

ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Бобро А.А.

e-mail: andrii.bobro@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна

This paper examines the optical properties of materials used in solar cells and the methods for their measurement. Key parameters such as the refractive index, absorption coefficient, reflectivity, and emission spectra are analyzed for their impact on the efficiency of photovoltaic converters. The study explores the role of various semiconductor materials, including crystalline, nanocrystalline, and amorphous compounds, in optimizing solar cell performance. Special attention is given to modern approaches for enhancing light absorption and minimizing energy losses, which are crucial for improving the efficiency and cost-effectiveness of solar energy systems.

Метою роботи є дослідити оптичні властивості матеріалів для сонячних елементів, визначити їхній вплив на ефективність фотоелектричних перетворювачів та розглянути сучасні методи підвищення продуктивності сонячних батарей.

Ключову роль у визначенні ефективності фотоперетворювачів (ФЕП) відіграють їхні оптичні властивості, оскільки саме вони впливають на здатність матеріалу поглинати та перетворювати сонячне світло в електроенергію. Основні характеристики, що визначають продуктивність ФЕП, включають показник заломлення, коефіцієнт поглинання, відбивну здатність та спектр випромінювання. Показник заломлення (n) визначає, наскільки сильно світло змінює напрямок при проходженні через матеріал. Він розраховується:

$$n = \frac{c}{v},$$

де c — швидкість світла у вакуумі, v — швидкість світла в матеріалі. Вищий показник заломлення свідчить про те, що матеріал може ефективніше спрямовувати світловий потік у фотоперетворювач, зменшуючи втрати через відбиття.

Коефіцієнт поглинання визначає, яку частину падаючого світла матеріал поглинає на одиницю товщини. Високий коефіцієнт поглинання сприяє ефективному використанню сонячного спектра, що безпосередньо впливає на продуктивність ФЕП. Наприклад, матеріали з високим коефіцієнтом поглинання, такі як CdTe, дозволяють створювати тонкоплівкові сонячні елементи з високою ефективністю.

Відбивна здатність вказує, яка частина світлового потоку не поглинається,

а віддзеркалюється від поверхні ФЕП. Чим нижча відбивна здатність, тим більше світла потрапляє у внутрішні шари матеріалу для подальшого перетворення в електроенергію. Для зменшення втрат енергії застосовують антивідбивні покриття, які знижують відбивну здатність поверхні сонячних елементів.

Спектр випромінювання характеризує довжини хвиль світла, що ефективно поглинаються і перетворюються у електроенергію. Оптимальний вибір матеріалу для ФЕП передбачає максимальне перекриття сонячного спектра з його спектром поглинання. Наприклад, кремній ефективно поглинає видиме світло, тоді як перовськіти мають ширший діапазон поглинання, що підвищує їхню продуктивність.

Матеріали для фотоелектричних перетворювачів. Кристалічні сполуки мають впорядковану атомну структуру, що забезпечує високу стабільність та ефективність у фотоелектричних перетворювачах (ФЕП). Їх можна розділити на кілька основних груп: монокристалічні, полікристалічні, нанокристалічні, мікрокристалічні, аморфні, халькогеніди та органічні напівпровідники.

Монокристалічні матеріали. Монокристалічний кремній (Mono-Si) – один із найефективніших матеріалів для ФЕП. Завдяки впорядкованій кристалічній решітці він має низькі втрати заряду та високий коефіцієнт корисної дії (ККД 20–25%). Застосовується у високоякісних сонячних батареях для побутових, промислових та космічних застосувань.

Монокристалічні сполуки III-V групи (GaAs, InP, GaN) мають ще вищу ефективність завдяки широкому спектру поглинання та високій рухливості носіїв заряду. Галій-арсенід (GaAs) демонструє ККД до 30% і відзначається стійкістю до високих температур, що робить його ідеальним для космічних систем. Індій-фосфід (InP) застосовується у багатошарових ФЕП для підвищення продуктивності.

Монокристалічні халькогеніди (CdTe, CIGS) є альтернативою кремнієвим матеріалам. Кадмій телурид (CdTe) поглинає світло ефективніше, ніж кремній, що дозволяє зменшити товщину фотоелемента. CIGS (Cu(In,Ga)Se₂) має ККД 15–20% та високу стабільність у тонкоплівкових сонячних модулях.

Полікристалічні матеріали. Полікристалічний кремній (Poly-Si) дешевший, ніж монокристалічний, але менш ефективний через наявність меж зерен, що ускладнюють рух носіїв заряду. Його ККД становить 15–20%, і він широко застосовується у масовому виробництві сонячних батарей.

Нанокристалічні та мікрокристалічні сполуки. Нанокристалічний кремній (nc-Si) поєднує властивості кристалічного та аморфного кремнію, підвищуючи продуктивність гібридних ФЕП.

Квантові точки (CdTe, PbS) – інноваційні наноматеріали, що використовують квантові ефекти для покращення коефіцієнта поглинання та можливості налаштування спектральної чутливості. Мікрокристалічний

кремній ($\mu\text{-Si}$) застосовується у комбінованих ФЕП разом з аморфним кремнієм, що дозволяє підвищити стабільність та ефективність пристроїв. Аморфні матеріали. Аморфний кремній (a-Si) характеризується хаотичним розташуванням атомів, що дозволяє створювати гнучкі та тонкоплівкові сонячні батареї. Він має ККД 10–15%, але поступово витісняється більш ефективними матеріалами. Перовськіти (Perovskites) – новий клас матеріалів, що демонструє швидке зростання ККД (до 25%).

Халькогеніди та органічні матеріали. Халькогеніди (CdTe , CIGS) забезпечують високу ефективність у тонкоплівкових ФЕП. Органічні напівпровідники (полімери, карбонові нанотрубки) дозволяють виготовляти дешеві та гнучкі сонячні батареї, хоча їхній ККД поки що не перевищує 10–12%.

Висновки. За результатами проведеного дослідження встановлено, що оптичні властивості цих матеріалів відіграють ключову роль у визначенні загальної ефективності сонячних батарей. Аналіз таких параметрів, як показник заломлення, коефіцієнт поглинання, відбивна здатність і спектр випромінювання, підтвердив, що вибір матеріалу безпосередньо впливає на поглинання світла та ефективність перетворення енергії. Сучасні методи оптимізації, зокрема текстурування поверхні, антирефлексні покриття та інженерія зонної структури, є важливими для зменшення енергетичних втрат. Дослідження підкреслює необхідність подальшої розробки нових напівпровідникових структур і гібридних матеріалів для підвищення ефективності та економічної доцільності використання сонячної енергетики.

Список використаних джерел:

1. Refractive index | Definition & Equation URL: <https://surl.li/nrxupk> (date of access: 25.02.2025).
2. Absorption Coefficient URL: https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn_junctions/absorption-coefficient (date of access: 25.02.2025).
3. Reflectivity – an overview URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/reflectivity> (date of access: 25.02.2025).
4. Solar Radiation Spectrum URL: <https://sunwindsolar.com/blog/solar-radiation-spectrum/> (date of access: 25.02.2025).
5. Which Semiconductors Are Used in Solar Cells and Why? URL: <https://blog.feniceenergy.com/which-semiconductors-are-used-in-solar-cells-and-why/> (date of access: 25.02.2025).