

С. В. НОВИЦЬКИЙ

аспірант

Інститут відновлюваної енергетики  
Національної академії наук України  
ORCID: 0009-0005-5647-6635

О. В. ЗУР'ЯН

кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник відділу геотермальної енергетики  
Інститут відновлюваної енергетики  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-2391-1611

## ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ. ВИДИ, ЕФЕКТИВНІСТЬ

У статті зроблено аналітичний огляд фотоелектричних перетворювачів, що належать до різних поколінь та технологічних груп, оцінка їх переваг та недоліків, особливостей виробництва, поточних показників ефективності та перспектив розвитку, технологій підвищення їх ефективності. Визначено сучасний стан технологій фотоелектричних перетворювачів та які виклики і можливості постають перед дослідниками і виробниками. Представлено аналіз ефективності фотоелектричних модулів як основних компонентів фотовольтаїки. Систематизовані основні переваги і недоліки фотоелектричних елементів різних типів. Визначено найбільш інноваційні технології, до складу яких відносяться двосторонні фотоелектричні елементи, прозорі фотоелектричні елементи, гнучкі фотоелектричні елементи, системи концентрування випромінювання, технології вдосконалення зняття струму. Виконано патентний пошук по спеціалізованій базі даних "Винаходи (корисні моделі) в Україні" по ключовим словам, що стосуються запиту «сонячні перетворювачі», та зроблено висновок, що 24 відсотки патентів по даному напрямку, зареєстрованих в Україні стосуються процесу виробництва фотоелектричних елементів та модулів, 48 відсотків рішень присвячені конструкції і компонуванню фотоелектричних модулів і систем, 28 відсотків – матеріалам і архітектурі фотоелектричних елементів. Встановлено, що технології фотоелектричних елементів і матеріали, що застосовуються для їх виробництва, постійно удосконалюються. Зусилля виробників та дослідників направлені на пошук нових підходів щодо збільшення ефективності сонячних панелей, підвищення обсягу виробленої енергії з одиниці площі, зниження її собівартості, створення оптимальних можливостей роботи при різних рівнях освітленості та температурних показників, розширення сфер можливого застосування фотоелектричних систем, а також підвищення стійкості до впливу чинників навколишнього середовища.

**Ключові слова:** фотоелектрика, фотовольтаїка, сонячні елементи, ефективність перетворення енергії.

S. V. NOVYTSKYI

Postgraduate Student

Institute of Renewable Energy  
National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0009-0005-5647-6635

O. V. ZURIAN

Candidate of Engineering Sciences,

Senior Research at the Department of Geothermal Energy  
Institute of Renewable Energy  
National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-2391-1611

## PHOTOELECTRIC CONVERTERS. TYPES, EFFICIENCY

The article analyzes the types of photovoltaic cells belonging to different generations and technological groups, evaluates their advantages and disadvantages, production features, current efficiency indicators and development prospects, technologies for increasing their efficiency. The current state of the technologies of photoelectric converters and the challenges and opportunities facing researchers and manufacturers are determined. An analysis of the efficiency of photovoltaic systems as the main components of photovoltaics is presented. The main advantages and disadvantages of photovoltaic cells of various types are systematized. The most innovative technologies have been determined, which include double-sided photovoltaic elements, transparent photovoltaic elements, flexible photovoltaic elements, systems for concentrating radiation, and technologies for improving current removal. A patent search was carried out on the specialized database "Inventions (useful models) in Ukraine"

using keywords related to the request "solar converters", and it was concluded that 24 percent of patents in this direction, registered in Ukraine, relate to the production process of photovoltaic cells and modules, 48 percent of decisions are devoted to the design and composition of photovoltaic modules and systems, 28 percent to the materials and architecture of photovoltaic elements. It has been established that the technologies of photovoltaic cells and the materials used for their production are constantly being improved. The efforts of manufacturers and researchers are aimed at finding new approaches to increasing the efficiency of solar panels, increasing the amount of energy produced per unit area, reducing its cost, creating optimal work opportunities at different levels of illumination and temperature indicators, expanding the scope of possible application of photovoltaic systems, as well as increasing sustainability to the influence of environmental factors.

**Key words:** photovoltaics, photovoltaics, solar cells, power conversion efficiency.

### Постановка проблеми

Глобальні кліматичні зміни, що відбуваються в сучасному світі внаслідок збільшення викидів вуглекислого газу, є критичним викликом для людства і потребують негайних дій для запобігання їх негативним наслідкам – збільшенню кількості стихійних лих, дефіциту прісної води, підвищенню рівня певних груп захворювань, вимушеної міграції. Стратегією розвитку енергетичної сфери більшості країн світу, в тому числі і України, передбачено зменшення рівня викидів і досягнення в подальшому вуглецевої нейтральності. Критичним для нашої Держави в сучасних реаліях є і питання досягнення енергетичної незалежності. Максимізація використання джерел відновлюваної енергії стало актуальною необхідністю часу, оскільки сприяє вирішенню багатьох екологічних, економічних, і соціальних проблем.

Згідно з прогнозами експертів фірми IBM, фотоелектрика відноситься до десятки технологій, що будуть здійснювати найбільш суттєвий вплив на розвиток цивілізації у XXI ст. Серед її переваг слід відзначити: широку географічну доступність, безшумність, широку область застосування, сталість і великий обсяг, що доступний до використання наявними технічними засобами. Водночас використання сонячної енергії сучасними технічними засобами пов'язане з певними недоліками: мінливістю інтенсивності сонячного опромінення в різні пори року, час доби, погодні умови; малою щільністю потужності; застосуванням дорогих і рідкісних компонентів для виробництва фотоперетворювачів; високою вартістю акумулювання електроенергії. Незважаючи на бурхливий розвиток сонячної енергетики, собівартість виробництва електроенергії на сонячних електростанціях залишається однією з найвищих серед альтернативних способів генерації. Зважаючи на це, для масового впровадження сонячної енергетики критично важливими є технологічні рішення, здатні знизити вартість сонячної енергії, зробивши її дешевшою, ніж енергія, що генерується класичними методами, розширити сфери застосування фотоелектричних приладів. Важливим є також мінімізація впливу на навколишнє середовище шляхом зменшення викидів шкідливих речовин, споживання електроенергії та дефіцитних матеріалів в процесі виробництва, що підштовхує вчених до подальших досліджень та вдосконалення матеріалів, архітектури фотоелектричних елементів та модулів, технологій їх виробництва.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В науковій літературі значна увага приділена огляду технологій перетворення сонячної енергії та проблемам підвищення їх ефективності. В роботах [1; 2; 3; 4] авторами виконано аналіз історичних передумов розвитку фотовольтаїки у XX столітті. Постійно є актуальними та знаходяться в полі зору дослідників питання підвищення ефективності сонячних перетворювачів [6; 7; 8; 9]. Техніко-економічні питання використання фотоелектричних перетворювачів різних типів висвітлені в роботах [10; 11; 12; 13]. Зростання попиту в останні роки на застосування ФЕС в приватному секторі та промисловості обумовлено зменшенням їх вартості та збільшенням енергоефективності за рахунок впровадження інноваційних розробок, викладених в роботах [14; 15; 16]. Перспективними є дослідження, що стосуються еко-дизайну ФЕС [17; 21] та використанню напівпрозорих сонячних елементів [18; 19; 20]. Враховуючи існуючий широкий спектр технологій фотоелектричного перетворення, актуальними залишаються дослідження, які дозволять отримати цілісну картину стану розвитку сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів та їх ефективності.

### Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є систематизація та аналіз видів фотоелектричних елементів, що належать до різних поколінь та технологічних груп, оцінка їх переваг та недоліків, особливостей виробництва, поточних показників ефективності та перспектив розвитку, технологій підвищення їх ефективності, визначення актуальних проблем для подальших досліджень.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Історію розвитку технологій розпочато у 1839 році відкриттям фотоелектричного ефекту французьким фізиком Едмондом Беккерелем. З того часу інноваційні ідеї, наполегливість дослідників та прийняті ними ризики призвели до прориву в галузі фотоелектричних перетворювачів, таким чином створивши можливість їх промислового використання в якості автономних джерел енергії космічних апаратів, а згодом і в якості відновлюваних джерел енергії для широкомасштабного наземного використання. Виявлення

у 1873 р. вченим Уіллоубі Смітом фотопровідності селену, спостереження фотогальванічного ефекту професором Вільямом Адамсом та його студентом Річардом Деєм у 1876 році стали основою конструкції першого фотоелектричного перетворювача на основі селену, який був створений Чарльзом Фріттцем у 1883 р. Ефективність перетворення сонячної енергії в електричну цим пристроєм складала менше 1%. У 1904 р. Альберт Ейнштейн перший пояснив фізичні процеси, які обумовлюють перетворення сонячної енергії в електричну, а в 1941 р. Раселл Охл запатентував перший фотоелектричний перетворювач на основі кремнію. Низька ефективність фотоелектричних перетворювачів не дозволяла розглядати їх в якості засобів для виробництва електроенергії у великих масштабах. На початку 50-х років XX ст. в Белл лабораторії (США) розпочалися дослідження щодо можливих застосувань кремнію в електроніці. Завдяки роботам Чапіна, Фуллера і Пірсона були отримані зразки фотоелектричних перетворювачів з ефективністю близько 6%. 17 березня 1958 р. був запущений перший супутник Vanguard I, для системи живлення якого були використані фотоелектричні перетворювачі, що продемонстрували безперервну роботу протягом 8 років. З того часу почалося промислове виробництво фотоелектричних перетворювачів для космічного застосування. У 1960 р. ефективність перетворювачів була збільшена до 14%, фотоелектричні пристрої почали розглядатися в якості автономних джерел енергії телефонних станцій, електромобілів, маяків тощо [1].

Проведена у 1973 р. в США конференція «Cherry Hill» вважається відправним пунктом у розвитку наземної фотоелектрики. Під час неї експерти висловили думку, що саме фотоелектрична генерація може відігравати суттєву роль у забезпеченні США електроенергією. Як наслідок, законодавча підтримка та безпрецедентні обсяги фінансування дослідно-конструкторських робіт урядами США і розвинутих країн Європи створили умови для першого етапу розвитку наземного використання фотоелектрики.

Технологами німецької фірми «Wacker» в середині 70-х рр. XX ст. було розроблено інноваційну кристалізацію полікристалічного кремнію для наземних сонячних елементів. Це було революційним кроком у розвитку фотоелектрики для наземного використання. Нині такі кремнієві сонячні елементи займають найбільший сегмент світового ринку фотоелектрики [2].

Упродовж багаторічної історії розвитку фотовольтаїки було розроблено низку різноманітних видів фотоелектричних батарей, які умовно охоплюють 3 покоління технологій. Кремній став першим життєздатним матеріалом для фотоелектричних елементів, створивши основу для технології *першого покоління* фотоелектричних перетворювачів.

Фотоелектричні елементи на основі кремнію (Si-PV) можна розділити на дві широкі категорії, а саме:

1. Сонячні елементи з кристалічного кремнію (c-Si), це найпопулярніший клас фотоелектричних елементів, які були розроблені за технологією кристалічного кремнію на основі пластин, які далі можна розділити на монокристалічні та полікристалічні;

2. Фотоелектричні елементи з аморфного кремнію (a-Si). Фотоелектричні елементи a-Si розроблено за допомогою тонкоплівкової технології, розвиток якої привів до появи вдосконалених фотоелектричних елементів на основі гідрогенізованого аморфного кремнію (a-Si:H) [3].

Як правило, Si-PV елементи мають р-п-перехід на основі кремнієвого напівпровідника як базову одиницю в структурі сонячної батареї, як показано на Рис. 1.

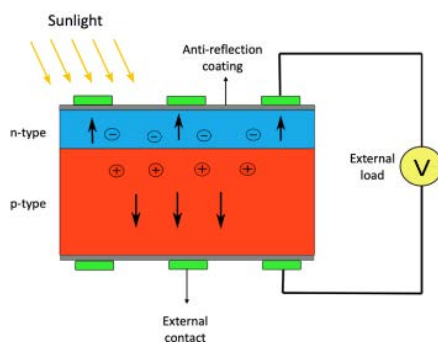


Рис. 1. р-п-перехід на основі кремнієвого напівпровідника [8]

Технології першого покоління залишаються основним рушієм розвитку фотоелектричної галузі. І досі більше 90% нині діючих світових виробництв сучасних фотоелектричних панелей використовують технологію кристалічного кремнію на основі пластин [9].

Однак, незважаючи на високий рівень ефективності технологій першого покоління, можливості для покращення, включають: зниження вартості c-Si модулів; пом'якшення впливу на довкілля шляхом зменшення відходів; зменшення товщини пластини через покращення властивостей матеріалу.

Подальші розробки призвели до створення фотоелектричних батарей *другого покоління*, заснованих на інтеграції багатьох напівпровідникових матеріалів. У результаті виникли два класи фотоелектричних елементів [10]:

- одноперехідні, на основі комбінування елементів III і V групи періодичної таблиці, з використанням технології на основі пластин. Зазначений клас включає GaInP (галій-індій-фосфор) і GaAs (арсенід галію);
- халькогенідні фотоелектричні елементи – розроблені комбінуванням різних халькогенових напівпровідникових елементів, виготовлених за тонкоплівковою технологією. Цей клас включає CdTe (телурид кадмію), CZTS (сульфід міді, цинку, олова) і CIGS (діселенід міді, індія, галію). До технологій другого покоління відносять також [9] тонкоплівкові на основі кремнію: аморфного [a-Si] та мікрморфного [a-Si/c-Si].

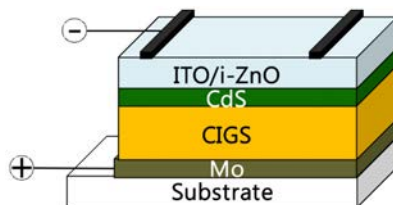


Рис. 2. Схематичне зображення тонкоплівкового ФЕ елемента на основі CIGS [11]

Ці технології можуть бути дешевшими за кремнієві у разі серійного виробництва, але мають суттєво нижчі показники ефективності.

Зрештою, технології *третього покоління* стосуються новітніх розробок в конструкції та матеріалах, що використовуються в фотоелектричних елементах [3]. Вони засновані на технології тонких плівок і дозволили модифікувати традиційну технологію фотоелектричних елементів з метою підвищення ефективності перетворення електроенергії (ПЕ) і мінімізації вартості виготовлення, а отже, зниження загальної вартості фотоелектричних панелей. До найбільш перспективних технологій, що інтенсивно досліджуються, відносяться наступні:

- пасивація тильного контакту випромінювача (PERC).

Фотоелектричні елементи з технологією PERC є модифікацією типових монокристалічних c-SI елементів, в яких фотони відбиваються назад через кристалічну решітку за допомогою пасиваційного шару, інтегрованого на тильній стороні сонячної панелі. Як подальша модифікація технології алюмінієвої тильної поверхні (Al-BSF), фотоелектричні елементи PERC включають локальні тильні контакти за допомогою процесу лазерної абляції [3]. Пасивуючий шар збільшує загальну ефективність фотоелектричного елемента трьома ключовими способами:

- зменшення рекомбінації носіїв зарядів;
- збільшення поглинання світла;
- забезпечення вищої внутрішньої відбивної здатності.

Приріст ефективності від впровадження архітектури PERC для монокристалічних елементів становить від 0,8% до 1%, в той час як приріст для мультикристалічних елементів трохи нижчий – від 0,4% до 0,8% [12]. Технологія PERC почала лише нещодавно виходити на комерційну арену, але швидко стала новим промисловим стандартом для монокристалічних елементів.

- органічні фотоелектричні елементи (OSC).

Органічні фотоелектричні елементи використовують органічні (на основі вуглецю) матеріали у складі активного напівпровідникового шару. Органічні напівпровідники дають потенціал для виробництва гнучких і легких сонячних панелей. Найбільш привабливою характеристикою OSC є низька вартість їх виготовлення завдяки недорогому матеріалу активного шару та підкладки з поліетилентерефталату (PET) [10]. OSC розроблені для застосування при низькій інтенсивності світла, і, отже, є підходящими для використання в приміщеннях. У порівнянні з традиційними кремнієвими елементами органічні мають вищі показники оцінки життєвого циклу (LCA) завдяки нижчим термінам повернення інвестованої для їх виготовлення електроенергії (Energy Pay-Back Time) та компенсації викидів вуглекислого газу (Carbon Pay-Back Time), що потрапив в атмосферу при виробництві. Найбільшим недоліком органічних елементів є нижча ефективність перетворення енергії та коротший життєвий цикл, що обмежує можливості їх комерціалізації. Проблема утилізації підкладки з PET, що не піддається біологічному розкладанню, ставить перед науковцями завдання пошуку кращого еко-дизайну матеріалу підкладки, який буде нетоксичним, механічно стабільним та забезпечуватиме покращені характеристики оцінки життєвого циклу (LCA).

- сенсibiliзація барвниками (DSSC).

Сенсibiliзовані барвниками фотоелектричні елементи (DSSC) складаються з механічної основи, покритої прозорими провідниковими оксидами (TCO), напівпровідникової плівки (звичай TiO<sub>2</sub>), сенсibiliзатора, адсорбованого на поверхні напівпровідника, електроліту, що містить окисно-відновний медіатор, а також протиелектрода, здатного регенерувати окисно-відновний медіатор. Як напівпровідник для фотоелектрода часто використовується діоксид титану, оскільки він є дешевим, широко доступним та нетоксичним, як сенсibiliзатор використовуються комплексні сполуки рутенію, а окисно-відновною парою є трийодид/йод [14]. Їх ефективність



значно нижча в порівнянні з традиційними Si-PV панелями. Однак основним обмеженням DSSC є довговічність, тобто мінімізований термін служби через корозію, витікання та випаровування леткого рідкого електроліту. З цієї причини було докладено багато зусиль для розробки оптимального багатофазного електроліту та навіть застосування квазітвердого електроліту, який продемонстрував оптимальний баланс між терміном служби та ефективністю, і твердогільного електроліту, який виявив оптимальну механічну стабільність, високу безпеку, легке виготовлення та знижену ефективність.

– колоїдні квантові точки (CQSC).

В основі фотоелектричних елементів на основі колоїдних квантових точок (CQSC) лежать колоїдні металохалькогенідні квантові точки (CQD), які є нанокристалічними частинками в дірково-транспортному шарі р-типу (HTL) напівпровідникового матеріалу [15]. Ці нанокристали мають високу квантову світлову ефективність і використовуються в елементі як середовище для поглинання світлового випромінювання. Оскільки вони засновані на наноструктурах, розмір і властивості яких можна легко змінювати, CQSC можна налаштувати для поглинання різних спектрів світла. Основна структура CQSC складається з шару транспортування дірок (HTL), шару халькогенідних квантових точок (CQD), активного шару, шару транспортування електронів (ETL) і задньої поверхні з оксиду індію та олова (ITO). CQSC привернули велику увагу та дослідницький інтерес завдяки своїй здатності поглинати видимий та близький до інфрачервоного спектри випромінювання, дешево виготовленню при низьких температурах, а також гнучкості, що дозволяє регулювати заборонену зону шарів матеріалу в їх структурі [3]. Технологія CQSC робить можливою генерацію одним фотоном множинних екзитонів і дозволяє перевершити межу Шоклі-Квейссера [16]. Завданням подальших досліджень є розробка високостабільного оптимального контролю і налаштування забороненої зони, що значно підвищить продуктивність і ефективність CQSC і сприятиме їх широкомасштабній комерціалізації.

– перовскіти (PSC).

Основою перовскітних фотоелектричних елементів (PSC) є гібридний металогалогенний перовскіт, який є мінералом  $\text{CaTiO}_3$ , і серед інших переваг характеризується низькою вартістю та мінімальними втратами на рекомбінацію [3]. Типова структура PSC є наступною: прозора підкладка – формує шар, який покриває прозорий електропровідний оксид (TCO) та дозволяє надходження світла до нього; шар TCO – це тонкий шар  $\text{TiO}_2$ , який служить для блокування дірок; електронний транспортний шар (ETL) – це межа розділу між мезопористим шаром і шаром TCO, яка дозволяє транспортувати фотони світла; шар перовскіту – це інфільтраційний шар з перовскітовим розчинним матеріалом; шар матеріалу для транспортування дірок (HTM) – служить матрицею для транспортування дірок в органічних фотоелементах. PSC показали багатообіцяючу тенденцію досягнення майже еквівалентних результатів ефективності перетворення електроенергії порівняно з кремнієвими панелями, які вже виробляються. Основними завданнями подальших досліджень є вирішення проблем внутрішньої токсичності клітинної структури через наявність високотоксичного металу свинцю та його похідних у структурі клітин, а також викидів свинцю під час їх виробництва, безпечної утилізації PSC. До інших недоліків PSC відносять недовговічність і схильність до руйнування під впливом вологи та ультрафіолетового випромінювання. Саме збільшення надійності та терміну служби стоїть першочерговим завданням перед інженерами за подальших розробок [17]. Іншим викликом для науковців є те, що, хоча вони змогли досягти високих рівнів ефективності з невеликими перовскітами, вони не змогли повторити такий ефект для більших площ елементів. Якщо ці бар'єри будуть подолані, перовскітові клітини мають потенціал змінити динаміку та економіку сонячної енергетики, оскільки вони дешевші у виробництві ніж кремнієві елементи, і можуть вироблятися при відносно низьких температурах, на відміну від кремнієвих.

– багатоперехідні (каскадні) фотоелектричні елементи (MJSC).

Каскадні фотоелектричні елементи (MJSC) включають кілька напівпровідникових матеріалів із різними ширинами забороненої зони для поглинання ширшого діапазону сонячного спектру. MJSC формують шляхом вирощування монокристалічної багатокаскадної монокристалічної структури, або механічного стикування готових елементів. На рис. 3 показано типовий елемент з трьома переходами ( $\text{InGaP}/\text{InGaAs}/\text{Ge}$ ).

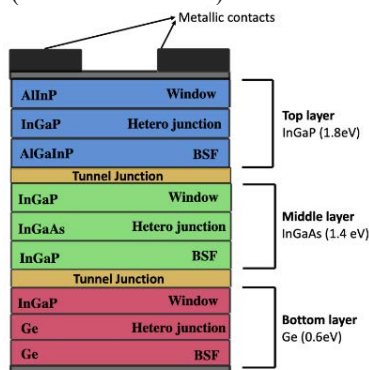


Рис. 3. Схематичне зображення каскадного ФЕ елемента [3]

MJSC, що складається з двох суб-елементів, зазвичай називають тандемом. Технологія укладання шарів з різних матеріалів, кожен з яких здатний поглинати певну частину сонячного світла, дозволяє каскадним фотоелектричним елементам досягти вищої ефективності порівняно з одноперехідними, які мають теоретичний показник ефективності перетворення енергії менше 30%. MJSC є суттєво дорогими у виробництві через високу вартість матеріалів і складний процес виготовлення [10]. Як наслідок, вони не набули широкої комерціалізації, навіть незважаючи на їх високу потенційну ефективність. Індустрія очікує майбутніх досліджень та прориву у відкритті оптимальних альтернативних матеріалів для з'єднання, що забезпечить нижчу собівартість електроенергії (LCOE) і великий потенціал для масштабної комерціалізації MJSC.

В таблиці 1 наведено основні переваги і недоліки фотоелектричних елементів різних типів.

Таблиця 1

### Порівняльна таблиця переваг і недоліків фотоелектричних елементів різних типів

Технологія ФЕ	Переваги	Недоліки
Кремнієві	Висока ефективність, стабільність, високий термін життєвого циклу	Висока вартість та енергоємність виробництва
Тонкоплівкові халькогенідні	Низька вартість при серійному виробництві	Низькі показники ефективності, проблема утилізації токсичних матеріалів
Органічні	Низька вартість матеріалів, можливість застосування при низькій інтенсивності світла	Низька ефективність, низький термін життєвого циклу, проблема утилізації підкладки PET
Сенсибілізовані барвниками	Низька вартість матеріалів	Низька ефективність, низький термін життєвого циклу
Перовскіти	Висока ефективність, низька вартість матеріалів	Проблема зниження внутрішньої токсичності, недовговічність, низька ефективність на модулях великих площ
Багатоперехідні	Висока ефективність	Висока вартість і складність виготовлення

Наведені нижче дані [7] вимірювань ефективності фотоелектричних елементів та модулів з різних типів напівпровідників були отримані сертифікованими тестувальними центрами з дотриманням стандарту global AM1.5 spectrum (1000 W/m<sup>2</sup>) при 25°C (IEC 60904-3: 2008 або ASTM G-173-03 global). Застосовано критерій мінімальної площі для різних типів пристроїв (1 см<sup>2</sup> для елементів без використання концентраторів (one-sun cell), 200 см<sup>2</sup> для «субмодуля» та 800 см<sup>2</sup> для модуля; для елемента з використанням концентраторів – 0,05 см<sup>2</sup>).

Серед одноперехідних елементів та субмодулів найвищий показник ефективності в 29,1% зафіксовано в жовтні 2018 року Інститутом систем сонячної енергії Фраунгофера (FhG-ISE) для тонкоплівкового фотоелектричного елемента GaAs. Згідно зі звітами Інституту досліджень сонячної енергії в Хамельні (ISFH) у жовтні 2022 року, компанією LONGi встановлено новий рекорд ефективності 26,81% для кремнієвих фотоелектричних елементів з гетеропереходом за технологією повнорозмірних кремнієвих пластин. Серед халькогенідних фотоелектричних елементів найвищий показник ефективності у 23,35% продемонстровано у листопаді 2018 році елементом CIGS без вмісту кадмію. Для елементів вказаної підгрупи варто відзначити підвищення ефективності до 20,3% для великого (527 см<sup>2</sup>) субмодуля CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>S<sub>y</sub>Se<sub>2-y</sub> (CIGSSe), виготовленого компанією Avancis та виміряного Національною лабораторією відновлюваної енергії (NREL) США. Іншим новим результатом є ефективність площі апертури 12,1% для елемента Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>y</sub>Se<sub>4-y</sub> (CZTSSe) розміром 1 см<sup>2</sup>, виготовленого Інститутом фізики Академії наук Китаю (IoP/CAS) і виміряного Китайським національним центром вимірювань і випробувань фотоелектричної промисловості (NPVM) у квітні 2023 року. Нове досягнення – ефективність 24,35% для перовскітового фотоелектричного елемента площею 1 см<sup>2</sup>, виготовленого Національним університетом Сінгапуру спільно з Інститутом досліджень сонячної енергії Сінгапуру і виміряного NPVM у квітні 2023 року. Останнє оновлення результату ефективності фотоелектричного елемента, сенсибілізованого барвниками (виробництва компанії Sharp), на рівні 11,9% отримане ще у вересні 2012 року японським Національним інститутом передових промислових наук і технологій (AIST). У січні 2023 року отримано новий результат ефективності 15,7% для органічного фотоелектричного мінімодуля розміром 19 см<sup>2</sup>, виготовленого Університетом Чжецзяна у співпраці з EnrichPV і Microquanta та виміряного Японськими лабораторіями з електробезпеки та екологічних технологій (JET).

Серед каскадних елементів та субмодулів найвищий показник ефективності зафіксовано NREL у липні 2013 року – 38,8% для 5-каскадного (групи III-V) елемента. У квітні 2020 року лабораторією FhG-ISE отримано показник ефективності 35,9% для каскадного елемента GaInP/GaInAsP/Si. Були зафіксовані нові результати ефективності для каскадних елементів з використанням перовскітів. Перший новий результат стосується 2-термінального перовскітно-кремнієвого тандемного елемента розміром 1 см<sup>2</sup>, у травні 2023 року ESTI підтвердила 33,7% ефективності для елемента, виготовленого компанією KAUST. Це вища ефективність, ніж у будь-який іншого тандему із двох елементів. Також у травні FhG-ISE підтвердила ефективність 28,6% для набагато більшого 2-термінального перовскітно-кремнієвого тандемного

елементу площею 258 см<sup>2</sup>, виготовленого Oxford PV. Було звітовано про гарні результати для 4-термінального тандему площею 64 см<sup>2</sup>, виготовленого Kaneka, що складається з 32-елементного перовскітного мінімодуля, механічно укладеного на один кремнієвий елемент. Загальна ефективність 28,4% була виміряна Японським національним інститутом передових промислових наук і технологій (AIST). Два нові результати, стосуються тандемної групи з двох перовскітних елементів різного складу, обидва пристрої виготовлені Нанкінським університетом у співпраці з Renshine Solar (Suzhou) Co. Ltd, і обидва виміряні JET. Перший – це 28,2% ефективності для пристрою з площею 1 см<sup>2</sup>, що свідчить про те, що рубіж у 30% також досягається для цього підходу, а другий – 29,1% для набагато меншого пристрою з площею 0,05 см<sup>2</sup>.

Нові результати ефективності фотоелектричних модулів без використання концентраторів: перший повідомляє про збільшення ефективності до 24,7% для великої площі (1,8 м<sup>2</sup>), монокристалічного кремнієвого модуля, виготовленого компанією Maxeon і виміряного NREL у квітні 2023 року. Другий повідомляє про підвищення ефективності до 18,6% для меншого (810 см<sup>2</sup>) перовскітового модуля, виготовленого компанією UtmoLight і виміряного JET у травні 2023 року; тоді як третій повідомляє про значне збільшення ефективності до 13,1% для більшого (1475 см<sup>2</sup>) органічного модуля, виготовленого Ways Technical Corporation в співпраці з Nanobit і виміряного NREL у травні 2023 року. Останні два результати повідомляють про два високоєфективних 4-термінальних модулів, виготовлених Sharp та виміряних за допомогою AIST у лютому 2023 року, які складаються з тандемного модуля III–V, механічно укладеного на кремнієвий модуль у першому випадку та модуля CIGS у другому випадку. Вони обидва мають характеристики площі трохи нижчі за вимогу у 800 см<sup>2</sup> для класифікації як модуля. Загальна ефективність становить 33,7% у першому випадку та 31,2% у другому, що свідчить про тип комерційних показників, які галузь може очікувати в майбутньому.

Виготовлені в Німеччині (Fraunhofer ISE/Soitec) чотирьохкаскадні III-V фотоелектричні елементи досягли ефективності 47,6% при використанні концентратора сонячного випромінювання зі ступенем концентрації 665 ед. Згідно вимірювань, проведених у травні 2022 року, що є одним із найбільш високих досягнутих коефіцієнтів перетворення енергії для фотоелектричних елементів будь-яких типів.

Окрім впровадження нових матеріалів та вдосконалення архітектури фотоелектричних елементів науковцями розроблено широкий ряд методів і технологій для підвищення ефективності фотоелектричних модулів, а також розширення областей їх практичного застосування. Серед найбільш інноваційних технологій, які прогнозовано можуть вийти на новий рівень, відмітимо наступні.

– двосторонні фотоелектричні елементи (BPV).

Двосторонні фотоелектричні елементи використовують антивідблискові покриття як переднього, так і заднього шарів для поглинання сонячного випромінювання з конфігурацією, яка складається з емітерного шару (n-типу), області виснаження та шару підкладки (p-типу), які розташовані між антивідблисковими покриттями [18]. BPV елементи здатні генерувати електроенергію, використовуючи сонячне світло, отримане як через їх фронтальну сторону, так і через зворотну сторону, приймаючи випромінювання, відбите від поверхні. Функціонування у режимі використання двох сторін модуля, драйвером якого є PERC-технологія, забезпечує збільшення ефективності модуля на 5–20% за рахунок збільшення генерації електричної енергії.

– прозорі фотоелектричні елементи (TPV) – це нова технологія, яка базується на прозорому провідному склі та електродах, що створює умови для їх інтеграції в системи «розумних будівель». Останні розробки щодо елементів TPV базуються на технологіях виготовлення матеріалів сонячних елементів, які вже розробляються, наприклад розробка напівпрозорого перовскітного фотоелектричного елемента (ST-PSC) [19], який продемонструвало прозорість для хвиль майже інфрачервоного спектру. Для елемента ST-PSC із прозорим електродом з оксиду індію, легованого церієм, зафіксовано ефективність 20,37%. Іншими розробками є: перовскіт/кремнієвий тандемний фотоелектричний елемент [20] з максимальною ефективністю 19,8% на основі оптимально прозорого електрода та напівпрозорого перовскітного верхнього елемента; а також напівпрозорі органічні фотоелектричні елементи (ST-OSC) [21] з використанням електродів з оксиду індію і олова (ITO). Крім того, архітектура, яка базується на халькогенідних фотоелектричних елементах CIGS з використанням напівпрозорого ультра-тонкого скла, дозволила досягти максимальної ефективності елемента 13,23% [22].

– гнучкі фотоелектричні елементи (FPV).

В основі гнучких фотоелектричних елементів, що можуть служити у складі гнучких, розтяжних, скручуваних механізмів, лежать органічні сонячні елементи із кількома оптимізованими полімерними шарами, що мають гнучку підкладку, пластичний поглинач, а також високопровідний та гнучкий електрод з полімеру PEDOT:PSS. Серед поточних розробок в елементах FPV відзначимо:

– складаний органічний фотоелектричний елемент з ефективністю 14,17%, з використанням оброблених кислотою електродів [23];

– складані перовскітові сонячні батареї з ефективністю 17,03% з використанням надтонкої підкладки з PET [24].

Технологія FPV має унікальні характеристики, такі як поєднання напів- або повної складаності, легкості, механічної стабільності, високої провідності, гнучкості і стійкості з відносно високою ефективністю, і може революціонізувати наступне покоління електроніки з інтегрованими фотоелектричними технологіями.

– системи концентрування випромінювання.

Завдяки концентрації сонячного світла є можливість значно зменшити розміри фотоелектричних модулів без втрати загальної потужності сонячної панелі або збільшити інтенсивність світлового потоку на панель. Найбільше розповсюдження отримали допоміжні дзеркала, концентратори гіперболічного типу та концентратори на базі лінз Френеля. Системи дзеркал створюють додатковий оптичний потік на поверхню панелей, завдяки чому інтенсивність сонячного випромінювання стає більшою стандартних умов (1000–1200 Вт/м<sup>2</sup>). Недоліками при застосуванні дзеркал є збільшення площі сонячної станції, а також перевищення стандартних умов номінальної інтенсивності, що може призвести до збільшення ефекту деградації та зменшення строку служби панелей. За допомогою лінз Френеля вдалося перевищити 46% ефективності у чотирьохкаскадному елементі на основі напівпровідників групи III–V [7]. Необхідно відзначити, що досліджуються елементи за лабораторних умов освітлення. Самі концентраторні багатокаскадні елементи при використанні в натурних умовах вимагають застосування механічно складних опорних конструкцій, що включають схеми стеження, мають низьку ефективність при освітленні розсіяним світлом і потребують ефективного охолодження структури внаслідок локального нагрівання [6]. Втім, очікується, що в перспективі ця технологія дозволить підвищити ефективність фотоелектричних елементів до 50% за умови високої концентрації сонячного випромінювання. На даний момент концентратори світла загалом не знайшли широкого застосування у комерційному виробництві сонячних панелей через додаткове ускладнення конструкції і відповідно підвищення вартості виробленої електроенергії.

– технології вдосконалення зняття струму.

Кремнієві фотоелектричні елементи оснащені тонкими металевими смужками на фронтальній і зворотній поверхнях, призначеними для передачі постійного струму, що генерується модулем. Сонячні батареї попередніх поколінь зазвичай мали дві струмознімні шини, але з часом з метою підвищення ефективності кількість шин збільшилась до трьох, п'яти (або більше). Збільшення кількості шин покращує ефективність модуля через зниження втрат внутрішнього опору, що пов'язано з меншою відстанню між шинами, крім того, багатоштинна технологія є дуже корисною для двосторонніх (BPV) конструкцій. «Віолончельна технологія» (Cello), що активно впроваджується провідними компаніями, такими як LG, Panasonic, Seraphim Solar, передбачає використання від 12 до 30 струмоз'ємних доріжок замість традиційних 4–5 для зниження нагрівання фотоелемента та кращої передачі струму. Струмоз'ємні доріжки при такій технології є вужчими та мають заокруглену форму для заломлення сонячного променя на активну частину кристала.

Технологія фотомодулів без струмоз'ємних доріжок (busbar-less PV) передбачає формування пластинчастих фотомодулів та комутацію їх за допомогою паяльної пасти. Такі сонячні фотоелементи мають більшу активну площу поглинання за рахунок відсутності закритих струмоз'ємними доріжками секторів та є більш стійкими до часткових затінь [25]. Суттєвий вплив на підвищення ефективності фотоелектричних модулів можуть мати: додаткове охолодження панелей [26], використання антиблікових покриттів, покриттів з функцією самоочищення [27].

Таблиця 2

**Показники ефективності фотоелектричних елементів та модулів різних типів [7]**

Група	Тип елемента	Ефективність, %	Дата тестування	Центр тестування
Одноперехідні фотоелектричні елементи і субмодулі, без використання концентраторів				
Групи III–V	Тонкоплівковий елемент GaAs	29,1%	10.2018	FhG-ISE
Кремнієві	Si (монокристалічний елемент)	26,8%	10.2022	ISFH
Тонкоплівкові халькогенідні	CIGS-елемент, без вмісту кадмію	23,35%	11.2018	AIST
Перовскітові	Перовскітовий елемент	24,35%	04.2023	NPVM
Барвникові	Барвниковий елемент	11,9%	09.2012	AIST
Органічні	Органічний мінімодуль	15,7%	01.2023	JET
Каскадні фотоелектричні елементи і субмодулі, без використання концентраторів				
Групи III–V	5-каскадний елемент (2.17/1.68/1.40/1.06/1.73 eV)	38,8%	07.2013	NREL
Каскадні перовскіт/кремнієві	Тандемний елемент перовскіт/кремнієвий	33,7%	05.2023	ESTI
Фотоелектричні модулі, без використання концентраторів				
кремнієві (кристалічні)	монокристалічний кремнієвий модуль площею 1,8 м <sup>2</sup>	24,7%	04.2023	NREL
Перовскітові	перовскітовий модуль, 810 см <sup>2</sup>	18,6%	05.2023	JET
Органічні	органічний модуль, 1475 см <sup>2</sup>	13,1%	05.2023	NREL
Фотоелектричні елементи і модулі з використанням концентраторів				
Каскадні	4-каскадний групи III–V фотоелектричний елемент, при концентрації 665 од.	47,6%	05.2022	FhG-ISE



Безумовними лідерами у розвитку фотоелектричних технологій є США та Китай, серед країн, для яких розвиток відновлюваної енергетики також встановлено національним пріоритетом необхідно відзначити Індію, Німеччину, Японію, Великобританію, Італію, Францію. Українськими науковцями у базі даних Scopus за темою «Solar Photovoltaics» в період 1991–2019 рр. опубліковано 1370 робіт. Найбільша кількість публікацій в Україні за тегом «Solar Photovoltaics» стосується фотоелектричних матеріалів, головним чином, це високотехнологічні результати, спрямовані на оптимізацію параметрів існуючих матеріалів для фотоелектрики, вдосконалення методів їх виготовлення та дослідження, а також створення нових ефективних та недорогих матеріалів для конкуренції з існуючими. За темою «Фотоелектрика» пріоритетними для українських науковців були прикладні дослідження [28]. Аналіз відкритих даних Базы патентів України показує, що 24 відсотки патентів, зареєстрованих в Україні за період 1991–2019 рр., стосуються процесу виробництва фотоелектричних елементів та модулів, 48 відсотків рішень присвячені конструкції і компонуванню фотоелектричних модулів і систем, 28 відсотків – матеріалам і архітектурі фотоелектричних елементів.

#### Висновки

1. Технологія на основі кремнієвих пластин досі є домінуючою, забезпечуючи переваги у вигляді стабільності та високих показників ефективності.
2. Новітні фотоелектричні технології, включаючи перовскітні, тандемні та органічні, демонструють суттєве зростання за останні роки та пропонують багатообіцяючі можливості, разом з тим актуальними залишаються питання вирішення проблем щодо підвищення їх ефективності, стабільності та масштабування виробництва.
3. Актуальними залишаються дослідження та розробки технологій з пом'якшення впливу фотоелектричних систем на навколишнє середовище шляхом зменшення використання токсичних матеріалів, енергоємності і токсичності виробничих процесів, переробки панелей, що виходять із вжитку.

#### Список використаної літератури

1. Хрипунов Г.С. Хрипунова А.А. Історичні передумови та аналіз розвитку фотоелектрики у 50-х роках ХХ століття. (2015). *Сумський історико-архівний журнал*. № 24. С. 75–81.
2. Хрипунова А. Л. (2015). Передумови розвитку наземної фотоелектрики у 70-х рр. ХХ ст. Сторінки історії. *Вісник НТУУ "КПІ"*. № 40. С. 158–167.
3. Geoffrey K. Ontiri, Lilian L. Amuhaya. (2022). A Review of Emerging Photovoltaic Construction Technologies to Increase Efficiencies in Solar as a Renewable Energy Source. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*. Vol. 85, No.1, P 348–369.
4. Durganjali C. S. et al (2020). Recent Developments and Future Advancements in Solar Panels Technology. *Journal of Physics* Vol. 1495. P. 012–018. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012018>.
5. L.P.S.S. Panagoda, R.A.H.T. Sandeepa, W.A.V.T. Perera, D.M.I. Sandunika, S.M.G.T. Siriwardhana, M.K.S.D. Alwis, S.H.S. Dilka. (2023). Advancements In Photovoltaic (Pv) Technology for Solar Energy Generation. *Journal of Research Technology & Engineering* 4 (30). 30–72).
6. Goetzberger A. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Material Science and Engineering*. № 40. pp. 1–46.
7. Martin A. Green, Ewan D. Dunlop, Masahiro Yoshita, Nikos Kopidakis, Karsten Bothe, Gerald Siefer, Xiaojing Hao. (2023). Solar cell efficiency tables. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. DOI:10.1002/pip.3726. [onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.3726](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.3726)
8. B. Mahadevan, S. Naghibi, F. Kargar and A. Balandin (2019). "Non-Curing Thermal Interface Materials with Graphene Fillers for Thermal Management of Concentrated Photovoltaic Solar Cells". *Journal of Carbon Research*, vol. 6, no. 1, p. 2.
9. IRENA (2019), Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
10. T. Ibn-Mohammed et al. (2017). Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 80. pp. —1344.
11. Kyu-Seok Lee et al. (2010). Analysis of the Current-voltage Curves of a Cu(In,Ga) Se<sub>2</sub> Thin-film Solar Cell Measured at Different Irradiation Conditions. *Journal of the Optical Society of Korea* Vol. 14, No. 4. pp. 321–325. DOI: 10.3807/JOSK.2010.14.4.321
12. Ballif, Christophe & Haug, Franz-Josef & Boccard, Mathieu & Verlinden, Pierre & Hahn, Giso. (2022). Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*. DOI: 10.1038/s41578-022-00423-2.
13. Гошовський С. В., Зур'ян А. В. (2015). Методичні засади для оптимальної побудови енергетичних комплексів з використанням відновлюваних джерел енергії. Збірник наукових праць УкрДГПІ. № 4. С. 9–21.
14. Карпчук Г. Л., Будько В. І. (2023). Аналіз технологій фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію. Відновлювана енергетика. № 2(73). С. 32–38. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\).32-38](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73).32-38).

15. M. Biondi et al. (2020). A Chemically Orthogonal Hole Transport Layer for Efficient Colloidal Quantum Dot Solar Cells. *Advanced Materials*, vol. 32, no. 17, pp. 1906–1909.
16. J. Gan and L. Qiao (2020). Colloidal Quantum Dots for Highly Efficient Photovoltaics. *Quantum Dot Optoelectronic Devices*. pp. 49–82.
17. N. Mariotti, M. Bonomo, C. Barolo (2020). Emerging Photovoltaic Technologies and Eco-Design, Criticisms and Potential Improvements. *Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules*. no. 21, pp. 1254–1267.
18. W. Gu, T. Ma, S. Ahmed, Y. Zhang and J. Peng (2020). A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology. *Energy Conversion and Management*, vol. 223, p. 1132–1143.
19. H. Park (2021). Transparent Electrode Techniques for Semitransparent and Tandem Perovskite Solar Cells, *Electronic Materials Letters*. vol. 17, no. 1, pp. 18–32.
20. D. Yang et al. (2021). 28.3%-efficiency perovskite/silicon tandem solar cell by optimal transparent electrode for high efficient semitransparent top cell. *Nano Energy*. vol. 84, p. 105934 <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105934>
21. W. Song et al. (2020). Foldable Semitransparent Organic Solar Cells for Photovoltaic and Photosynthesis", *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 15, p. 2000136
22. D. Kim et al. (2020). Flexible and Semi Transparent Ultra-Thin CIGSe Solar Cells Prepared on Ultra-Thin Glass Substrate: A Key to Flexible Bifacial Photovoltaic Applications. *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 36, p. 2001775, 2020.
23. W. Song et al. (2020). Over 14% Efficiency Folding-Flexible ITO-free Organic Solar Cells Enabled by Ecofriendly Acid-Processed Electrodes. *iScience*, vol. 23, no. 4, p. 100981.
24. P. Li et al., "Foldable solar cells: Structure design and flexible materials", *Nano Select*, 2021.
25. Park, J.E.; Choi, W.S.; Lim, D.G. (2021). Multi-Wire Interconnection of Busbarless Solar Cells with Embedded Electrode Sheet. *Energies*. 14. 4035. <https://doi.org/10.3390/en14134035>
26. Dwivedi Pushpendu, Sudhakar K., Soni Archana. (2020). Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*. no. 21. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>
27. Sarkın, A.S., Ekren, N. and Sağlam, Ş. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Solar Energy*. pp. 63–73. doi:10.1016/j.solener.2020.01.084.
28. Nykyruy L., Yakubiv V., Wisz G., Hryhoruk I., Zapukhlyak Z., Yavorskyi R. (2020). Renewable Energy in Ukraine – Poland Region: Comparison, Critical Analysis and Opportunities. In *Renewable Energy-Resources, Challenges and Applications*. *Intech Open*. <https://www.intechopen.com/chapters/71838>

### References

1. Khrypunov G.S., Khrypunova A.L. (2015) Istorychni peredumovy ta analiz rozvytku fotoelektryky u 50-kh rokakh XX stolittia. [Historical background and analysis of photovoltaics in the 50-ies of XX century]. *Sumy historical and archival journal*, No. 24, pp 75–81.
2. Khrypunova A.L. (2015) Peredumovy rozvytku nazemnoyi fotoelektryky u 70-h rokakh XX st. [Prerequisites for the development of terrestrial photovoltaics in the 1970s]. *Storinky istoriyi. Visnyk NTUU "KPI"*, № 40, pp. 158-167.
3. Ontiri G.K., Amuhaya L.L. (2022) A Review of Emerging Photovoltaic Construction Technologies to Increase Efficiencies in Solar as a Renewable Energy Source. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, Vol. 85, No. 1, pp. 348–369.
4. Durganjali C. S. et al. (2020) Recent Developments and Future Advancements in Solar Panels Technology. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1495. pp. 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012018>.
5. Panagoda L.P.S.S., Sandeepa R.A.H.T., Perera W.A.V.T., Sandunika D.M.I., Siriwardhana S.M.G.T., Alwis M.K.S.D., Dilka S.H.S. (2023) Advancements In Photovoltaic (Pv) Technology for Solar Energy Generation. *Journal of Research Technology & Engineering*, №4 (3), pp. 30–72.
6. Goetzberger A. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Science and Engineering*, 40, pp. 1–46.
7. Green M. A., Dunlop E.D., Masahiro Yoshita, Kopidakis N., Bothe K., Siefer G., Xiaoqing Hao. (2023) Solar cell efficiency tables. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. DOI:10.1002/pip.3726. [onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.3726](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pip.3726)
8. Mahadevan B., Naghibi S., Kargar F., Balandin A. (2019) Non-Curing Thermal Interface Materials with Graphene Fillers for Thermal Management of Concentrated Photovoltaic Solar Cells. *Journal of Carbon Research*, vol. 6, no. 1, p. 2.
9. IRENA (2019) Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Retrieved from [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA\\_Future\\_of\\_Solar\\_PV\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf)
10. Ibn-Mohammed T. et al. (2017) Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 1321–1344.

11. Lee K.S. et al. (2010) Analysis of the Current-voltage Curves of a Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin-film Solar Cell Measured at Different Irradiation Conditions. *Journal of the Optical Society of Korea*, Vol. 14, No. 4, pp. 321–325. DOI: 10.3807/JOSK.2010.14.4.321
12. Ballif, Christophe & Haug, Franz-Josef & Boccard, Mathieu & Verlinden, Pierre & Hahn, Giso. (2022). Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*. DOI: 10.1038/s41578-022-00423-2.
13. Goshovsky S. V., Zurian O. V. (2015) Metodychni zasady dlia optymalnoi pobudovy enerhetychnykh kompleksiv z vykorystanniam vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Methodological foundations for optimal construction energy complexes using renewable sources energy]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrSGRI*. No. 4, pp. 9–21.
14. Karpchuk H., Budko V. (2023) Analiz tekhnolohii fotoelektrychnoho peretvorennia soniachnoho vyprominiuvannia na elektrychnu enerhiiu [Overview analysis of technologies of photoelectric conversion of solar radiation energy into electrical]. *Renewable energy*. №. 2(73). pp. 32–38. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\).32-38](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73).32-38).
15. Biondi M. et al. (2020) A Chemically Orthogonal Hole Transport Layer for Efficient Colloidal Quantum Dot Solar Cells. *Advanced Materials*, vol. 32, no. 17, p. 1906199.
16. Gan J. and Qiao L. (2020) Colloidal Quantum Dots for Highly Efficient Photovoltaics. *Quantum Dot Optoelectronic Devices*, pp. 49–82.
17. Mariotti N., Bonomo M. and Barolo C. (2020) Emerging Photovoltaic Technologies and Eco-Design – Criticisms and Potential Improvements. *Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules*. DOI: 10.5772/intechopen.88327
18. Gu W., Ma T., Ahmed S., Zhang Y. and Peng J. (2020) A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology, *Energy Conversion and Management*, vol. 223, p. 113283.
19. Park H. (2021) Transparent Electrode Techniques for Semitransparent and Tandem Perovskite Solar Cells. *Electronic Materials Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 18–32.
20. Yang D. et al. (2021) 28.3%-efficiency perovskite/silicon tandem solar cell by optimal transparent electrode for high-efficient semitransparent top cell. *Nano Energy*, vol. 84, p. 105934.
21. Song W. et al. (2020) Foldable Semitransparent Organic Solar Cells for Photovoltaic and Photosynthesis. *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 15, p. 2000136.
22. Kim D. et al. (2020) Flexible and Semi-Transparent Ultra-Thin CIGSe Solar Cells Prepared on Ultra-Thin Glass Substrate: A Key to Flexible Bifacial Photovoltaic Applications. *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 36, p. 2001775.
23. Song W. et al. (2020) Over 14% Efficiency Folding-Flexible ITO-free Organic Solar Cells Enabled by Ecofriendly Acid-Processed Electrodes. *iScience*, vol. 23, no. 4, p. 100981.
24. Li P. et al. (2021) Foldable solar cells: Structure design and flexible materials. *Nano Select*.
25. Park J.E.; Choi W.S.; Lim D.G. (2021) Multi-Wire Interconnection of Busbarless Solar Cells with Embedded Electrode Sheet. *Energies* 2021, 14, 4035. <https://doi.org/10.3390/en14134035>
26. Dwivedi Pushpendu, Sudhakar K., Soni Archana (2020). Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. *Case Studies in Thermal Engineering*, no. 21.
27. Sarkın, A.S., Ekren, N. and Sağlam, Ş. (2020) A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 199, pp. 63–73. DOI:10.1016/j.solener.2020.01.084.
28. Nykyruy L., Yakubiv V., Wisz G., Hryhoruk I., Zapukhlyak Z., Yavorskyi R. (2020) Renewable Energy in Ukraine – Poland Region: Comparison, Critical Analysis and Opportunities. In *Renewable Energy-Resources, Challenges and Applications*. *IntechOpen*. <https://www.intechopen.com/chapters/71838>