

знаходження результуючого гармонічного коливання будь-якої природи. Змінюючи параметри моделювання (крок табулювання, значення частоти, амплітуди тощо), можна наочно спостерігати за зміною графіків коливань за зміни різних параметрів. Подібні задачі мають величезне коло застосувань та будуть надзвичайно корисними для майбутніх інженерів.

#### **Список використаних джерел:**

1. Родін Б. О., Топольницький Г. К. Розв'язування фізичних задач за допомогою MS Excel. *Сучасні інформаційні технології в освіті і науці* : 12 Всеукр. студ. наук. Інтернет-конф., 22-23 квітня 2021 р. : (зб. матеріалів). Умань : Візаві, 2021. С. 34-36.

2. Дяденчук А. Підвищення ефективності навчання за допомогою MS Excel при розв'язуванні фізичних задач. *Освіта і суспільство VI*. 2021. С. 240-244.

**Наукові керівники:** Дяденчук А. Ф., к.т.н., ст. викладач кафедри вищої математики і фізики, Кідалов В. В., д.ф.-м.н., професор кафедри вищої математики і фізики, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

## **МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ TiO<sub>2</sub>**

**Шквиря В.В., email [greejin2011@gmail.com](mailto:greejin2011@gmail.com)**

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

Останнім часом домінуючою тенденцією в освоєнні відновлюваних джерел енергії є застосування технології перетворення сонячної енергії в електричну. В фотоелектричних перетворювачах (ФЕП) сонячної енергії переважає використання кремнієвих пристроїв. Однак деградація кремнієвих матеріалів під дією світла обмежує стабільність пристрою, в той час як відносно висока вартість виробництва фотоелектричної електроенергії перешкоджає його ефективній конкуренції з викопною енергією. Тому підвищення коефіцієнта перетворення сонячної енергії в електричну, виявлення способів підвищення ККД, зниження вартості електроенергії є основними проблемами мікроелектроніки.

У конструкціях тонкоплівкових сонячних елементів (СЕ) знайшли широке застосування плівки оксидів металів: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ITO, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZnO, TiO<sub>2</sub> та ін. [1-2] Перелічені оксиди широко використовуються як віконний та контактний шари у різних типах тонкоплівкових сонячних батарей. Однак серед вищезазначених оксидів металів дослідження TiO<sub>2</sub> представляє особливий інтерес, що пов'язано з його стабільністю, хорошою електронною провідністю, високою хімічною стійкістю, широкою забороненою зоною (3,0-3,6 eV) [3]. Вельми перспективним є застосування діоксиду титану в кремнієвих сонячних елементах [4]. Хоча цей напрямок не є новим, принцип і реалізація його застосування в сучасних СЕ сильно розрізняються.

Глибше зрозуміти фізику функціонування напівпровідникових приладів дозволяє моделювання переносу заряду в структурах. Інструментом чисельного моделювання, що дозволяє моделювати пристрої з гомо- та гетеропереходами, є вільно розповсюджувана програма AFORS-HEТ [5]. Симулятор AFORS-HEТ широко використовується для дослідження сонячних елементів і для розв'язання одновимірних рівнянь Пуассона і двох рівнянь переносу заряду.

Метою дослідження є моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових гетеропереходів TiO<sub>2</sub>/Si за допомогою програми AFORS-HEТ 2.5.

Досліджувалися фотоелектричні перетворювачі на основі гетероструктури n-TiO<sub>2</sub>/p-Si (рис. 1). Зверху і знизу структури поверх шарів було сформовано омичні срібні контакти. Для числового моделювання робочих характеристик ФЕП необхідно задати вхідні параметри

матеріалів, наприклад, ширину забороненої зони матеріалів (1,12 еВ для Si та 2,26 еВ для  $\text{TiO}_2$ ), діелектричні сталі (11,9 і 10,0), рухливості електронів ( $1107$  і  $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) та дірок ( $424,6$  і  $25,0 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) тощо.

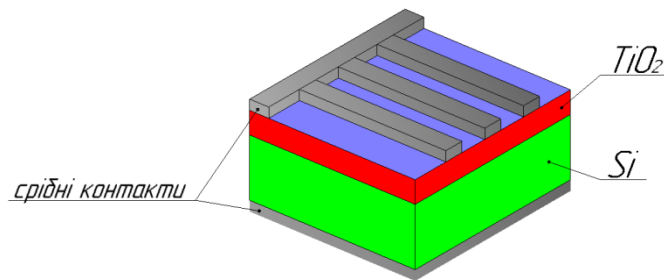


Рисунок 1 – Схематичне зображення модельованого фотоперетворювача

Структури були досліджені з використанням освітлення повітряною масою 1,5 (AM 1,5).

Нагрівання сонячних елементів в робочому режимі може значно погіршити їх робочі характеристики. У зв'язку з цим виникає необхідність дослідження впливу температури на вигляд ВАХ гетероструктури  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ . Під час моделювання температура змінювалася в інтервалі  $T=290\text{-}320 \text{ K}$  з кроком  $\Delta T=10 \text{ K}$ . Результати розрахунків ВАХ фотоперетворювачів наведено на рис. 2.

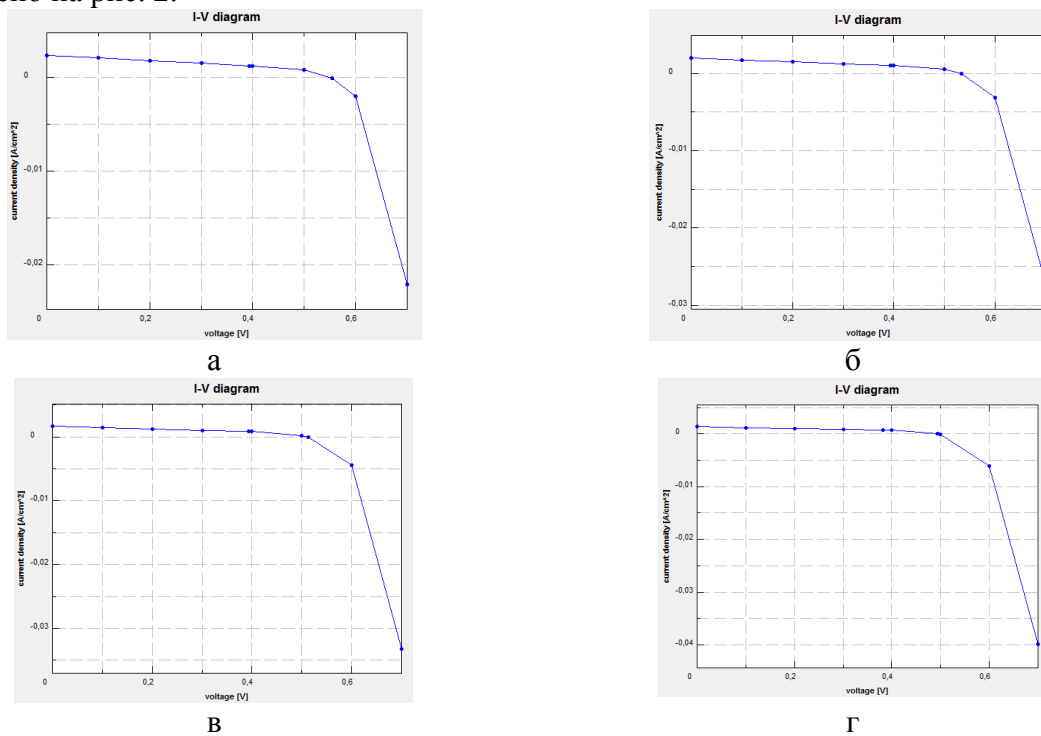


Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика побудована для гетероструктури  $n\text{-TiO}_2/p\text{-Si}/n\text{-Si}$  при температурі: а)  $T=290 \text{ K}$ ; б)  $T=300 \text{ K}$ ; в)  $T=310 \text{ K}$ ; г)  $T=320 \text{ K}$

Із результатів проведених досліджень видно, що при збільшенні температури експлуатації сонячного елемента відбувається збільшення значення струму короткого замикання  $J_{SC}$ , а значення напруги розімкненого ланцюга  $V_{OC}$  зменшується.

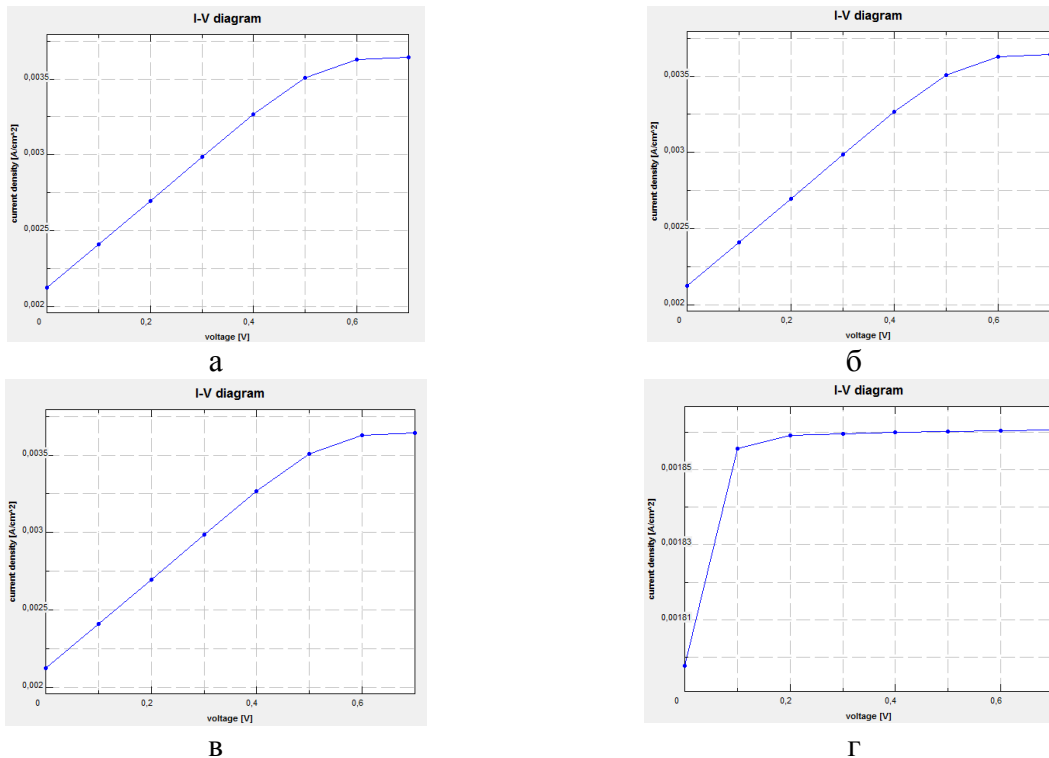


Рисунок 3 – Вольт-амперна характеристика побудована для гетероструктури n-TiO<sub>2</sub>/p-Si при товщині шару TiO<sub>2</sub>: а) d=5 мкм; б) d=10 мкм; в) d=15 мкм; г) d=20 мкм.

Товщина шару діоксиду титану в розглядуваному гетеропереході визначає кількість випромінювання, що надходить до поглинаючого шару ФЕП. Враховуючи це важливим питанням є дослідження її впливу на електричні властивості сонячного елемента.

Під час моделювання змінювалася лише товщина шару TiO<sub>2</sub>  $d=(5-20)$  мкм з кроком  $\Delta d=5$  мкм. Результати проведених розрахунків наведено на рис. 3.

За результатами моделювання встановлено, що у випадку використання гетеропереходу TiO<sub>2</sub>/Si при підвищенні товщини шару TiO<sub>2</sub> від 10 до 20 мкм спостерігається незначне зменшення значення струму короткого замикання  $J_{SC}$  від 2,12 до 1,79 мА/см<sup>2</sup>, а напруга холостого ходу  $V_{OC}$  залишається практично незмінною для товщини шару  $d=(5-15)$  мкм, але зазнає значних змін при  $d=20$  мкм, що найімовірніше пов'язано зі зміною характеристик гетеропереходу.

Таким чином, у роботі шляхом моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових гетеропереходів TiO<sub>2</sub>/Si за допомогою програми AFORS-HEТ 2.5 встановлено, що при збільшенні температури експлуатації сонячного елемента на основі гетероструктури TiO<sub>2</sub>/p-Si від 290 до 320 К відбувається збільшення значення струму короткого замикання  $J_{SC}$ , а значення напруги розімкненого ланцюга  $V_{OC}$  зменшується.

Встановлено, що при підвищенні товщини шару TiO<sub>2</sub> від 10 до 20 мкм сонячного елемента на основі гетероструктури TiO<sub>2</sub>/p-Si спостерігається незначне зменшення значення струму короткого замикання  $J_{SC}$  від 2,12 до 1,79 мА/см<sup>2</sup>, а напруга холостого ходу  $V_{OC}$  залишається практично незмінною для товщини шару  $d=(5-15)$  мкм, але зазнає значних змін при  $d=20$  мкм, що найімовірніше пов'язано зі зміною характеристик гетеропереходу.

#### Список використаних джерел:

1. 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. URL:

2. Dyadenchuk A. F., Kidalov V. V. Heterostructures CdS/porous-Si and CdS/porous-CdTe for the manufacture of photovoltaic cells. *Фізика і технологія тонких плівок і наносистем (МКФТТПН-XVI): матеріали XVI Міжнародної конференції (м. Івано-Франківськ, 15-20 травня 2017)*. Івано-Франківськ. 2017. С. 213.

3. Пячин С. А., Бурков А. А., Макаревич К. С., Зайцев А. В., Карпович Н. Ф., Ермаков М. А. Оптические характеристики частиц, полученных электроэрозионным диспергированием титана в перекиси водорода. *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86, №7. С. 87-93.

4. Zhao F., Yi Y., Lin J., Yi Z., Qin F., Zheng, Y., Wu P. The better photoelectric performance of thin-film TiO<sub>2</sub>/c-Si heterojunction solar cells based on surface plasmon resonance. *Results in Physics*, 2021. P. 104628.

5. Froitzheim A., Stangl R., Elstner L., Kriegel M., Fuhs W. AFORS-HET: a computer-program for the simulation of heterojunction solar cells to be distributed for public use. In *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of Vol. 1*, pp. 279-282.

**Науковий керівник:** Дяденчук А. Ф., к.т.н., ст. викладач кафедри вищої математики і фізики, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ З'ЄДНАННЯ ДВОХ БАЛОК ЗАСОБАМИ ПАКЕТУ SCILAB

Кучерков А.О., email [kucherkov.artem.1599@gmail.com](mailto:kucherkov.artem.1599@gmail.com)

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

Розв'язання сучасних задач моделювання просторових об'єктів чи динамічних процесів у складних структурах вимагає дослідження та створення все більш складних механіко-математичних моделей. Блочно-структуровані адаптивні прямокутні сітки широко використовуються під час реалізації методу скінченних різниць та скінченних елементів для розв'язку диференціальних рівнянь у частинних похідних.

Розглянемо задачу про з'єднання двох балок під прямим кутом, що у перерізі буде виглядати як з'єднання двох прямокутних трапецій ABCF та CDEF (рис. 1, а). Оскільки саме в місцях з'єднання конструкцій буде спостерігатися найбільша концентрація напружень, то необхідно дослідити значення функцій в околі лінії з'єднання CF – виконуємо згущення сітки окремо в кожній трапеції до лінії CF. Оскільки інтерес представляє дослідження сітки в околі лінії CF, то виконуємо зручне для подальших обчислень масштабування в межах квадратної області і будуємо початкову сітку, що має 21 вузол по кожній стороні трапеції (рис. 1, б).

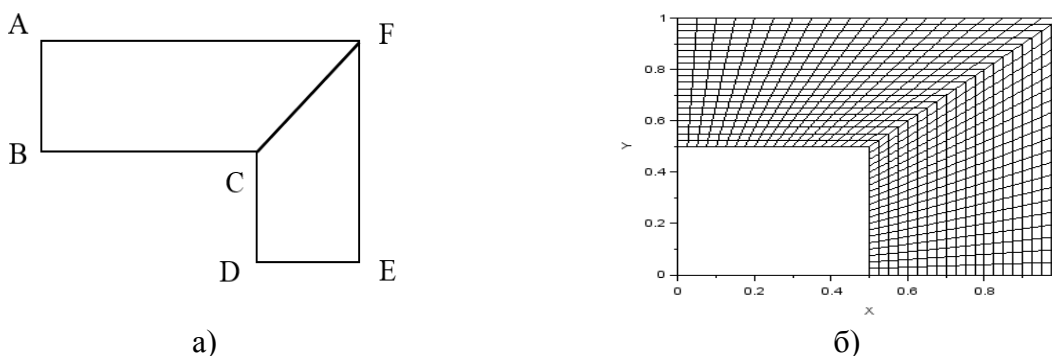


Рисунок 1 – З'єднання двох балок: а) переріз; б) початкова сітка кутового з'єднання

Згущення до лінії з'єднання CF виконується за допомогою контролюючих функцій рівняння Пуассона окремо по кожній трапеції. Для трапеції ABCF виконується згущення