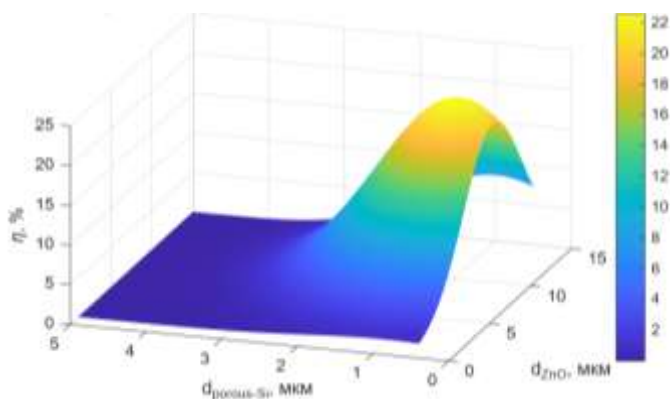


Рис. 1. Залежність умовної ефективності від товщини шарів ZnO та porous-Si

Другий етап дослідження був присвячений впливу концентрації легування ZnO. Оскільки цей шар одночасно виконує функції прозорого електрода та активного n-шару, його електрофізичні параметри визначають як провідність, так і рекомбінаційні властивості. Моделювання у PC1D показало монотонне зростання напруги та струму до концентрації близько 10^{19} см^{-3} , після чого ефективність починає знижуватися [12]. Для підтвердження цієї тенденції було побудовано додаткову модель у Matlab, яка дозволила відтворити характерну гаусоподібну залежність ефективності від логарифма концентрації легування. На рис. 2 видно, що максимум ефективності досягається саме в області 10^{19} см^{-3} , тоді як надмірне легування призводить до різкого зменшення часу життя носіїв меншості та збільшення ймовірності їх рекомбінації ще до досягнення гетеропереходу.

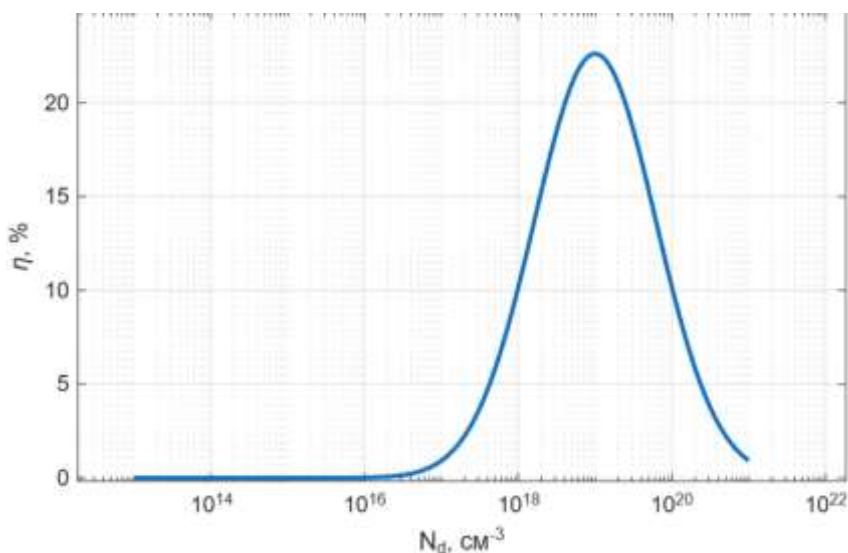


Рис. 2. Умовна залежність ефективності від концентрації легування ZnO

Отримані результати свідчать про те, що ефективність фотоперетворювача визначається тонким балансом між оптичними та електричними властивостями структури. З одного боку, збільшення товщини ZnO покращує поглинання та зменшує відбиття, а підвищення концентрації легування – зменшує серійний опір. З іншого боку, надмірне збільшення будь-якого з цих параметрів неминуче призводить до зростання рекомбінаційних втрат. Саме тому оптимальні значення

параметрів не є максимальними, а лежать у певному вузькому діапазоні, що підтверджено як моделями PC1D, так і чисельними експериментами у Matlab.

Таким чином, проведене дослідження дозволило не лише визначити оптимальні параметри гетероструктури ZnO/porous-Si/Si, але й продемонструвати механізми, які обмежують ефективність при відхиленні від цих значень. Візуалізація результатів у вигляді поверхонь та кривих залежностей, що будуть наведені у статті, наочно підтверджує отримані висновки та підкреслює важливість комплексного підходу до оптимізації фотоперетворювачів.

Список використаних джерел

1. Новицький С. В., Зур'ян О. В. Фотоелектричні перетворювачі. Види, ефективність. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. Т. 1 (88). С. 92-102.
2. Дяденчук А. Ф., Філіпович Є. В. Моделювання функціональних характеристик сонячних елементів на основі ZnO і TiO₂. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2022. Вип. 12, т. 1. С. 212-222. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-20>
3. Chuah L. S., Hassan A. M., Rais A. R. M. Numerical Optimization and Performance Analysis of Monocrystalline Silicon Solar Cells via PC1D Simulation. *Silicon*. 2026. P. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12633-025-03607-x>
4. Yousfi A., Saidani O., Bennia R., Saoud F. S., Saidi L., Bhattarai S., ... Sahoo G. S. Numerical simulation of high-efficiency double-absorber layer perovskite solar cells using SCAPS-1D and MATLAB PV models. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. 2025. V. 26(3). P. 366-379. <https://doi.org/10.1007/s42341-025-00606-y>
5. Bouderbala I. Y., Hamdi N. E. Effects of absorber layer thickness and doping density on the performance of perovskite solar cells: a simulation analysis using SCAPS-1D software. *Algerian Journal of Engineering and Technology*. 2023. V. 8(1). P. 131-137. <https://doi.org/10.57056/ajet.v8i1.101>
6. Das B., Aguilera I., Rau U., Kirchartz T. Effect of doping, photodoping, and bandgap variation on the performance of perovskite solar cells. *Advanced optical materials*. 2022. V. 10(13). P. 2101947. <https://doi.org/10.1002/adom.202101947>
7. 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. V. 10(4). P. 1653-1660. <https://doi.org/10.1007/s12633-017-9649-3>

8. 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. V. 139. P. 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.03.017>
9. Дяденчук А. Ф., Кідалов В. В. Гетероструктури n-ZnO: Al/porous-CdTe/p-CdTe в якості фотоелектричних перетворювачів. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2017. V. 15(3). P. 487-494.
10. Dyadenchuk A. F., Oleksenko R. I. Simulation photoconverters of porous-Si/Si with different anti-reflective coatings. *International Journal of Mathematics and Physics*. 2023. V. 14(2). P. 89-94. <https://doi.org/10.26577/ijmph.2023.v14.i2.010>
11. Dyadenchuk A. Modeling of photovoltaic characteristics of a TiO₂/porous-Si/Si-based heterojunction solar cell. *Nano Hybrids and Composites*. 2024. V. 43. P. 13-22. <https://doi.org/10.4028/p-0b3juI>
12. Носань С. В., Дяденчук А. Ф. Вплив інженерії легування та просторової конфігурації структури на енергетичну ефективність фотоперетворювачів ZnO/porous-Si/Si. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2026. № 1. С. 10-15. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-1>