

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-5>

УДК 621.311.243

В. М. Козін¹, канд. техн. наукО. Ю. Савойський¹, канд. техн. наук

Г. В. Барсукова, канд. техн. наук

Т. С. Вольвач¹, асистентО. В. Рясна¹, ст. викладачА. Ю. Марченко¹, здобувач освіти

ORCID: 0000-0001-9821-7774

ORCID: 0000-0002-6459-4931

ORCID: 0000-0002-4261-2182

ORCID: 0000-0002-8890-6901

ORCID: 0000-0001-6917-6950

ORCID: 0009-0003-2757-2826

¹ Сумський національний аграрний університетe-mail: oleksandr.savoiskyi@snau.edu.ua

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ГЕЛІОПАНЕЛЕЙ

Анотація. У статті виконано докладний огляд існуючих технологій виробництва складників сонячних панелей – фотоелементів, що входять до складу сонячних електростанцій. Визначено їхні переваги і недоліки та методи підвищення енергетичної ефективності, надійності відповідно до загальноприйнятої класифікації, яка включає три покоління – від класичних моно- та полікристалічних фотоелементів через тонкоплівкові технології на основі аморфного кремнію, CIGS і CdTe до сучасних III–V тандемних багатоперехідних фотоелементів, технологій на основі гетерокристалічного кремнію, перовскітних і квантово-точкових фотоелементів, а також проаналізовано сучасні тренди розвитку їх промислового виробництва у світі. Оглянуто питання екологічності технологій і стабільності роботи сонячних елементів. Акцентовано увагу на поступовому зростанні ролі тонкоплівкових технологій та розробленні гнучких фотоелементів, що все частіше використовуються для виробництва електроенергії на поверхнях довільної форми, повторюючи її.

Ключові слова: енергоефективність, електротехнологія, сонячний елемент, сонячна панель, проєктування фотовольтаїчних систем, екологічність.

Постановка проблеми. Виникнувши більше півстоліття тому з метою забезпечення електроенергією об'єктів космонавтики, зараз сонячні панелі можна часто зустріти навіть на дахах, вікнах і стінах звичайних житлових будинків або квартир. Такому розвитку сприяла низка чинників: здешевлення собівартості технології виробництва, тривалий термін служби сонячних панелей завдяки досить високій стабільності властивостей їхніх матеріалів та надійність експлуатації у цілому, їх екологічність, висока енергетична ефективність, що постійно підвищується, простота монтажу та можливість підбору найбільш естетичного виконання для заданих умов залежно від вибраної технології, а також деяких інших чинників. Усе це стало можливим завдяки невинному розвитку технологій виробництва геліопанелей та фотоелементів, що входять до їхнього складу. Починаючи від звичайного легування кремнію та створення одинарного р-п-переходу, технології, яка й досі не втратила своєї актуальності та комерційної привабливості і є навіть зараз наймасовішою у виробництві, до використання багатоперехідних, тандемних систем на основі, наприклад рідкоземельних елементів індію, галію, кадмію, селену або телуру, або на основі однієї з найсучасніших перовскітних, квантово-точкових чи органічних технологій фотоелементів, про їх сучасний стан, проблеми та методи їх вирішення, а також перспективи розвитку цих електротехнологій ітиметься у даній статті.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є комплексний аналіз сучасного стану технологій виробництва фотоелементів для сонячних панелей, визначення їхніх переваг і недоліків, а також перспективних напрямів розвитку з акцентом на підвищення енергоефек-

тивності, гнучкості, екологічності та промислової придатності інноваційних фотоелектричних технологій.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

– провести класифікацію та порівняльний аналіз існуючих технологій виробництва сонячних елементів з урахуванням їхніх ефективності, технологічних особливостей та впливу на довкілля;

– визначити основні напрями розвитку новітніх фотоелектричних технологій (тандемні, перовскітні, органічні, квантово-точкові тощо) та оцінити їх перспективність для подальшого впровадження у промислове виробництво.

Основна частина. Технології геліопанелей, які складаються із сонячних елементів, традиційно поділяють на три покоління. На рис. 1 [1] можна побачити ретроспективний огляд різних технологій сонячних елементів та відповідні їх максимальні лабораторні ефективності. Синя і зелена лінії належать до першого і другого поколінь відповідно. Багатоперехідні фотоелементи та нові фотоелектричні перетворювачі, які відносять до третього покоління, зображено червоними, гірчичними та фіолетовими лініями.

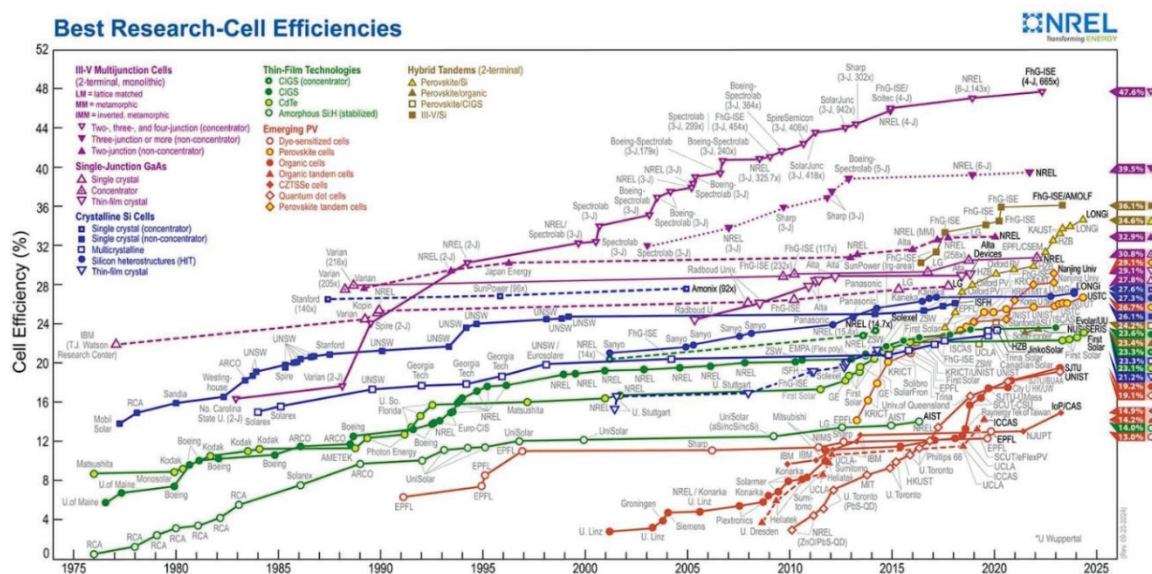


Рис. 1. Зведений графік ефективності перетворення енергії сонячних елементів

Фотоелементи першого покоління, що входять до складу фотоелектричної панелі, переважно створені на основі кремнієвих пластин. Це моно- і полікристалічні кремнієві фотоелементи. Вони, як правило, демонструють ефективність близько 15–25% та нині домінують на ринку. Значному поширенню кремнієвих сонячних панелей сприяють як досить гарно досліджене теоретичне підґрунтя технології, так і розвинута промислово-технологічна база, порівняно проста технологія легування, а також ефективна технологія нарізання його на шари необхідної товщини.

Переваги технологій першого покоління фотоелементів, що виникли майже 50 років тому, полягають в їхній високій продуктивності, тривалій стабільності, а також у наявності значних запасів сировини для їх виробництва. Однак вони не гнучкі, оскільки використовують кремній, що належить до матеріалів із непрямую забороненою зоною, що впливає на зменшення ефективності поглинання світла та створює необхідність збільшення товщини шару матеріалу, що підвищує ймовірність рекомбінації заряджених частинок і, як наслідок, спричиняє зменшення ефективності. Сучасні підходи для боротьби із цим недоліком полягають у викорис-



танні ретельної обробки (текстурування, пасивування) поверхонь шарів, що впливає на зростання вартості технології. Теоретична максимальна ефективність кремнієвих фотоелементів з однією забороненою зоною становить 33,16% [2], однак лабораторна досягає 27,3% [3] та має потенціал до покращення.

Геліопанелі другого покоління історично виникли і розвиваються паралельно першому. Їх виготовляють із таких матеріалів, як аморфний кремній, CIGS і CdTe, де типова ефективність становить 10–15%. Фотоелементи другого покоління визначаються як тонкоплівкові, оскільки вони використовують матеріали з прямою забороненою зоною. Вони можуть бути набагато тоншими та гнучкими. Однак, оскільки виробництво сонячних елементів другого покоління все ще використовує вакуумні процеси і високотемпературне оброблення, то для них характерне значне споживання енергії під час їх виробництва. Окрім того, вони часто містять дефіцитні елементи, наприклад кадмій, індій або телур, що є обмежувальним чинником із позицій їхньої вартості та можливої поширеності.

Третє покоління геліопанелей, яке належить до новітніх технологій, – складні комбіновані системи, утворені декількома простими фотоелектричними технологіями. До них можна віднести, наприклад, органічні фотоелементи, полімерні фотоелементи, які є їхньою підкатегорією, елементи Гратцеля, перовскітні, квантово-точкові фотоелементи. Це дорогі високоефективні та, як правило, експериментальні тандемні багатоперехідні сонячні елементи на основі напівпровідникових матеріалів III–V груп, переважно на основі арсеніду галію (GaAs), які є світовими рекордсменами з продуктивності. Застосування багатоперехідних технологій вимагає використання у таких системах концентраторів сонячної енергії, що значно ускладнює конструкцію.

Органічні сонячні елементи – це тип фотоелектричних елементів, які використовують органічні шари. До них належать полімерні сонячні елементи (підгрупа органічних сонячних елементів), а також інший основний тип органічних сонячних елементів – малі молекулярні сонячні елементи. Порівняно з пристроями на основі кремнію, органічні фотоелементи легкі, недорогі у виробництві, гнучкі, налаштовуються на молекулярному рівні, мають порівняно високу світлопропускну здатність, що досягає 80%, а також чинять менш негативний вплив на довкілля. Цим фотоелементам не вистачає як стабільності, так і ефективності, однак можна спостерігати постійний прогрес в обох напрямках. Наприклад, науковці з КНР досягли покращення лабораторної ефективності до 19,9% [4]. Передусім це реалізується за рахунок раціоналізації структури донорно-акцепторного переходу та молекулярного складу органічної електронної речовини фотоелементу.

Із 2009 р. почала офіційний розвиток модифікована версія тандемних, або багатошарових, органічних фотоелементів. Незважаючи на порівняно інтенсивне зростання лабораторної ефективності від близько 4% до 14,2% у 2020 р. згідно з [1], ця нова технологія досі не перевершила за ефективністю звичайні органічні фотоелементи, однак пошук шляхів її підвищення продовжується за рахунок збільшення кількості шарів та використання об'ємних гетероперехідних структур, які можна зробити достатньо товстими для ефективного поглинання фотонів. Для простих одношарових органічних і полімерних фотоелементів, основні сучасні дослідження складних багатошарових та об'ємних гетероперехідних структур [5] також спрямовані на вирішення проблеми стабільності, наприклад за рахунок створення подвійних структур об'ємного гетеропереходу або за рахунок впливу на морфологічну структуру під час проектування нових донорних і акцепторних матеріалів органічних сонячних елементів [6].

Сенсибілізовані барвником фотоелементи (елементи Гратцеля) були розроблені на основі напівпровідника, утвореного між фотосенсибілізованим анодом та електролітом. Сенсибілізований барвником сонячний елемент має кілька привабливих особливостей: він простий

у виготовленні за допомогою звичайних технологій рулонного друку, напівгнучкий і напівпрозорий, що дає змогу використовувати його у різних сферах, не властивих традиційним кремнієвим фотоелементам, а більшість матеріалів, окрім рутенію, що входить до складу органічного барвника, є недорогими [7]. Такі фотоелементи можуть бути успішно інтегровані, наприклад, у облицювальні матеріали будівельних конструкцій. Разом із тим вони на початку мали низьку ефективність, близько 4%, але були стабільними, мали низьку вартість та гарний естетичний вигляд [8]. У пристроях із великою активною площею дали змогу збільшити ефективність технології до 30% із забезпеченням тривалішої (понад 500 годин) експлуатаційної стабільності [9] за рахунок використання методу, що отримав назву «косенсибілізація». Він дав змогу розширити діапазон частот сонячного випромінювання, що можуть бути корисно поглинуті фотоелементом. До недоліків цих фотоелементів відносять низьку температурну стабільність, що вимагає використання у панелях охолоджувальних систем. Однак ця технологія лягла в основу подальшого розвитку іншої, більш ефективної перовскітної технології.

Перовскітні фотоелементи мають величезний потенціал із достатньо високою ефективністю у понад 25% на дуже малій площі елемента. Найчастіше це гібридні органічно-неорганічні матеріали на основі свинцевого або олов'яного галогеніду як активного шару для поглинання світла [10]. У сонячній енергетиці цю технологію почали використовувати трохи більше 15 років тому. За цей час ефективність перовскітних фотоелементів зросла від 3,9% до 26,7%. Разом із тим максимальна теоретична ефективність цих фотоелементів становить 44% [11] та продовжує покращуватися, у тому числі, наприклад, за рахунок створення тандемних перовскітно-органічних [12] або перовскітно-кремнієвих [13] сонячних елементів. Одна з останніх відомих технологій тандемних перовскітних фотоелементів, що стала відома у 2021 р., уже через три роки, за даними Університету Нанджунга (КНР), досягла ефективності 29,1% [14], що на 2,4% більше, ніж для традиційної перовскітної технології. Тандемні технології дають змогу ефективно поєднувати переваги різних типів сонячних елементів. Наприклад, поєднання технології кремнієвих фотоелементів із перовскітними дало змогу розширити спектр випромінювання, за якого створюються умови для виробництва електроенергії. У результаті було отримано ефективність 33,9% [13], що є світовим рекордом для даного типу фотоелементів. Обидві технології, перовскітна та органічна, для свого виробництва використовують порівняно низькі рівні температур, тому нова тандемна технологія сприяла зменшенню викидів парникових газів.

Перовскітні фотоелементи мають значний потенціал для досягнення значно більшої ефективності, оскільки у них можна налаштовувати ширину забороненої зони й оптимізувати їх під сонячний спектр. Залежно від умісту галогеніду ширина забороненої зони може змінюватися від 1,5 до 2,3 еВ. Однак для отримання найвищої ефективності сьогодні використовується та інтенсивно досліджується новий тип кристалу – FAPbI_3 , що належить до неорганічних перовскітів. Він дає змогу отримати ультростабільні та високоякісні фотогальванічні плівки [14]. Окрім того, ця технологія є більш технологічною, тобто вона має переваги виробництва органічних сонячних елементів, а отже, низькі виробничі витрати.

Поширеною проблемою, пов'язаною з перовскітними сонячними елементами, є вміст свинцю, тому елементи перовскітних поглиначів зараз намагаються виготовляти з матеріалів на основі олова, наприклад таких, як $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$. Вони мають нижчу ефективність, однак потенційно можуть забезпечити вирішення екологічної проблеми [15]. Стабільність – ще одна проблема, як і для органічних сонячних елементів, пов'язана з перовскітними фотоелементами. Нестабільність переважно пов'язана із впливом довкілля (високих температур, наявності вологості у повітрі і кисню), власним нагріванням під дією прикладеної напруги і фотовпливом (фотодеградація). Це питання було частково вирішене, наприклад, у дослідженні [16] завдяки



впровадженню технологій морфологічного структурування. Інший підхід до покращення стабільності досягається за рахунок використання спеціальних добавок, наприклад GBAC, що модулюють ріст та сприяють зменшенню дефектів перовскітної плівки [17].

Із 2010 р. продовжила стрімкий розвиток (хоча перші згадки [18] про неї датовані 1989 р.) тонкоплівкова технологія квантових точок. Її суть полягає у заміні використання об'ємних матеріалів, таких як кремній, SiGS або телурид кадмію з фіксованим значенням ширини забороненої зони, на квантові точки – напівпровідникові нанокристали, частинки розміром декілька нанометрів з оптичними та електричними властивостями, що відрізняються від властивостей звичайних більших частинок унаслідок квантово-механічних ефектів [19].

Сьогодні квантові точки є центральною темою нанотехнологій та матеріалознавства. Хоча дослідження [20] заявило про можливість отримання теоретичної ефективності 66% в умовах концентрованого сонячного світла, переважна більшість інших дослідників декларує значно менші реальні результати лабораторних вимірювань. Наприклад, відповідно до даних NREL протягом 2010–2023 рр. лабораторна ефективність цієї технології зросла з майже 4% до 19,1% (рис. 1), що менше, ніж для традиційних кремнієвих фотоелементів, однак технологія має низку переваг та активно досліджується. Найбільші значення ефективності (19,169%) були отримані у фотоелементах на основі квантових точок, утворених PbS та електронно-транспортним шаром ZnO, легованим Al [21]. Квантові фотоелементи можуть бути виготовлені за допомогою недорогих методів на основі колоїдних розчинів квантових точок і піддаються високошвидкісному друку. Однією з унікальних переваг квантово-точкових сонячних елементів є можливість налаштування смуги пропускання за рахунок зміни розмірів квантових точок. Ця унікальна властивість, що характерна також для перовскітних фотоелементів, не притаманна переважній більшості інших технологій. Наприклад, використання у структурі фотоелемента зелених люмінофорів тривалої дії дає змогу забезпечити роботу таких фотоелементів навіть за наднизької освітленості [22]. У роботі [23] показано ще одну перевагу: у квантових точкових фотоелементах виробляється більше електронно-діркових пар, аніж фотонів потрапляє на їхню поверхню, тобто квантова ефективність перевищила 100%. До переваг цих фотоелементів також відносять гарне співвідношення вихідної потужності до ваги, гнучкість. Серед недоліків технології виділяють токсичність більшості хімічних елементів, які утворюють квантові точки, що вимагає використання стабільних полімерних захисних оболонок [24], фотоелементи можуть деградувати під впливом вологи та ультрафіолетового випромінювання, а також можливе погіршення їхніх оптичних властивостей, складним залишається контроль за розміром квантових точок. Однак над усіма цими проблемами вчені продовжують активно працювати [25].

Понад два десятиліття від моменту відкриття напівпровідникових властивостей органічних полімерних фотоелементів вони постійно відставали як за продуктивністю і стабільністю, так і за ефективністю від багатьох інших, у тому числі класичних кремнієвих фотоелектричних технологій. Однак завдяки суттєвому прориву вчених із КНР у 2020 р., які спроектували та випробували органічний фотоелемент на основі нового багатокомпонентного підходу до морфології з використанням нових акцепторів для класичного будівельного блоку органічного фотоелементу на основі циклопентадітіофену, почалося стрибкоподібне зростання ефективності, яка нині вже зрівнялася і навіть дещо перевищила ефективність квантово-точкових фотоелементів (рис. 1). Ураховуючи простоту та дешевизну технології виготовлення фотоелементів, використання органічних розчинів на основі порівняно дешевих речовин, які легко синтезуються у необхідних кількостях, можливість установа на будь-які поверхні, а також поступове покращення стабільності, можливість застосування у тандемному виконанні, наприклад із перовскітною технологією, технологію органічних сонячних елементів можна віднести до однієї з перспективних.



За відносно високої ефективності, більшої дешевизни виробництва і можливості створення тонкоплівкових гнучких фотоелементів на основі перовскіту вони мають досить багато недоліків, які можуть суттєво обмежити їх використання: використання токсичних елементів для виробництва, малий ресурс основного компоненту. Однак сьогодні проводяться дослідження з покращення їх стабільності, зменшення впливу зовнішніх кліматичних чинників (температури і вологості) на ефективність і ресурс роботи. Особливо перспективними з позицій енергетичної ефективності видаються розробки тандемних і гібридних тандемних перовскітних фотоелементів. Такі технологічні рішення дають змогу внаслідок розширення ширини спектру ефективного поглинання сонячної енергії підвищити практично на третину загальну ефективність фотоелемента.

Технологія фотопанелей на основі квантових точок поки що не отримала широкого комерційного поширення, адже є однією з наймолодших і зараз знаходиться на стадії наукових досліджень. Однак її з упевненістю можна віднести до однієї з перспективних завдяки стрімкому та динамічному розвитку її ефективності. Завдяки інноваційному та запатентованому процесу безперервного потоку виробництва перовскітних квантових точок науковці намагаються суттєво знизити витрати на їх виготовлення. Інший напрям розвитку цієї технології полягає у здешевленні матеріалів, з яких виготовляють квантово-точкові фотоелементи. Замість дорогого рутенію поліпіридину намагаються використовувати нанокристали халькогенідів напівпровідникових металів, наприклад селенід або сульфід кадмію, селенід або сульфід свинцю. Однак, вирішуючи проблему вартості, дослідники стикаються з проблемою екологічності, тому пошуки оптимального матеріалу нині продовжуються.

Хоча тонкоплівкова технологія CIGS належить до другого покоління та розвивається досить повільно, однак нині вона отримала фінансування промислового виробництва у Швеції, що сприятиме подальшому поліпшенню її ефективності, особливо у напрямі використання гібридних тандемних технологій, наприклад перовскіт-CIGS.

Дані з фінансування промислового розвитку гетероперехідних HJT технологій свідчать, що уряди Нідерландів і КНР уже найближчим часом запланували будівництво заводів у свої країнах. Пріоритетним визнано виробництво перовскіт-кремнієвих тандемних модулів.

Незважаючи на можливість отримання рекордної для сучасних фотоелементів ефективності, використання багатоперехідних елементів поки що є вузькоспеціалізованим та експериментальним. Вони мають високу вартість унаслідок значних витрат на дослідження як самих фототехнологій, що утворюють їхню структуру, так і технологій поєднання переходів між собою. Значному підвищенню ефективності сприяє застосування концентрування сонячного випромінювання. Наприклад, використання концентратора для триперехідних сонячних елементів дає змогу покращити їх лабораторну ефективність більше ніж на 20% (рис. 1). Разом із тим необхідно розуміти, що такий підхід значно ускладнює енергогенеруючу систему, здорожчує її та зменшує загальну надійність. Дуже складним інженерним завданням є організація роботи сонячного концентратора на великій площі фотоелемента або на фотополі. Тому сьогодні такі передові технології, аналогічно до початкового етапу розвитку кремнієвих фотоелементів, отримують лише у лабораторіях, або, наприклад, у космічній галузі, де висока вартість обладнання може бути виправдана.

Висновки. Розглянувши сучасний стан переважної більшості новітніх та існуючих технологій геліопанелей, можна стверджувати, що подальший розвиток сонячної енергетики буде пов'язаний із продовженням досліджень у напрямках, що вже показали динамічне зростання протягом останнього часу: одно- та багатоперехідні сонячні елементи на основі GaAs, технологія з гетеропереходом, наприклад на основі кристалічного кремнію, тонкоплівкові технології CIGS і CdTe, перовскітні і квантово-точкові сонячні елементи, а також тандемні техноло-

гії, серед яких необхідно, передусім виділити перовскітно-кремнієву та технологію на основі напівпровідникових матеріалів III–V груп у поєднанні з кремнієм.

Необхідно зазначити, що перспективним може бути розроблення технологій сонячних концентраторів із метою підвищення ефективності багатоперехідних фотоелементів, технологій просвітлення шарів, періодичного очищення поверхні панелі, а також продовжитись пошук нових дешевих матеріалів для застосування у багатоперехідних сонячних елементах.

Загалом на підставі виконаного аналізу можна прогнозувати основні тенденції подальшого розвитку фотоелектричних технологій, які полягають у розширенні зон частотного спектру поглинутого сонячного випромінювання за рахунок впливу на ширину забороненої зони фотоелемента. При цьому повинні забезпечуватися доступність та поширеність використовуваних речовин, їх екологічність, екологічність технологій виробництва, а також тривалий термін експлуатації геліопанелі у широкому діапазоні температур довкілля без суттєвої втрати ефективності.

Список використаних джерел

1. National Renewable Energy Laboratory. Best Research-Cell efficiency chart. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення: 31.01.2025).
2. Rühle S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy*. 2016. Vol. 130. P. 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015>
3. LONGi Sets New World-Record for Silicon Solar Cell Efficiency, Launching 2nd Generation Ultra-Efficient BC-Based Module. Longi. URL: <https://www.longi.com/en/news/longi-hi-mo9-bc-world-record> (дата звернення: 31.01.2025)
4. Fu J., Yang Q., Huang P., Yu R., Wang Y., Hou J. Rational molecular and device design enables organic solar cells approaching 20% efficiency. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Article 1830. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46022-3>
5. Wang J., Wang Y., Bi P., Gao Y., Xu Y., Yang Y. Binary organic solar cells with 19.2 % efficiency enabled by solid additive. *Advanced Materials*. 2023. Vol. 35. Article 202301583. <https://doi.org/10.1002/adma.202301583>
6. Zhang R., Chen H., Wang T., Gao X., Liu H., Hu Z., Li Y., Chen Y., Liu F., Zhang J., Zhang M., Tang Z. Equally high efficiencies of organic solar cells processed from different solvents reveal key factors for morphology control. *Nature Energy*. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01678-5>
7. Dhonde M., Sahu K., Das M. Review – Recent advancements in dye-sensitized solar cells; from photoelectrode to counter electrode. *Journal of The Electrochemical Society*. 2022. Vol. 169. Article 066507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac741f>
8. Szindler M., Szindler M., Drygała A., Wiczorek S., Kępiński L., Laskowska M., Bratek L. Dye-sensitized solar cell for building-integrated photovoltaic (BIPV) applications. *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 13. Article 3743. <https://doi.org/10.3390/ma14133743>
9. Ren Y., Zhang D., Suo J., Zhang Y., Li J., Wang Q., Wang C., Yang L., Yang J., Liu W., Wu Z. Hydroxamic acid preadsorption raises efficiency of cosensitized solar cells. *Nature*. 2023. Vol. 613. P. 60–65. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05460-z>
10. Manser J.S., Christians J.A., Kamat P.V. Intriguing optoelectronic properties of metal halide perovskites. *Chemical Reviews*. 2017. Vol. 116. No. 21. P. 12956–13008. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00136>
11. Li X., Bi D., Yi C., Luo J., Zhang F., Wang H., Yang Y., Yan Y., Duan H., Gao Z., Wei Z., Li N., Ma T., Xiao Z., Zhan X., Wang Q., Dou L., Gao W. A vacuum flash-assisted solution process for high-efficiency large-area perovskite solar cells. *Science*. 2016. Vol. 353. No. 6294. P. 58–62. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8060>
12. Jiang X., Lang F., Li Y., Wei D., Zheng H., Hou J., Wu H., Zhao Y. Isomeric diammonium passivation for perovskite-organic tandem solar cells. *Nature*. 2024. Vol. 635. No. 8040. P. 860–866. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08160-y>
13. LONGi sets a new world record of 33.9 % for the efficiency of crystalline silicon-perovskite tandem solar cells. Longi. URL: <https://www.longi.com/en/news/new-world-record-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells> (дата звернення: 31.01.2025).

14. Sidhik S., Metcalf I., Li W., Kim T., Moon D., Choi S., Lee J., Jeon N., Lee S., Kim Y., Im S., Park N. Two-dimensional perovskite templates for durable, efficient formamidinium perovskite solar cells. *Science*. 2024. Vol. 384. No. 6701. P. 1227–1235. <https://doi.org/10.1126/science.abq6993>
15. Hao F., Stoumpos C.C., Cao D.H., Chang R.P.H., Kanatzidis M.G. Lead-free solid-state organic-inorganic halide perovskite solar cells. *Nature Photonics*. 2014. Vol. 8. No. 6. P. 489–494. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.82>
16. Lai H.M., Lu Z., Choi C.K.K., Kim T., Sun H., Ho H., Wang L., Ke M., Ren X. Direct room temperature synthesis of α -CsPbI₃ perovskite nanocrystals with high photoluminescence quantum yields: implications for lighting and photovoltaic applications. *ACS Applied Nano Materials*. 2022. Vol. 5. No. 9. P. 12366–12373. <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00732>
17. Li F., Deng X., Shi Z., Zhang Z., Zhang Q., Zhang X., Wei M., Wang H., Xu J., Wei Z., Luo D. Hydrogen-bond-bridged intermediate for perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability. *Nature Photonics*. 2023. Vol. 17. P. 478–484. <https://doi.org/10.1038/s41566-023-01180-6>
18. Barnham K.W.J., Duggan G. A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells. *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 67. No. 7. P. 3490–3493. <https://doi.org/10.1063/1.345339>
19. Shishodia S., Chouchene B., Gries T., Schneider R., Ohtani R., Yoshida T., Hane K., Chen S. Selected I-III-VI₂ semiconductors: synthesis, properties and applications in photovoltaic cells. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. No. 21. Article 2889. <https://doi.org/10.3390/nano13212889>
20. Nozik A.J. Quantum Dot Solar Cells: Preprint. NCPV program review meeting Lakewood, Colorado NREL/CP-590-31011. 14–17 October 2001. Retrieved 06.01.2025. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31011.pdf>
21. Danladi E., Kashif M., Ouladmane M., Zong J., Imran M., Chen L., Qin M., Iqbal S., Li Z., Zhang Z., Zhang J. Modeling and simulation of > 19% highly efficient PbS colloidal quantum dot solar cell: A step towards unleashing the prospect of quantum dot absorber. *Optik*. 2023. Vol. 291. Article 171325. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171325>
22. Yang J., Tang Q., Meng Q., Wei X., Zhao X., Zhang Y., Li H., Ren Y., Sun X. Photoelectric conversion beyond sunny days: all-weather carbon quantum dot solar cells. *Journal of Materials Chemistry*. 2017. Vol. 5. P. 2143–2150. <https://doi.org/10.1039/C6TA09261F>
23. Yan Y., Crisp R., Gu J., Zhang D., Yang L., Wang X., Li Q. Multiple exciton generation for photoelectrochemical hydrogen evolution reactions with quantum yields exceeding 100%. *Nature Energy*. 2017. Vol. 2. Article 17052. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.52>
24. Zhang Z., Wang W., Rao H., Li J., Zhang H., Cui Y., Sun J., Yang X., Liu Z., Xu B. Improving the efficiency of quantum dot-sensitized solar cells by increasing the QD loading amount. *Chemical Science*. 2024. Vol. 15. P. 5482–5495. <https://doi.org/10.1039/D3SC06911G>
25. Seo G., Han S., Lee D.G., Lee K., Park J., Han K., Lee H., Kim Y. Multifaceted anchoring ligands for uniform orientation and enhanced cubic-phase stability of perovskite quantum dots. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 496. Article 154312. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154312>

Стаття надійшла до редакції 23.04.2025

V. Kozin¹, O. Savoiskyi¹, H. Barsukova¹, T. Volvach¹, O. Ryasnaya¹, A. Marchenko¹

¹*Sumy National Agrarian University*

CURRENT STATE AND PERSPECTIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF SOLAR PANELS PRODUCTION TECHNOLOGIES

Summary

The article provides a detailed review of existing technologies for the production of solar panel components – photovoltaic cells that are part of solar power plants. Their advantages and disadvantages and methods of improving energy efficiency and reliability in accordance with the generally accepted classification, which includes three generations, are determined: from classical mono- and polycrystalline photovoltaic cells through thin-film



technologies based on amorphous silicon, CIGS and CdTe to modern tandem III-V multijunction photovoltaic cells, technologies based on heterocrystalline silicon, perovskite and quantum dot photovoltaic cells, and analyzed current trends in the development of their industrial production in the world. The paper retrospectively shows the current trend towards the gradual transition of photovoltaic technologies to complex tandem systems combined from several different technologies, as well as to multijunction systems in order to expand the area of maximum efficient operation of the photovoltaic panel in a wider range of the solar radiation spectrum. The issues of environmental friendliness of technologies and stability of solar cells are reviewed. Attention is focused on the gradual increase in the role of thin-film technologies and the development of flexible photovoltaic cells, which are increasingly used to generate electricity on surfaces of arbitrary shape, repeating it. The results of the analysis can be used to optimize the selection of photovoltaic cells in the design of new solar power plants, enhancing their efficiency and reliability. Furthermore, the findings may serve as a foundation for further research in the field of developing innovative materials and structures for solar panels, as well as for the formulation of national strategies for the advancement of renewable energy and environmentally sustainable technologies.

Keywords: energy efficiency, electrical technology, solar cell, solar panel, photovoltaic system design, environmental friendliness.