

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПЕРОВСЬКІТНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто фізичні основи функціонування перовськітних сонячних елементів. Проаналізовано динаміку зростання їхнього коефіцієнта корисної дії порівняно з традиційними кремнієвими аналогами. Висвітлено ключові фізико-хімічні проблеми, що стримують комерціалізацію технології, зокрема процеси деградації активного шару, та охарактеризовано сучасні методи їх вирішення за допомогою композитної інженерії.

Ключові слова: перовськіт, сонячний елемент, фотоелектричний ефект, коефіцієнт корисної дії, відновлювальна енергетика, деградація, ширина забороненої зони.

Abstract

The physical principles of perovskite solar cells operation are considered. The dynamics of their efficiency growth compared to traditional silicon analogs are analyzed. The key physico-chemical problems hindering the commercialization of the technology, in particular, the active layer degradation processes, are highlighted, and modern methods of solving them using composite engineering are characterized.

Keywords: perovskite, solar cell, photoelectric effect, power conversion efficiency, renewable energy, degradation, band gap.

Вступ

В умовах глобального переходу до відновлювальних джерел енергії, фотовольтаїка відіграє ключову роль. Домінуюче становище на ринку сьогодні займають сонячні елементи на основі кристалічного кремнію (с-Si). Однак їхній коефіцієнт корисної дії (ККД) поступово наближається до теоретичної межі Шоклі-Квейссера (близько 29,4% для одноперехідних елементів), а процес очищення кремнію залишається енергоємним. У цьому контексті справжньою революцією у фізиці напівпровідників стала поява органо-неорганічних галогенідних перовськітів (наприклад, метиламоній свинцю йодид – $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$). Метою даної роботи є дослідження фізичних механізмів роботи перовськітних сонячних елементів (ПСЕ) та аналіз перспектив їх впровадження.

Результати дослідження

Фізика функціонування ПСЕ базується на унікальних властивостях кристалічної ґратки перовськіту, яка має загальну формулу ABX_3 (де А – органічний або неорганічний катіон, В – метал, переважно свинець або олово, Х – галоген). При поглинанні фотона з енергією, що перевищує ширину забороненої зони (для класичного перовськіту вона становить близько 1,5-1,6 еВ), електрон переходить з валентної зони у зону провідності.

На макроскопічному рівні активний шар ПСЕ виглядає як напівпрозора або темна тонка плівкова структура (рис. 1), яку можна наносити на різні поверхні навіть методом звичайного друку. Унікальні властивості цього матеріалу зумовлені його мікроструктурою — кубічною або тетрагональною кристалічною ґраткою (рис. 2). У центрі елементарної комірки розташовується органічний катіон (А), у вершинах куба — атоми металу (В), а центри граней займають іони галогену (Х), утворюючи октаедричні структури.



Рис. 1. Зовнішній вигляд тонкої плівки синтетичного перовськіту, що використовується у фотовольтаїці

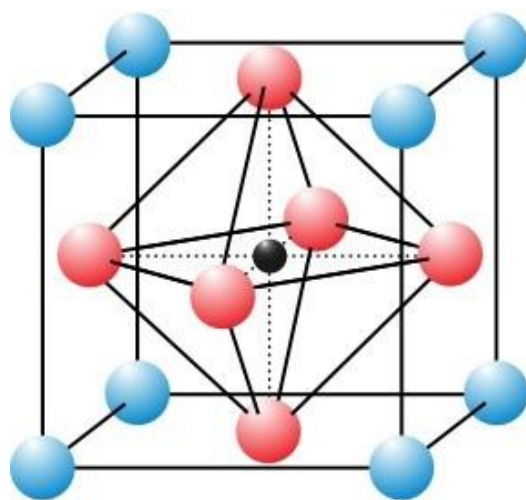


Рис. 2. Кристалічна ґратка перовськіту (структура ABX_3)

Особливістю перовськітів є надзвичайно мала енергія зв'язку екситону (електрон-діркової пари), яка становить усього кілька міліелектронвольт. Це означає, що при кімнатній температурі екситони спонтанно дисоціюють на вільні носії заряду під впливом теплової енергії решітки, без необхідності створення сильних внутрішніх електричних полів. Крім того, ці матеріали демонструють високу рухливість носіїв заряду та велику довжину їх дифузії (понад 1 мкм), що дозволяє ефективно збирати заряди на електродах до моменту їх рекомбінації.

Безпрецедентним в історії фізики напівпровідників є стрімке зростання ефективності ПСЕ. За порівняно короткий проміжок часу їхній ККД зріс від 3,8% у 2009 році до понад 26% у лабораторних умовах на сьогоднішній день.

Для наочної демонстрації цих темпів розвитку, на рис. 3 показано графік порівняння динаміки зростання коефіцієнта корисної дії традиційних кремнієвих (c-Si) та інноваційних перовськітних сонячних елементів [1].

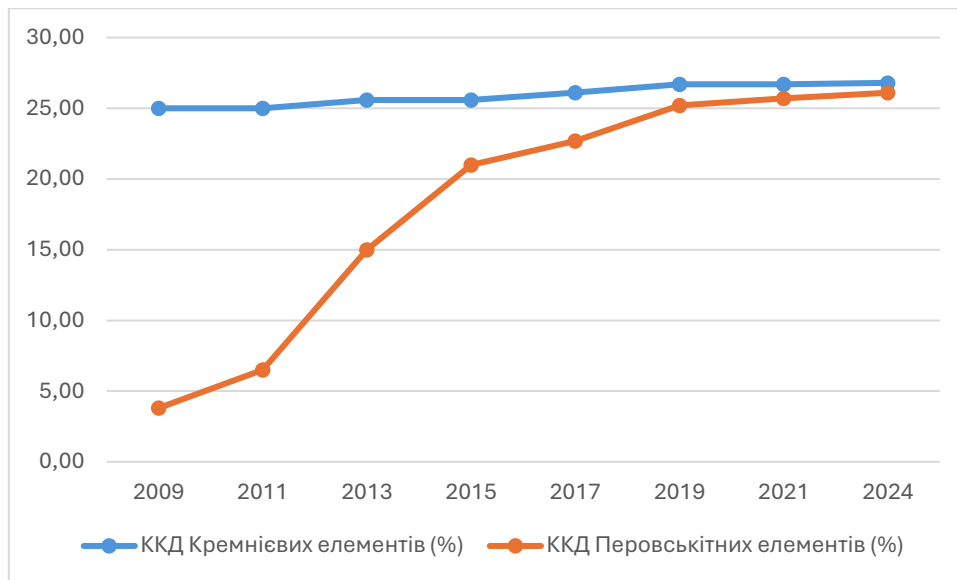


Рис. 3. Еволюція ККД перовськітних та кремнієвих сонячних елементів (2009–2024 рр.)

Незважаючи на феноменальні оптикоелектронні властивості, широке впровадження ПСЕ стикається з серйозним фізичним бар'єром – термодинамічною нестабільністю. Під дією вологи, кисню, ультрафіолетового випромінювання та підвищених температур кристалічна структура перовськіту деградує з утворенням неактивних фаз (зокрема, йодиду свинцю PbI_2). Вода діє як каталізатор, руйнуючи водневі зв'язки всередині органічного катіона.

Вирішення цієї проблеми лежить у площині фізики матеріалів. Сучасні дослідження фокусуються на композитній інженерії: частковій заміні метиламонію на формамідиній (FA) або цезій (Cs), що робить кристалічну ґратку більш жорсткою та стійкою до термічних флуктуацій. Ще одним перспективним напрямком є створення тандемних сонячних елементів «кремній-перовськіт». Оскільки перовськіт ефективно поглинає короткохвильову (синьо-зелену) частину сонячного спектра, а кремній – довгохвильову (червону та інфрачервону), їх об'єднання дозволяє подолати межу Шоклі-Квейссера для одного матеріалу та досягти теоретичного ККД понад 40%.

Для розуміння місця перовськітних технологій у сучасній енергетиці, доцільно порівняти їхні ключові фізико-технічні параметри з іншими поширеними типами фотоелектричних перетворювачів. Як видно з таблиці 1, ПСЕ поєднують у собі високу ефективність традиційних кремнієвих панелей із гнучкістю та дешевизною органічних аналогів.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика основних типів сонячних елементів

Тип технології	Робочий матеріал	Макс. ККД (%)	Енергоємність виробництва	Оціночна собівартість	Фізичні властивості (вага, гнучкість)	Головна фізична або технічна проблема
Традиційні	Кристалічний кремній (c-Si)	~26.8	Висока (потребус нагрівання до ~1400°C та складного очищення)	Середня (дешевшає лише за рахунок величезних масштабів виробництва)	Жорсткі, важкі	Наближення до межі ефективності, складність очищення
Інноваційні (ПСЕ)	Галогенідні перовськіти	~26.1	Низька (нанесення з розчинів при температурах до 150°C)	Низька (доступні та дешеві хімічні компоненти)	Гнучкі, надзвичайно легкі та тонкі	Деградація структури від вологи та нагрівання
Тонкоплівкові	Телурид кадмію (CdTe)	~22.1	Середня (вакуумне напылення)	Низька	Гнучкі, відносно легкі	Токсичність кадмію, рідкість елементів у природі
Органічні	Полімерні напівпровідники	~19.2	Дуже низька (можливість рулонного 3D-друку)	Дуже низька	Надгнучкі, прозорі	Низька рухливість носіїв заряду, швидке старіння

Висновки

Перовськітні сонячні елементи є найбільш перспективною альтернативою традиційній кремнієвій фотовольтаїці завдяки оптимальній ширині забороненої зони, високому коефіцієнту поглинання та простоті синтезу. Подальший розвиток технології вимагає вирішення проблеми стабільності матеріалу на мікроструктурному рівні. Найбільш імовірним сценарієм комерціалізації найближчим часом стане використання перовськітів не як самостійних панелей, а як верхнього поглинаючого шару у тандемних структурах з кремнієм, що дозволить значно підвищити глобальну ефективність сонячної генерації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Best Research-Cell Efficiency Chart / National Renewable Energy Laboratory (NREL). – 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
2. Snaith, H. J. Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells / H. J. Snaith // The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2013. – Vol. 4, No. 21. – P. 3623-3630.
3. Ying Z. Towards the 10-Year Milestone of Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells / Z. Ying, X. Yang, X. Wang, J. Ye // Advanced Materials. – 2024. – Vol. 36, No. 37. – P. 2311501.
4. Raza E. Review on two-terminal and four-terminal crystalline-silicon/perovskite tandem solar cells: progress, challenges, and future perspectives / E. Raza, Z. Ahmad // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 5820-5840.
5. Mahmood K. Perovskite Solar Cells: A Review of the Latest Advances in Materials, Fabrication Techniques, and Stability Enhancement Strategies / K. Mahmood, S. Sarwar, M. T. Mehran // Micromachines. – 2024. – Vol. 15, No. 2. – P. 192.
6. Meng L. Oxygen- and photo-induced decay of perovskite solar cells: Mechanisms and strategies / L. Meng, Y. You // Journal of Central South University. – 2024. – Vol. 31. – P. 345-360.
7. Luo C. Engineering buried interfaces for high-performance perovskite solar cells / C. Luo, Q. Zhao // Nature Photonics. – 2023. – Vol. 17. – P. 850-858.

Петров Петро Петрович – студент групи 2ПІ-25б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: petrov.p.petro@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** – доцент, кафедри загальної фізики, Вінниця, Вінницький національний технічний університет

Petrov Petro Petrovych – student of group 2SE-25b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: petrov.p.petro@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriiovych**, Associate Professor, Department of General Physics, Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University