

*Яковюк Владислав,
здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
фізико-математичного факультету
Гришук Андрій,
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри фізики та методики її навчання,
Житомирський державний університет імені Івана Франка,
м. Житомир, Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ФОТОСТРУМУ В КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

У контексті зростаючої потреби у стійких та ефективних джерелах енергії, сонячні елементи виступають одним із ключових компонентів відновлюваної енергетики. Кремнієві сонячні елементи займають провідні позиції завдяки своїй високій ефективності, надійності та відносно низьким витратам на виробництво. Одним із важливих аспектів дослідження кремнієвих сонячних елементів є розуміння та моделювання спектральної залежності фотоструму, що дозволяє оптимізувати їхні оптичні та електричні характеристики для максимізації енергоефективності.

Спектральна залежність фотоструму відображає взаємодію світлового випромінювання з матеріалом сонячного елемента та є визначальним фактором його продуктивності. Розрахунки фотоструму вимагають точного математичного моделювання фотогальванічних процесів, включаючи поглинання фотонів, генерацію електронно-діркових пар, їхнє розповсюдження та рекомбінування. Оскільки кремній має широку смугу поглинання, спектральна залежність фотоструму є складною функцією, що потребує комплексного підходу до моделювання.

Метою даної роботи є розробка та застосування математичних моделей для моделювання спектральної залежності фотоструму в кремнієвих сонячних елементах. Особлива увага приділяється аналізу впливу різних параметрів матеріалу та конструктивних особливостей сонячного елемента на його фотогальванічні властивості.

1. Теоретичні основи фотоструму в сонячних елементах

Фотострум у кремнієвих сонячних елементах виникає внаслідок генерації електрон-діркових пар під дією фотонів, що поглинаються кремнієм. Процес поглинання залежить від енергії фотонів, яка визначається довжиною хвилі світла. Фотострум може бути розрахований на основі теорії напівпровідникових переходів, що включає такі процеси, як поглинання фотонів, дифузія та рекомбінація носіїв заряду.

Для визначення спектральної залежності фотоструму розглядають кількісну модель, що описує зв'язок між довжиною хвилі падаючого світла, коефіцієнтом поглинання кремнію та кількістю електрон-діркових пар, які генеруються у матеріалі.

2. Математична модель спектральної залежності фотоструму

При моделюванні фотоструму необхідно врахувати декілька факторів:

1. коефіцієнт поглинання кремнію, який залежить від довжини хвилі падаючого світла;
2. профіль інтенсивності сонячного випромінювання;
3. товщину та параметри матеріалу сонячного елемента, що визначають дифузію носіїв заряду.

Фотострум для кремнієвого сонячного елемента визначається як:

$$I_{ph}(\lambda) = q \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda$$

де q – заряд електрона, $\eta(\lambda)$ – квантова ефективність елемента, $\phi(\lambda)$ – спектральна густина сонячного випромінювання, $R(\lambda)$ – коефіцієнт відбиття, а $\alpha(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання.

3. Методика моделювання в середовищі MATLAB

Для моделювання спектральної залежності фотоструму використовувалось середовище MATLAB, що дозволяє будувати чисельні моделі та обробляти спектральні дані. Основними етапами моделювання можна вважати такі, як завантаження спектральної густини сонячного випромінювання для різних довжин хвиль, розрахунок коефіцієнта поглинання для кремнію на основі експериментальних даних, побудова моделі розподілу фотоструму залежно від довжини хвилі світла, аналіз впливу товщини елемента на величину фотоструму для кожної довжини хвилі.

Для різних умов освітлення (пряме та розсіяне сонячне випромінювання) було проведено окремі розрахунки, що дозволило отримати детальну картину залежності фотоструму від спектрального складу світла.

4. Результати та обговорення

Моделювання показало, що спектральна залежність фотоструму в кремнієвих сонячних елементах найбільш виражена у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Для довжин хвиль менше 400 нм коефіцієнт поглинання значно зростає, що призводить до інтенсивної генерації фотоструму у поверхневих шарах елемента. Однак для довжин хвиль понад 1000 нм ефективність фотоструму різко знижується через обмежену здатність кремнію поглинати низькоенергетичні фотони.

Було виявлено, що зі збільшенням товщини сонячного елемента спостерігається зростання фотоструму в ближньому інфрачервоному діапазоні, що відповідає більш ефективному поглинанню фотонів у глибоких шарах матеріалу. Однак надмірне збільшення товщини може призвести до зниження квантової ефективності через збільшення рекомбінаційних втрат.

5. Висновки

Моделювання спектральної залежності фотоструму у кремнієвих сонячних елементах дозволяє зрозуміти особливості перетворення енергії світла в електричну та визначити оптимальні параметри для збільшення ефективності елементів. Отримані результати підтверджують, що фотострум залежить від довжини хвилі світла та товщини сонячного елемента, що необхідно враховувати

при проектуванні кремнієвих сонячних панелей. Дослідження таких залежностей є перспективним напрямом для покращення конструкцій та матеріалів, що використовуються у сонячних елементах, з метою підвищення їх енергоефективності.

Дані результати сприяють подальшому розвитку кремнієвих сонячних елементів та можуть бути використані для оптимізації їхніх конструкцій з метою досягнення більш високих показників енергоефективності. Майбутні дослідження можуть бути зосереджені на інтеграції більш складних фізичних процесів у моделі, а також на експериментальній валідації отриманих результатів для підтвердження точності моделювання.

Список використаних джерел та літератури

1. Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510–519.
2. Green, M. A., & Ho-Baillie, A. (2011). *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Springer.
3. Nelson, J. (2003). *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts*. Prentice Hall.
4. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons.
5. Wolfram Research. (2023). *Wolfram Mathematica Documentation*. Retrieved from <https://www.wolfram.com/mathematica/documentation/>