

Гарист А.В.

Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА МОДУЛІВ

Розвиток технологій сонячних панелей бере свій початок у середині XIX століття, коли було відкрито фотоелектричний ефект – ключовий принцип, на якому базуються сучасні сонячні батареї. Однак реальне впровадження цієї технології відбулося лише у XX столітті, коли з'явилися перші кремнієві сонячні елементи. На той час їхня ефективність становила лише близько 6%, проте саме ці розробки стали фундаментом для подальшого прогресу в галузі.

Сьогодні виробництво сонячних панелей невпинно вдосконалюється. Дослідники та інженери працюють над підвищенням ефективності цих пристроїв, прагнучи отримати більше енергії з кожного квадратного метра панелі. Окрім цього, ведуться активні розробки щодо поліпшення їхньої роботи за різних умов освітлення й температур, а також збільшення стійкості до впливу навколишнього середовища.

У статті розглянуто сучасні технології виготовлення сонячних панелей, інноваційні матеріали для сонячних панелей, методи покращення ефективності сонячних панелей, а також вплив автоматизації та роботизації для оптимізації виробничих процесів.

В статті визначено класичні методи виготовлення сонячних панелей, такі як використання монокристалічного та полікристалічного кремнію, а також інноваційні тонкоплівкові технології, які дозволяють значно знизити вартість виробництва. Описано нові підходи до виготовлення панелей з використанням органічних матеріалів та перовскітних елементів, що обіцяють значне підвищення ефективності та зниження вартості сонячної енергії.

Сучасні досягнення у виробництві сонячних панелей базуються на кількох ключових аспектах: впровадженні передових методів виготовлення, автоматизації та цифровізації виробничих процесів, а також розвитку екологічно чистих технологій та рециркуляції матеріалів.

Еволюція сонячних панелей – це безперервний пошук оптимального поєднання ефективності та доступності. Від перших експериментальних моделей до передових високотехнологічних рішень кожен новий етап розвитку наближає нас до більш екологічного та економічно вигідного використання сонячної енергії.

Ключові слова: монокристалічний кремній, полікристалічний кремній, кремнієва пластина, перовскіт, сонячна панель, акумулятор, нефуллереновий акцептор.

Постановка проблеми. Сонячні панелі забезпечують значні екологічні переваги та довгострокову економію коштів, але їх недоліки включають високі первісні ціни, переривчасте вироблення енергії залежно від погодних умов та потенційні екологічні проблеми під час виробництва та утилізації, а також необхідність достатнього місця для встановлення, що робить їх менш життєздатними у густонаселених районах або місцях з обмеженим простором.

Вирішення цих проблем за допомогою вдосконалення технологій та заходів регулювання матиме вирішальне значення для збільшення переваг сонячної енергії та одночасного обмеження її негативних наслідків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні розробки в галузі органічних

напівпровідників викликали значний ажіотаж у науковому співтоваристві та промисловості, зокрема завдяки досягненням у використанні нефуллеренових акцепторів (НФА). Ці матеріали стали справжнім проривом у виробництві органічних сонячних елементів, оскільки їх ефективність наблизилась до 20%, що значно скоротило розрив між органічними сонячними елементами і традиційними кремнієвими панелями.

В основі цієї нової технології лежать органічні напівпровідники, які мають здатність ефективно поглинати світло і перетворювати його в електрику. НФА, як клас нових матеріалів, показали значно кращі характеристики порівняно з іншими органічними напівпровідниками завдяки своїй хімічній структурі та електронним властивостям.

Одне з найцікавіших досягнень в дослідженні НФА зробила команда дослідників з Канзаського університету [1]. Вони з'ясували, що в певних умовах збуджені електрони в цих матеріалах можуть отримувати енергію не тільки з сонячного світла, а й з навколишнього середовища. Це означає, що НФА здатні зберігати й використовувати енергію, замість того, щоб її втрачати, що відкриває нові горизонти для підвищення ефективності органічних сонячних елементів. Це явище є результатом специфічних квантових ефектів, які відбуваються в цих матеріалах, і дослідники планують вивчити ці механізми детальніше.

Ці відкриття можуть кардинально змінити підхід до виготовлення сонячних панелей, що базуються на органічних матеріалах. Вони не тільки наближають органічні сонячні елементи до конкурентоспроможності з кремнієвими панелями, але й пропонують нові шляхи для оптимізації та зниження вартості виробництва сонячної енергії.

Завдяки таким досягненням органічні сонячні елементи можуть стати більш доступними і широко використовуватися у майбутньому, що відкриває великі перспективи для відновлюваних джерел енергії.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз нових технологій виготовлення сонячних панелей, які зможуть забезпечити суттєве підвищення ефективності та зниження витрат на виробництво сонячної енергії. Зокрема, завдання полягає у вивченні інноваційних методів виробництва, таких як використання нових матеріалів (перовскітні сонячні елементи, нефуллеренові акцептори, органічні напівпровідники) та вдосконалення технологій обробки поверхні, що дозволяють зменшити енергетичні втрати та покращити поглинання сонячного світла.

Крім того, важливо звернути увагу на розвиток автоматизованих і роботизованих систем, які здатні оптимізувати виробничі процеси і зменшити витрати на виробництво панелей, а також на методи підвищення екологічної безпеки при виготовленні сонячних панелей і зниження впливу на навколишнє середовище в процесі їх утилізації.

Таким чином, основним завданням цієї роботи є аналіз і оцінка новітніх технологічних рішень у галузі виготовлення сонячних панелей, що дозволяють значно підвищити їх ефективність, знизити витрати на виробництво та зробити сонячну енергію більш доступною для широкого використання в умовах сучасного світу.

Виклад основного матеріалу. Спершу сонячні панелі виготовляли з монокристалічного кремнію, який забезпечував високу ефективність перетворення сонячної енергії, проте його виробництво було дорогим через складність вирощування великих кристалів. З метою зниження витрат розробили технологію полікристалічного кремнію, що дозволило використовувати менші та дешевші кристали. Це стало значним проривом, оскільки зробило сонячні панелі більш доступними для широкого застосування.

Подальшим кроком у розвитку стали тонкоплівкові сонячні панелі, що створюються шляхом нанесення декількох шарів фотоактивного матеріалу на підкладку. Вони не лише мають нижчу собівартість у порівнянні з традиційними кремнієвими панелями, а й є гнучкішими, що розширює можливості їх використання. Для виготовлення таких панелей застосовують матеріали на основі кадмій-телуриду (CdTe), мідь-індій-галій-селеніду (CIGS) та аморфного кремнію. Це дозволяє інтегрувати їх у різноманітні конструкції, зокрема будівлі та транспортні засоби.

Сучасні дослідження у сфері сонячної енергетики спрямовані на розробку нових матеріалів і технологій, здатних підвищити ефективність та здешевити виробництво. Одним із найперспективніших напрямів є перовскітні сонячні елементи, які демонструють високу продуктивність при значно нижчих виробничих витратах у порівнянні з кремнієвими аналогами.

Сучасна сонячна енергетика активно розвивається, застосовуючи різні матеріали та технології для створення фотоелектричних елементів. Основні зусилля спрямовані на підвищення ефективності, зниження витрат і розширення сфер застосування сонячних панелей. Розглянемо основні технології, які використовуються при виробництві сонячних панелей.

Кремнієва технологія: монокристалічні та полікристалічні панелі

Монокристалічний кремній. Цей матеріал залишається основним у виробництві сонячних панелей завдяки високій ефективності перетворення світла – до 22–24% у комерційних моделях. Виготовлення таких панелей передбачає вирощування кремнієвих кристалів, їх нарізку на тонкі пластини та нанесення фотоелектричного шару. Завдяки високій чистоті матеріалу вони мають кращу провідність, проте їх виробництво є дорогим, що впливає на кінцеву вартість продукції.

Полікристалічний кремній. Це більш бюджетна альтернатива монокристалічним

панелям. В процесі виробництва кремній розплавляють і охолоджують, формуючи безліч дрібних кристалів, що знижує витрати. Полікристалічні панелі мають ефективність у межах 15–17%, відрізняються характерним синім відтінком і менш рівномірною текстурою.

Тонкоплівкові сонячні панелі

Кадмій-телурид (CdTe) та мідь-індій-галій-селенід (CIGS). Ці технології використовують надтонкі шари фотоелектричних матеріалів, нанесені на підкладку, що робить панелі легкими та гнучкими. Вони мають нижчу ефективність у порівнянні з кремнієвими аналогами (10–13% для CdTe і до 15–22% для CIGS), але їх виробництво є значно дешевшим, а можливість інтеграції в різні конструкції відкриває нові можливості застосування.

Аморфний кремній. Ще одна тонкоплівкова технологія, яка демонструє нижчу ефективність (6–8%), але добре працює в умовах слабкого освітлення. Завдяки простоті виробництва такі панелі часто використовуються в малопотужних пристроях та портативних системах.

Перовскітні сонячні елементи

Перовскітні фотоелементи – це інноваційна технологія, що пропонує високу ефективність за значно нижчих витрат виробництва. Завдяки унікальній кристалічній структурі перовскіти ефективно поглинають світло, а лабораторні дослідження вже демонструють ефективність понад 25%. Це ставить їх у один ряд із найкращими кремнієвими панелями, відкриваючи перспективи масового впровадження нових, більш доступних джерел сонячної енергії.

Органічні фотоелектричні елементи

Органічні сонячні елементи базуються на вуглецевмісних сполуках, які можуть наноситися на підкладку методом друку або іншими мало-витратними технологіями. Їхні основні переваги – гнучкість, легкість і можливість створення прозорих панелей. Водночас ефективність таких елементів поки що залишається нижчою, ніж у традиційних неорганічних матеріалів, досягаючи близько 10–12%.

Гнучкі та прозорі сонячні панелі

Один із найперспективніших напрямів розвитку – створення гнучких і прозорих сонячних панелей, які можуть бути інтегровані у вікна, фасади будівель чи навіть текстиль. Такі технології відкривають нові можливості для використання сонячної енергії, роблячи її доступною майже скрізь. Хоча вони ще перебувають на ранніх етапах комерційного впровадження, їхній

потенціал для широкого застосування є надзвичайно великим.

Кожен із цих напрямів сприяє подальшому розвитку сонячної енергетики, дозволяючи знайти баланс між ефективністю, вартістю та зручністю застосування. Постійні дослідження та технологічні прориви сприяють здешевленню сонячної енергії та розширенню її використання у всьому світі.

Ефективність сонячних панелей залежить від того, як добре вони поглинають світло та перетворюють його на електроенергію. Для досягнення високих показників у цій сфері розроблено ряд технологічних удосконалень:

Легування напівпровідникових матеріалів

Легування є одним із ключових процесів у створенні сонячних елементів. Введення домішок у кремній або інші напівпровідникові матеріали змінює їхні електрофізичні властивості, покращуючи ефективність збору електронів і тим самим збільшуючи вироблення енергії.

Текстурування поверхні для зменшення відбивання світла

Однією з основних проблем сонячних панелей є втрати світла через віддзеркалення від їхньої поверхні. Для мінімізації цих втрат застосовують методи мікроскопічного текстурування, які створюють спеціальні структури на поверхні кремнієвих пластин. Завдяки такому підходу відбите світло не губиться, а повторно спрямовується в матеріал, що збільшує його поглинання і, відповідно, підвищує ефективність перетворення енергії.

Пасивація задньої сторони кремнієвих пластин

Ще одним способом підвищення ефективності є пасивація задньої сторони кремнієвих елементів. Ця технологія зменшує рекомбінацію електронів і дірок, які могли б втрачатися у вигляді тепла, що дозволяє зберігати більше енергії та підвищувати продуктивність сонячних панелей.

Сучасні виробничі лінії сонячних панелей все більше залежать від автоматизації та застосування роботизованих технологій. Це дозволяє не лише підвищити швидкість і точність виробництва, а й мінімізувати людський фактор, що знижує кількість браку та покращує якість кінцевого продукту.

Автоматичне нарізування кремнієвих пластин – забезпечує рівномірність товщини і високу точність, що дозволяє ефективніше використовувати вихідний матеріал.

Нанесення провідних паст – автоматизовані методи забезпечують рівномірний розподіл електропровідних контактів, що сприяє більш ефективному збору електричного струму.

Лазерне зварювання та складання панелей – підвищує точність процесів та забезпечує надійність з'єднань між елементами панелі.

Автоматизація також дозволяє знизити собівартість виробництва, що робить сонячні панелі більш доступними для широкого застосування.

Окрім підвищення ефективності та автоматизації, важливим напрямом розвитку сонячної енергетики є зменшення негативного впливу на довкілля. Це досягається за рахунок використання екологічно безпечних матеріалів, розробки технологій рециркуляції та утилізації відпрацьованих сонячних панелей.

Дослідники працюють над зменшенням використання токсичних компонентів у виробництві сонячних панелей. Зокрема, в перовскітних сонячних елементах ведуться активні пошуки альтернатив свинцю, що дозволить зробити ці технології більш безпечними для довкілля.

Оскільки термін служби більшості сонячних панелей становить від 25 до 30 років, питання їхньої утилізації стає дедалі актуальнішим. Для вирішення цієї проблеми розробляються методи рециркуляції кремнію, скла, алюмінію та інших цінних компонентів панелей, що дозволяє значно скоротити потребу у видобутку нових ресурсів та зменшити кількість відходів.

Основні напрямки утилізації включають:

- вилучення кремнієвих пластин та їх повторне використання у виробництві нових панелей;
- переробку металевих компонентів (алюмінієві рамки, мідні дроти тощо);
- використання спеціальних методів термічної та хімічної обробки для безпечного розділення матеріалів.

Завдяки впровадженню програм рециркуляції сонячна енергетика стає більш екологічно стійкою, а повторне використання матеріалів дозволяє зменшити виробничі витрати та оптимізувати ресурсне забезпечення галузі.

Розглянемо потенційні проблеми у розвитку та використанні сонячної енергетики.

Обмежена ефективність перетворення сонячної енергії

Сучасні кремнієві сонячні панелі мають середню ефективність перетворення сонячного

світла в електроенергію в межах 15–22%. Це означає, що значна частина поглинутої енергії втрачається у вигляді тепла або відбивається від поверхні панелей. Хоча дослідження у сфері перовскітів та багатошарових структур дозволяють досягти ефективності понад 40%, такі технології ще не є масово доступними через високу вартість виробництва.

Ще однією проблемою є деградація сонячних панелей з часом. Внаслідок впливу ультрафіолетового випромінювання, перепадів температур і механічних навантажень ефективність панелей поступово знижується. Стандартний термін служби фотоелектричних модулів становить 25–30 років, після чого їхня продуктивність значно падає.

Проблема накопичення енергії

Оскільки сонячні панелі генерують електроенергію лише у світлу пору доби, а її кількість залежить від погодних умов, виникає потреба в ефективних системах зберігання енергії.

На сьогодні найбільш поширеними рішеннями є літій-іонні акумулятори, які використовуються як у приватних домашніх установках, так і у великих енергетичних системах. Проте вони мають ряд обмежень:

- висока вартість виробництва та обмежений ресурс циклів заряду-розряду;
- дефіцит сировини для їх виготовлення, зокрема літію та кобальту, що може обмежувати їх доступність у майбутньому;
- екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією старих батарей.

Альтернативними рішеннями є використання гідроакумуляуючих станцій, водневих технологій та натрій-іонних акумуляторів, проте ці рішення поки що перебувають у стадії розвитку та не можуть конкурувати з традиційними батареями за ефективністю та економічністю.

Потреба в розвитку інфраструктури

Для ефективного використання сонячної енергії потрібні значні інвестиції в модернізацію енергосистеми. Основні виклики включають:

- розширення мереж передачі електроенергії для інтеграції розподілених сонячних станцій;
- впровадження «розумних» мереж (smart grids), які зможуть ефективно балансувати виробництво і споживання електроенергії;
- збільшення пропускної здатності існуючих електромереж, щоб уникнути перевантажень у періоди пікового виробництва.

Високі початкові витрати

Незважаючи на зниження вартості сонячних панелей упродовж останніх десятиліть, їх встановлення все ще вимагає значних початкових інвестицій.

Основні витрати включають:

- закупівлю та монтаж обладнання (панелі, інвертори, системи кріплення);
- витрати на акумуляторні системи (якщо необхідне накопичення енергії);
- витрати на обслуговування та страхування.

У регіонах, де немає урядових субсидій або програм підтримки, ці витрати можуть стати серйозною перешкодою для масового впровадження сонячної енергетики.

Використання токсичних матеріалів у виробництві

Деякі типи сонячних панелей, зокрема тонкоплівкові, містять токсичні речовини, такі як кадмій і свинець. Вони можуть спричинити забруднення ґрунтів і водних ресурсів у разі неправильної утилізації.

Розв'язанням цієї проблеми є розробка нових, екологічно безпечних матеріалів. Наприклад, перовскітні сонячні елементи без свинцю вже активно досліджуються, хоча вони ще не досягли достатньої стабільності для комерційного використання.

Проблема утилізації відпрацьованих сонячних панелей

Оскільки сонячна енергетика стрімко розвивається, вже у найближчі десятиліття очікується значне збільшення кількості відпрацьованих панелей, які потрібно буде переробляти. На сьогодні лише 10–20% матеріалів з панелей підлягають переробці, тоді як решта часто потрапляє на сміттєзвалища.

Висновки. Сучасні досягнення в галузі сонячної енергетики відображають значний прогрес, досягнутий завдяки інноваціям у матеріалах, виробничих технологіях та методах інтеграції. Ці інновації не тільки підвищують ефективність та знижують вартість сонячних панелей, але й відкривають нові можливості для їх застосування, сприяючи поширенню відновлюваної енергії та розвитку.

В останні роки ми стали свідками значних інновацій, таких як розробка перовскітні сонячних елементів, які обіцяють високу ефективність за низької вартості виробництва. Тонкоплівкові та органічні фотоелектричні технології пропонують гнучкість та нові можливості для інтеграції сонячних панелей у повсякденне життя, включаючи будівництво, транспорт та одяг. Автоматизація та роботизація виробничих процесів сприяють зниженню витрат та збільшенню масштабів виробництва, роблячи сонячну енергію ще більш доступною.

Перспективи розвитку технологій сонячних панелей видаються безмежними. У найближчому майбутньому ми можемо очікувати подальшого підвищення ефективності сонячних панелей, зниження їхньої вартості та розширення областей застосування.

Інтеграція сонячної енергетики з іншими формами відновлюваної енергії та технологіями зберігання енергії сприятиме розвитку надійних та стійких енергосистем, здатних забезпечити потреби суспільства без шкоди для навколишнього середовища. Впровадження інтелектуальних мереж і адаптивних систем управління дозволить більш ефективно використовувати сонячну енергію, адаптуючись до умов і потреб споживачів.

Список літератури:

1. Albert Fong, “Project Development in the Solar Industry”, Taylor & Francis, 2012. 250 p.
2. “Silicon days over? Organic solar panel turns 20% of sunlight into electricity”, 2024. URL: <https://interestingengineering.com/energy/organic-solar-panel-could-replace-silicon> (дата звернення: 02.04.2025).
3. Rabindra Kumar Satpathy, Venkateswarlu Pamuru, “Solar PV Power: Design, Manufacturing and Applications from Sand to Systems”, Academic Press, 2020. 520 p.
4. Ahmed Riyaz, Atif Iqbal, Hasmat Malik, Kouzou Abdellah, Sertac Bayhan, “Renewable Power for Sustainable Growth. Proceedings of International Conference on Renewal Power (ICRP 2020)”, Springer Nature Singapore, 2020. 805 p.
5. Ahmed Riyaz, Atif Iqbal, Hasmat Malik, Kouzou Abdellah, Sertac Bayhan, “Renewable Power for Sustainable Growth. Proceedings of International Conference on Renewal Power (ICRP 2022)”, Springer Nature Singapore, 2022. 805 p.
6. Jerzy Leszczynski, Juganta K. Roy, Supratik Kar, “Development of Solar Cells. Theory and Experiment”, Springer International Publishing, 2021. 235 p.

Haryst A.V. NEW TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING SOLAR PANELS AND MODULES

The development of solar panel technology dates back to the mid-19th century, when the photovoltaic effect was discovered – the key principle on which modern solar cells are based. However, the real implementation of this technology took place only in the 20th century, when the first silicon solar cells appeared. At that time, their efficiency was only about 6%, but these developments became the foundation for further progress in the industry.

Today, the production of solar panels is constantly being improved. Researchers and engineers are working to increase the efficiency of these devices, striving to get more energy from each square meter of the panel. In addition, active developments are underway to improve their operation under different lighting and temperature conditions, as well as increase resistance to environmental influences.

The article reviews modern technologies for manufacturing solar panels, innovative materials for solar panels, methods for improving the efficiency of solar panels, as well as the impact of automation and robotics on optimizing production processes.

The article identifies classical methods for manufacturing solar panels, such as the use of monocrystalline and polycrystalline silicon, as well as innovative thin-film technologies that allow for a significant reduction in production costs. New approaches to manufacturing panels using organic materials and perovskite elements are described, which promise a significant increase in efficiency and a reduction in the cost of solar energy.

Modern achievements in the production of solar panels are based on several key aspects: the introduction of advanced manufacturing methods, automation and digitalization of production processes, as well as the development of environmentally friendly technologies and recycling of materials.

The evolution of solar panels is a continuous search for the optimal combination of efficiency and affordability. From the first experimental models to advanced high-tech solutions, each new stage of development brings us closer to a more environmentally friendly and economically beneficial use of solar energy.

Key words: *monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, silicon wafer, perovskite, solar panel, battery, non-fullerene acceptor.*