

PACS numbers: 72.40.+w, 73.50.Pz, 81.05.Fb, 84.60.Jt, 88.40.fc, 88.40.hj, 88.40.jr

Органічні сонячні фотоелементи: прогрес, виклики, перспективи

Х. Б. Іванюк, О. О. Климкевич

*Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12,
79013 Львів, Україна*

Сучасний світ стикається зі зростаючим попитом на енергію та нагальною потребою у пом'якшенні наслідків зміни клімату, що вимагає переходу до чистих і сталих джерел енергії. Сонячна енергія, зокрема фотоелектричні технології, є багатобіляючим рішенням. Органічні сонячні фотоелементи (ОСФЕ) пропонують унікальні переваги, такі як легка вага, гнучкість, напівпрозорість, низька вартість виробництва та швидкий час окупності енергії. Незважаючи на початкову низьку ефективність, останні досягнення привели до лабораторної ефективності у понад 20%. Сучасні наукові групи зосереджують свою увагу на поліпшенні основних параметрів за рахунок синтезу нових сполук, конструкторської та технологічної модернізації архітектури. В огляді надається всебічна аналіза поточного стану ОСФЕ, що охоплює останні досягнення в матеріалознавстві, еволюцію архітектур пристроїв, вирішення проблем стабільності та прогрес у виробництві та масштабованості. Цей огляд детально розглядає різні матеріали, що використовуються в ОСФЕ, зокрема еволюцію полімерних донорів і появу донорів малих молекул, а також повністю полімерних сонячних фотоелементів. Також обговорюються різні архітектури пристроїв — від простих одношарових і двошарових структур до більш складних тандемних ОСФЕ, а також важливість функціональних шарів. Кожна архітектура розглядається з точки зору її переваг, обмежень і впливу на продуктивність пристрою. Крім того, в огляді надаються перспективи майбутнього розвитку ОСФЕ, зосереджені на подальшій розробці похідних фуллерену, вдосконаленні тандемних архітектур, прогресі в донорних полімерах та інтерфейсних шарах, масштабованих технологіях виготовлення та інтеграції з іншими фотоелектричними технологіями, такими як перовськітні сонячні фотоелементи.

The modern world faces a growing demand for energy and an urgent need to mitigate the consequences of climate change, necessitating a transition to clean and sustainable energy sources. Solar energy, particularly, photovoltaic technologies, is a promising solution. Organic solar cells (OSCs) offer unique advantages, such as lightweight design, flexibility, semi-

transparency, low production costs, and rapid energy-payback time. Despite initially low efficiencies, recent advancements have achieved laboratory efficiencies exceeding 20%. Current research groups are focusing on improving key parameters through the synthesis of new compounds, as well as design and technological upgrades to device architectures. This review provides a comprehensive analysis of the current state of OSCs, covering recent advances in materials science, the evolution of device architectures, solutions to stability challenges, and progress in manufacturing and scalability. The review thoroughly examines various materials used in OSCs, including the evolution of polymer donors, the emergence of small-molecule donors, and fully polymeric solar cells. It also discusses different device architectures, from simple single-layer and bilayer structures to more complex tandem OSCs, as well as the importance of functional layers. Each architecture is evaluated in terms of its advantages, limitations, and impact on device performance. Furthermore, the review outlines prospects for the future development of OSCs, focusing on the further development of fullerene derivatives, advancements in tandem architectures, progress in donor polymers and interfacial layers, scalable manufacturing technologies, and integration with other photovoltaic technologies, such as perovskite solar cells.

Ключові слова: органічні сонячні фотоелементи, фуллерен, донор, акцептор, гетероперехід, екситон.

Key words: organic solar cells, fullerene, donor, acceptor, heterojunction, exciton.

(Отримано 5 червня 2025 р.; після доопрацювання — 8 червня 2025 р.)

1. ВСТУП

Сучасний світ стикається з подвійним викликом: постійно зростаючим споживанням енергії та нагальною потребою пом'якшити негативні наслідки зміни клімату. Прогнозується, що населення світу значно зросте, що призведе до зростання попиту на енергію приблизно на 80% до 2050 року [1]. Ця зростаюча потреба в енергії для підтримки основних людських потреб і стимулювання промислової діяльності для соціально-економічного розвитку вимагає відмови від традиційних джерел енергії [1]. Залежність від викопного палива, яке наразі становить приблизно 80% світового енергопостачання [2], є основним чинником викидів парникових газів — основної рушійної сили глобального потепління та зміни клімату [1]. Науковий консенсус, відображений у звітах Організації Об'єднаних Націй, підкреслює нагальну потребу скоротити глобальні викиди майже вдвічі до 2030 року та досягти нульових викидів до 2050 року, щоб уникнути найкатастрофічніших наслідків швидкозмінного клімату [3]. Це вимагає фундаментальної трансформації способів виробництва та використання енергії з акцентом

на переході до чистих, сталих і надійних альтернативних джерел енергії [4, 5].

Серед відновлюваних джерел сонячна енергія виглядає особливо багатообіцяючою завдяки своїй великій доступності, стійкості та мінімальному впливу на навколишнє середовище. Сонячне випромінення має потенціал для ефективного задоволення глобальних потреб в електроенергії, одночасно зменшуючи забруднення навколишнього середовища [6].

Фотоелектрична (ФЕ) технологія пропонує прямий метод використання великої кількості сонячної енергії шляхом перетворення сонячного світла на електрику за допомогою процесу, відомого як фотоелектричний ефект. Це явище спостерігається у певних матеріалах, коли за вбирання фотона сонячного світла відбувається збудження електронів, що приводить до утворення різниці електричних потенціалів. Органічні сонячні фотоелементи (ОСФЕ) як окрема категорія в рамках ФЕ-технології працюють за цим самим фундаментальним принципом [7]. Подібно до традиційних неорганічних сонячних елементів, таких як ті, що базуються на монокристалічному та полікристалічному кремнії, ОСФЕ використовують взаємодію світла з напівпровідниковим матеріалом для генерації електричної енергії. Нещодавні досягнення в галузі матеріалів для ОСФЕ постійно підвищують їхні масштабованість, економічну та загальну ефективність [6].

ОСФЕ мають низку переваг, що роблять їх привабливими для широкого спектру застосувань. Їхня властива легка вага та гнучкість уможливають інтеграцію у різноманітні основи та пристрої, розширюючи їхню придатність за межі традиційних жорстких сонячних панелей [1]. Крім того, потенціал для низьковитратного виробництва великої площі з використанням методів нанесення з розчинів, таких як рулонний друк, пропонує шлях до масового виробництва та пониження витрат [1]. Напівпрозорість і функціональний дизайн ОСФЕ також відкривають можливості для інтегрованих у будівлі фотоелектричних систем та інших застосувань, де візуальна привабливість має вирішальне значення [2]. Більше того, ОСФЕ зазвичай демонструють менший час окупності енергії та пропонують екологічні переваги завдяки використанню менш токсичних і більш поширених матеріалів порівняно з традиційним виробництвом сонячних елементів [7].

Незважаючи на ці переваги, широке впровадження ОСФЕ залишається залежним від подолання кількох критичних проблем. ОСФЕ все ще не є конкурентоспроможними на ринку в порівнянні з неорганічними сонячними елементами, такими як кремнійові елементи, ефективність яких може перевищувати 25% [8, 9].

Стабільність також залишається критичною перешкодою, оскільки ОСФЕ дуже схильні до деградації під впливом чинників на-

вколишнього середовища, таких як волога, кисень та ультрафіолетове (УФ) випромінення, що значно скорочує термін служби пристроїв [10, 11]. Нестабільність інтерфейсу, особливо на межах між активним шаром, електродами та проміжними шарами, ще більше посилює деградацію [12].

Продуктивність ОСФЕ, особливо тих, що мають архітектуру об'ємного гетеропереходу (ВНІ), значною мірою залежить від нанорозмірної морфології активного шару, яка має збалансувати ефективну дисоціацію екситонів і перенесення заряду. Досягнення та підтримка оптимального фазового розділення та чистоти домен є складним завданням, особливо в повністю полімерних і тандемних системах, де морфологічна нестабільність може призвести до пониження ефективності з часом [13–16]. Неefективне перенесення заряду та високі швидкості рекомбінації, особливо неefективної рекомбінації, є постійними проблемами із ОСФЕ. Коротка довжина дифузії екситонів ($\cong 10\text{--}20$ нм) і властивості блокування дірок деяких матеріалів посилюють ці проблеми, зменшуючи коефіцієнт заповнення (FF) й ефективність перетворення енергії (PCE) [17, 18]. Втрати напруги через невідповідність рівнів енергії або неоптимальні інтерфейси ще більше обмежують продуктивність пристрою [19].

2. МАТЕРІАЛИ В ОСФЕ

Процес фотоперетворювання в електричний струм в ОСФЕ складається з п'яти етапів: вбирання падного світла, яке генерує екситони (електронно-діркові пари); дифузія цих екситонів до межі поділу між донором електронів та акцептором електронів; розділення екситонів на цій межі поділу на вільні носії заряду; і, нарешті, перенесення цих зарядів до відповідних електрод, що приводить до виникнення електричного струму. Ефективність кожного з цих процесів тісно пов'язана з властивостями використовуваних органічних матеріалів [8].

Активний шар ОСФЕ, який зазвичай складається із суміші напівпровідникових донорних і акцепторних матеріалів, є основним компонентом, що визначає загальні характеристики продуктивності, включаючи PCE й експлуатаційну стабільність [20]. Сумісність і власні оптоелектронні властивості цих матеріалів активного шару мають першорядне значення для ефективної генерації та збору заряду.

2.1. Акцепторні матеріали в ОСФЕ

Похідні фуллерену. У 1990-х роках було проведено новаторські

дослідження, в результаті яких метиловий ефір фенол-С61 масляної кислоти (PCBM) став високоефективним акцептором електронів у сонячних органічних фотоелементах з об'ємним гетеропереходом (ВНІ), що привело до значного підвищення ефективності перетворення енергії [21, 22]. Згодом був розроблений PC71BM — похідний фуллерену на основі C₇₀, який отримав широке розповсюдження, ставши популярним вибором завдяки своїм поліпшеним характеристикам вбирання у видимій області сонячного спектру [23]. Нижча симетрія та більш протяжний π-зв'язок у C₇₀ сприяють енергетичним переходам, які заборонені в більш симетричній і стабільнішій молекулі C₆₀ [24]. Ранні дослідження продемонстрували успіх змішування полімерних донорів, таких як МЕН-PPV та P3HT, з PCBM, що також привело до значного підвищення ефективності [25]. Фактично суміш P3HT:PCBM стала найбільш ретельно вивченим полімерним матеріалом у галузі ОСФЕ впродовж приблизно двох десятиліть [23]. Це стійке домінування пояснювалося вигідними властивостями похідних фуллерену, включаючи високу рухливість їхніх електронів та загальну сумісність з широким спектром донорних матеріалів [25].

Незважаючи на їхнє історичне значення та початковий успіх, похідні фуллерену, включаючи PC61BM і PC71BM, демонструють притаманні їм обмеження, зокрема їхнє відносно слабе вбирання світла у видимому та близькому інфрачервоному (NIR) діапазонах сонячного спектру, особливо за межами діапазону 500–600 нм [26]. Це обмежене вбирання зменшує кількість сонячного світла, яке може бути ефективно перетворене на електричну енергію [27].

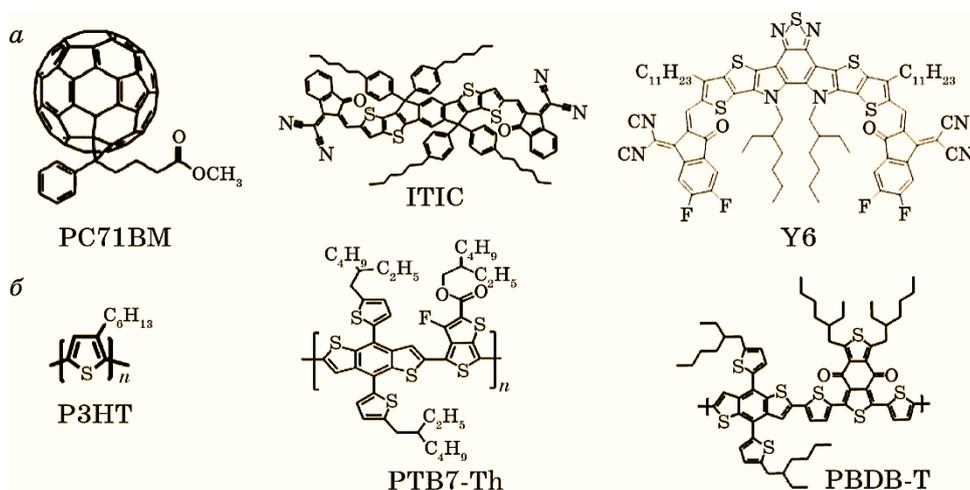


Рис. 1. Еволюція матеріалів в ОСФЕ: акцепторні молекули (а), донорні молекули (б).¹

Високосиметрична структура молекули C_{60} відповідає за заборонені оптичні переходи у видимому діяпазоні, і хоча додавання бічних ланцюгів у РСВМ справді вносить деяке вбирання в цій області (400–700 нм), воно залишається значно слабшим порівняно з сильним вбиранням, що спостерігається в ультрафіолетовому (УФ) діяпазоні [28]. На відміну від цього, РС71ВМ, заснований на менш симетричній молекулі C_{70} , демонструє дещо ширший профіль вбирання у видимому спектрі, що дає змогу збільшити збір фотонів [24]. Однак, навіть з РС71ВМ, основний механізм генерації фотоструму в ОСФЕ на основі фуллерену часто значною мірою залежить від збудження донорного матеріалу, оскільки внесок акцептора у вбирання світла у ключових видимому та близькому інфрачервоному діяпазонах залишається обмеженим [29].

Окрім вузьких спектрів вбирання, акцептори фуллеренів мають кілька інших недоліків. Одним із істотних недоліків є обмежена можливість налаштування їхніх електронних енергетичних рівнів, зокрема енергій найвищої зайнятої молекулярної орбіталі (ВЗМО) та найнижчої вільної молекулярної орбіталі (НЗМО) [29]. Це ускладнює оптимізацію напруги холостого ходу V_{oc} ОСФЕ у поєднанні з різними донорними полімерами, оскільки V_{oc} безпосередньо пов'язаний з вирівнюванням енергетичних рівнів між донором і акцептором [27]. Крім того, фуллерени демонструють схильність до агрегації та кристалізації в активному шарі, що може призвести до морфологічної нестабільності та подальшої деградації пристрою з часом [26]. Ця агрегація може порушити оптимальну нанорозмірну морфологію, необхідну для ефективної дисоціації екситонів [27]. Хоча термічний відпал є поширеним методом, що використовується для поліпшення морфології матеріалу сумішей донорів і фуллеренів, іноді він може призводити до росту небажаних кластерів РСВМ на поверхні плівки [23]. Синтеза фуллеренів та їхніх похідних, особливо гомологів вищих фуллеренів, може бути складною та дорогою, що потенційно суперечить меті низьковитратного виробництва ОСФЕ [23]. Крім того, фуллерени схильні до фотохімічної деградації та нестабільності за певних умов навколишнього середовища, що може вплинути на довгострокову надійність пристроїв ОСФЕ [29]. Зрештою, акцептори фуллерену зазвичай демонструють погані властивості блокування дірок, що може сприяти збільшенню рекомбінації зарядів усередині пристрою, тим самим знижуючи загальну ефективність [30].

Нефуллеренові акцептори (НФА). Поява нефуллеренових акцепторів (НФА) є прямою відповіддю на обмеження, властиві похідним фуллерену, причому основними цілями є досягнення вищої ефективності перетворення енергії та підвищеної стабільності пристрою [20, 31]. Порівняно з фуллеренами, НФА пропонують

кілька ключових переваг. Перш за все, вони демонструють ширше та сильніше вбирання у видимому та близькому інфрачервоному діяпазонах сонячного спектру, що уможливило ефективніше збирати сонячне світло [29, 32]. Крім того, НФА пропонують більшу гнучкість у молекулярному дизайні, що дає змогу точно налаштувати їхні електронні енергетичні рівні (ВЗМО та НЗМО) для досягнення кращої відповідності з різними донорними полімерами й оптимізувати напругу холостого ходу (V_{oc}) [29]. Можливість змінювати енергетичні рівні сприяє мінімізації втрат енергії під час перенесення електронів і максимізації внутрішньої напруги всередині пристрою [27]. У деяких випадках НФА також демонструють потенціал для поліпшеної стабільності, як фотохімічної, так і термічної, порівняно з їхніми фуллереновими аналогами [17, 30], причому деякі дослідження повідомляють про значне збільшення тривалості життя за певних стресових умов навколишнього середовища [33]. Синтеза деяких НФА може бути простішою та менш витратною, ніж синтез фуллеренів, що дає перевагу з точки зору масштабованості виробництва [30]. Більше того, деякі НФА демонструють ефективніші властивості перенесення заряду та ліпшу сумісність із ширшого спектру донорними полімерами [27].

Акцептор на основі індаценодітієнотіофену (IDTT) серії ІТІС виділяється як один з перших дуже успішних нефуллеренових акцепторів. Розроблений у 2015 році ІТІС продемонстрував продуктивність, що перевищувала можливості пристроїв на основі фуллерену [31, 34]. Хемічна структура ІТІС характеризується багатим на електрони індаценодітієнотіофеновим ядром, оточеним електронно-акцепторними кінцевими групами інданону, що приводить до широкого спектру вбирання, який охоплює видиму та близьку інфрачервону області сонячного спектру [31]. Ця специфічна молекулярна архітектура полегшує внутрішньомолекулярне перенесення заряду, що сприяє його ефективній роботі [31]. Початковий РСЕ перетворення енергії, досягнутий за допомогою ІТІС, становив 6,8%, а подальші структурні модифікування та розробка різних похідних, таких як ІТІС-М, ІТІС-2F та ІТІС-Th, привели до подальшого поліпшення продуктивності пристроїв, причому для деяких похідних повідомлялося про РСЕ, що перевищує 12% [35]. Примітно, що ІТІС також демонструє хорошу термостабільність, причому пристрої не демонструють значного погіршення продуктивності після впливу температури у 100°C впродовж 250 годин [36].

Серія нефуллеренових акцепторів Y6 (також відомих як ВТР-4F або ВТР-еС9), що характеризуються своїми конденсованими кільцевими структурами, являє собою ще один значний прорив у цій галузі, що приводить до рекордно високої ефективності пе-

ретворення енергії в ОСФЕ, яка наближається до й навіть перевищує 19% [31]. Молекулярна структура Y6 має конфігурацію акцептор–донор–акцептор (A–DAD–A), що включає електрондефіцитне ядро бензотіадіазолу та сильні електронно-акцепторні кінцеві групи. Така конструкція забезпечує широкий спектр оптичного вбирання, який поширюється далеко в близьку інфрачервону область, сягаючи 1100 нм [37]. Y6 та його похідні пов'язані з високою рухливістю носіїв заряду та низькими втратами енергії під час процесу фотоелектричного перетворення [37, 38]. Для одноперехідних бінарних ОСФЕ, що використовують специфічні похідні Y6, показник ефективності сягнув 18,85% [39].

2.2. Донорні матеріали в органічних сонячних елементах

Полімерні донори. Еволюція полімерних донорів: P3HT, PTV7, D18, PBDB-T, полі(3-гексилтіофен) (P3HT) має історичне значення як один з найбільш широко досліджених полімерних донорів на ранніх стадіях дослідження органічних сонячних фотоелементів [25]. Упродовж приблизно двох десятиліть суміш P3HT:PCBM була найбільш вивченою полімерною комбінацією в цій галузі [23]. P3HT пропонував такі переваги, як можливість нанесення з розчину та відносно хороша рухливість дірок. Однак він також мав обмеження, включаючи відносно широку заборонену зону та вузький діапазон вбирання [25].

Розробка PTV7 та його фторованого аналога PTV7-Th (або PBDDTT-ET) у 2010-х стала значним кроком уперед, що дозволив ОСФЕ подолати бар'єр у 7–8% PCE, а потім — і 10% [25]. PTV7 демонстрував ширший спектр вбирання порівняно з P3HT, завдяки його донорно-акцепторній структурі [29, 40].

Зовсім недавно з'явилися передові полімерні донори, такі як D18 і PBDB-T, яких успішно поєднують з нефуллереновими акцепторами для досягнення високих PCE [9, 41]. Зокрема, PBDB-T активно використовується в поєднанні з високопродуктивними НФА ITIC й Y6 [31]. Їхня конструкція часто включає стратегії push–pull і розширений π -зв'язок для оптимізації збору світла та рухливості заряду [29].

Донори малих молекул. Використання донорів малих молекул (SMD) являється альтернативою полімерним донорам в ОСФЕ [25]. SMD пропонують кілька потенційних переваг, включаючи високу рухливість заряду, термічну стабільність і чітко визначені молекулярні структури, що полегшують очищення та потенційно приводять до ліпшої відтворюваності від партії до партії порівняно з їхніми полімерними аналогами [25]. Різноманітні похідні IDT-Br, IDT-T, IDT-2T та подібні структури, що містять індаценодитіофен, продемонстрували чудову сумісність з НФА. Впрова-

дження цих матеріалів сприяло розвитку різних категорій ОСФЕ, що наносяться з розчину [25, 42, 43]. Включення висококристалічних донорів малих молекул у потрібні органічні системи сонячних фотоелементів виявилось ефективною стратегією для поліпшення перенесення заряду всередині пристрою [31, 41]. **Повністю полімерні сонячні елементи.** Повністю полімерні сонячні елементи представляють собою унікальний клас ОСФЕ, де як донор електронів, так і акцептор електронів є спряженими полімерами [25]. Можливість переробки полімерів з рулону на рулон (Roll-to-Roll) є особливо привабливою для промислового виробництва [20], а можливість створення пристроїв з підвищеною механічною гнучкістю робить їх особливо придатними для застосувань, де гнучкість є ключовою вимогою, як-от у технологіях гнучких дисплеїв [43]. Однак розробка високопродуктивних повністю полімерних сонячних фотоелементів також створює певні труднощі. Однією з істотних перешкод є досягнення збалансованого перенесення заряду в активному шарі, а також контроль морфології суміші для забезпечення ефективної дисоціації екситонів і збору заряду [25]. Незважаючи на ці труднощі, нещодавній прогрес у цій галузі привів до нових розробок повністю полімерних сонячних фотоелементів, які демонструють високу продуктивність, а ефективність перетворення енергії тепер стає порівняною з ефективністю, досягнутою для традиційних ОСФЕ на основі полімер-фуллерену та полімерів з малими молекулами [25], а пошарове оброблення стало перспективним підходом до вирішення морфологічних проблем [17].

3. СТРУКТУРИ Й АРХІТЕКТУРИ ПРИСТРОЇВ ОРГАНІЧНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Критичним чинником, що впливає на продуктивність і стабільність ОСФЕ, є архітектура пристрою. Спосіб структурування різних шарів сонячного фотоелемента та матеріали, що використовуються у кожному шарі, істотно впливають на ефективність вбирання світла, генерації екситонів, розділення зарядів, перенесення зарядів і, зрештою, на загальну ефективність перетворення енергії та термін служби пристрою [44]. Спочатку основною привабливістю ОСФЕ була їхня спроможність низьких виробничих витрат і механічної гнучкості — якостей, які контрастували з усталеними та більш ефективними кремнійовими сонячними елементами [45]. Ранні дослідження, ймовірно, надавали пріоритет новизні органічних матеріалів і простоті оброблення їх, а ефективність була другорядним чинником порівняно з неорганічними технологіями, які вже добре себе зарекомендували. Однак з розвитком цієї галузі, акцент змістився на підвищення продуктивності, що мало зроби-

ти ОСФЕ справді життєздатною альтернативою для ширшого кола застосувань. Розвиток архітектур ОСФЕ від базових одношарових пристроїв до більш складних багатошарових структур безпосередньо відображає постійні зусилля щодо подолання властивих обмежень у фундаментальних процесах, що регулюють перетворення сонячної енергії в органічних матеріалах [44]. Кожен новий архітектурний проект був розроблений і впроваджений для вирішення конкретних проблем, виявлених у попередніх поколіннях, наприклад таких, як неефективна дисоціація екситонів у одношарових комірках й обмежена площа міжфазної поверхні у двошарових структурах.

3.1. Одношарові органічні сонячні фотоелементи

Найдавнішою й концептуально найпростішою конструкцією ОСФЕ є одношаровий сонячний елемент, що складається з однієї плівки органічного напівпровідникового матеріалу, який може функціонувати як донор електронів, так і акцептор електронів, або проявляти амбіполярні транспортні властивості, розміщений між двома електродами з різними роботами виходу [45]. Типовий одношаровий пристрій містить прозору електроду, часто виготовлену з оксиду Індію–Стануму (ІТО), та металеву електроду з нижчою роботою виходу, зокрема алюмінієву, магнієву чи то кальційову [45]. У деяких випадках сам органічний матеріал розроблено так, щоб містити як донорні, так і акцепторні фрагменти в одній молекулі, що забезпечує можливість дисоціації екситонів і перенесення заряду в межах одного матеріалу [45].

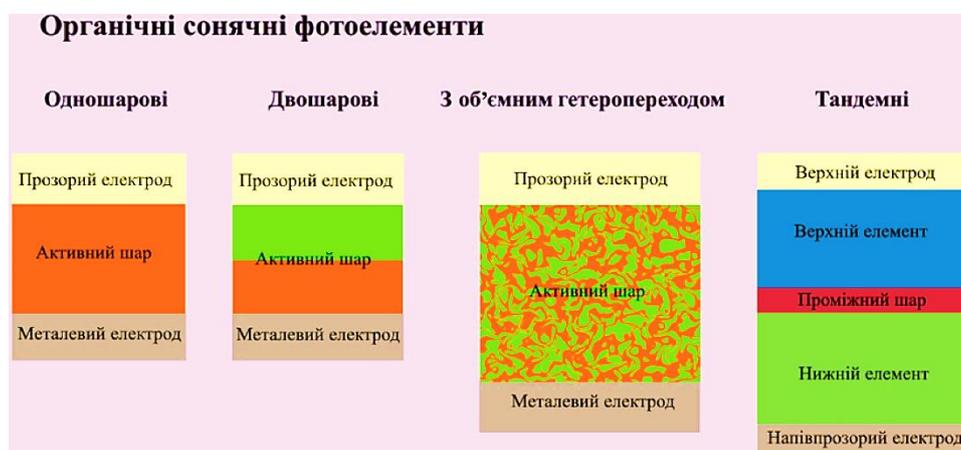


Рис. 2. Еволюція структур органічних сонячних фотоелементів.²

Незважаючи на свою структурну простоту, одношарові ОСФЕ мають значні обмеження, які призводять до дуже низької ефективності перетворення енергії. Однією з основних проблем є неефективність дисоціації екситонів. Електричне поле, що генерується поперек органічного шару, часто занадто слабе, щоб подолати сильну Кулонову енергію зв'язку екситонів, що приводить до високої ймовірності електрон-діркової рекомбінації до того, як може відбутися розділення зарядів [46]. Крім того, коротка довжина дифузії екситонів у більшості органічних матеріалів означає, що екситони, які генеруються далеко від меж електрод, навряд чи досягнуть області, де вони можуть бути ефективно розщеплені [46]. Крім того, використання одного органічного матеріалу часто призводить до відносно вузького спектру вбирання, що обмежує кількість сонячного світла, яке може «зібрати» сонячний елемент [46]. Початковий РСЕ перетворення енергії, досягнутий за допомогою одношарових ОСФЕ, був надзвичайно низьким — порядку 0,01% [44]. З часом досягнення в матеріалознавстві, включаючи розробку нових «double-cable» полімерів і блок-кополімерів, олігомерів і молекул з адаптованою донорно-акцепторною архітектурою, привели до деяких поліпшень. Однак упродовж багатьох років максимальна ефективність залишалася в діапазоні 1,0–1,5%, а нещодавній прогрес підвищив її до 4,0–5,0% для однокомпонентних ОСФЕ (SMOSC) [47]. Примітно, що у 2025 році одношаровий, повністю органічний сонячний фотоелемент досяг рекордної ефективності у 8,7% завдяки використанню високопровідних органічних електрод і спеціалізованого методу ламінування електрод з вуглецевих нанотрубок, що демонструє, що навіть простіші архітектури можуть досягти солідної продуктивності завдяки цілеспрямованим інноваціям [48].

3.2. Двошарові органічні сонячні фотоелементи

Щоб усунути деякі обмеження одношарових ОСФЕ, дослідники розробили двошарові ОСФЕ. Ця архітектура складається з двох окремих органічних шарів: один діє як донор електронів, а інший як акцептор їх [46]. У типовому двошаровому пристрої світло вбирається в одному або в обох органічних шарах, що приводить до утворення екситонів. Ці екситони дифундують у шарі, де вони утворилися, доки не досягнуть межі поділу між шарами. На цьому гетеропереході відбувається розділення зарядів через різницю енергетичних рівнів двох матеріалів. Зокрема, електрони переносяться з донорного шару до акцепторного шару, а дірки залишаються в донорному шарі. Ці розділені носії заряду потім мігрують через відповідні шари до відповідних електрод, де вони збираються для генерації електричного струму [46].

Двошарові ОСФЕ зазвичай демонструють вищу ефективність перетворення потужності порівняно з їхніми одношаровими аналогами, оскільки гетероперехідний інтерфейс забезпечує ефективніше місце для дисоціації екситонів [49]. Зсув енергетичних рівнів на межі поділу між донорним і акцепторним матеріялами забезпечує рушійну силу для розділення зв'язаних електронно-діркових пар, що є ефективнішим, ніж дисоціація, яка досягається слабким електричним полем у одношарових пристроях. Однак двошарові ОСФЕ все ще стикаються з кількома обмеженнями, які понижують їхню загальну продуктивність. Одним із істотних обмежень є площа межі поділу між двома органічними шарами. Дисоціація екситонів відбувається переважно на цій межі поділу, і якщо екситони генеруються далеко від неї, вони можуть рекомбінувати, перш ніж зможуть дифундувати до гетеропереходу через коротку довжину дифузії екситонів у органічних матеріялах [44]. Це обмеження означає, що ефективність лімітовано кількістю екситонів, які можуть досягти межі поділу впродовж свого відносно короткого часу життя. Крім того, для вбирання достатньої кількості падних фотонів може знадобитися збільшити товщину органічних шарів. Однак збільшення товщини може перешкоджати транспорту екситонів до межі поділу донор-акцептор, а також транспорту розділених носіїв заряду до електрод, що призводить до збільшення втрат на рекомбінацію [50]. Інтерфейс між органічними шарами також може представляти енергетичний бар'єр, який екситони мають подолати для дисоціації, що може ще більше обмежувати ефективність розділення зарядів [50]. Хоча попередні двошарові пристрої досягали ефективності близько 1% [49], нещодавні дослідження «псевдодвошарових» ОСФЕ, які містять полімерні ізолятори та використовують ефект зв'язку хвильової функції електронів ізолятор-донор, продемонстрували сертифіковану ефективність до 19,18% [51]. Це вказує на те, що вдосконалена інженерія інтерфейсу та включення додаткових матеріялів можуть значно поліпшити продуктивність ОСФЕ на основі двошарових структур, поліпшуючи рухливість електронів і властивості міжфазного електронного транспорту, що виходить за рамки простих морфологічних ефектів. Крім того, дослідження механізмів передачі енергії, опосередкованих поляритонами, у двошарових конфігураціях показало потенціал для ефективності до 10,1%, що пропонує альтернативні шляхи для поліпшення розділення та збору зарядів у цих пристроях [52].

3.3. ОСФЕ з об'ємним гетеропереходом (ВНІ)

Архітектура органічних сонячних елементів з об'ємним гетеропереходом (ВНІ) стала передовою конструкцією в цій галузі завдя-

ки своїй здатності значно підвищувати ефективність перетворення енергії порівняно з попередніми одношаровими та двошаровими структурами [53]. Ключовою особливістю ВНІ ОСФЕ є активний шар, що складається з об'ємної суміші двох органічних напівпровідникових матеріалів: донора електронів й акцептора електронів [45]. Таке нанорозмірне змішування донорних і акцепторних матеріалів створює дуже велику площу міжфазної поверхні по всій основній частині активного шару [44]. Зазвичай донорним матеріалом є кон'югований полімер або невелика органічна молекула, тоді як акцептором часто є похідна фуллерену або, все частіше, нефуллереновий акцептор (НФА) [54].

У ВНІ ОСФЕ фотони вбираються або донорним, або акцепторним матеріалом, що приводить до генерації екситонів [8]. Завдяки розгалуженій мережі донорно-акцепторних інтерфейсів в активному шарі більшість генерованих екситонів можуть ефективно дифундувати до сусіднього інтерфейсу (зазвичай в межах довжини дифузії екситонів, яка в багатьох органічних матеріалах становить близько 5–10 нм) [51] та дисоціюють на вільні електрони й дірки [46]. Різниця в енергетичних рівнях найнижчих незайнятих молекулярних орбіталей (НЗМО) між донором та акцептором забезпечує необхідну рушійну силу для швидкого перенесення електрона від донора до акцептора на роздільчій межі [53]. Після розділення електрони транспортуються через об'ємну структуру акцепторного матеріалу до катоди, тоді як дірки транспортуються через об'ємну структуру донорного матеріалу до аноди [46]. Таке надшвидке розділення зарядів у ВНІ мінімізує ймовірність рекомбінації зарядів і забезпечує високу внутрішню квантову ефективність [49, 55].

Продуктивність ВНІ ОСФЕ чутлива до нанорозмірної морфології активного шару. Такі чинники, як розмір сполуки та чистота донорної й акцепторної фаз, а також кристалічність матеріалів, відіграють вирішальну роль у визначенні ефективності дисоціації екситонів і перенесення заряду [44]. На цю морфологію сильно впливають вибір матеріалів, розчинник, що використовується для оброблення, метод осадження (наприклад центрифугування), оброблення після осадження, таке як термічний відпал, та вагове співвідношення донорних і акцепторних матеріалів [44]. Досягнення оптимального балансу в морфології об'ємної структури має вирішальне значення; надмірне змішування може призвести до гасіння екситонів, тоді як надмірне розділення фаз може призвести до утворення високих бар'єрів, що перешкоджають перенесенню заряду [44]. Крім того, енергія зв'язку екситонів в органічних матеріалах є доволі істотною та вимагає включення акцепторних молекул для полегшення генерації вільних носіїв заряду [53].

3.4. Потрійні органічні сонячні фотоелементи

Щоб ще більше поліпшити продуктивність органічних сонячних елементів, виходячи за межі бінарних структур ВНІ, дослідники досліджували більш складні архітектури, включаючи потрійні органічні сонячні елементи. Ці пристрої передбачають додавання третього компонента до активного шару ОСФЕ ВНІ, який може бути або другим донорним матеріалом, або другим акцепторним матеріалом, або домішкою з малих молекул [56]. Основними причинами для використання потрійної суміші є поліпшення збору фотонів шляхом розширення спектру вбирання активного шару та/або поліпшення властивостей перенесення заряду всередині пристрою [56]. Потрійні ОСФЕ мають на меті поєднати переваги поліпшеного вбирання світла, подібного до того, що досягається у тандемних сонячних елементах, з відносно простим процесом виготовлення одноперехідних пристроїв ВНІ [56].

Кілька робочих механізмів сприяють поліпшеній продуктивності, що спостерігається у потрійних ОСФЕ. Одним з механізмів є передача енергії, коли третій компонент вбирає фотони в області сонячного спектру, де первинний донор й акцептор мають слабе вбирання. Ця увібрана енергія потім передається або донору, або акцептору, що приводить до збільшення генерації носіїв заряду [57]. Ця передача енергії часто відбувається через процес, який називається передачею енергії резонансу (FRET) [58]. Інший механізм включає каскад перенесення заряду, де третій компонент вводить проміжні енергетичні рівні, зокрема найвищу зайняту молекулярну орбіталь (ВЗМО) та найнижчу незайняту молекулярну орбіталь (НЗМО), які розташовані між рівнями первинного донора й акцептора. Це створює ступінчастий енергетичний каскад, який сприяє ефективнішій дисоціації екситонів і перенесенню носіїв заряду [58, 59]. У деяких потрійних системах третій компонент може утворювати молекулярний стоп з донорним або акцепторним матеріалом. Таке легування може змінювати енергетичні рівні матеріалу-господаря та потенційно поліпшувати перенесення заряду, створюючи більш сприятливий енергетичний ландшафт в активному шарі [57, 60]. Третій компонент також може діяти як модулятор морфології, впливаючи на фазовий поділ і поведінку кристалізації первинного донора й акцептора в суміші ВНІ. Це може привести до формування більш оптимізованої нанорозмірної морфології з ліпше визначеними шляхами перенесення заряду та зменшеною рекомбінацією [57, 61]. Високоефективні потрійні ОСФЕ продемонстрували ефективність перетворення енергії, що перевищує 19%, завдяки різним стратегіям оптимізації, включаючи ретельний вибір третього компонента для оптимізації молекулярної орієнтації та тривимірного перенесення

заряду [62–65]. Теоретичні прогнози навіть припускають можливість досягнення 20%-ефективності за допомогою ретельно розроблених потрійних структур [65]. Потрійні системи зараз визнано одними з найліпших органічних сонячних елементів, доступних на даний момент [58].

3.5. Тандемні органічні сонячні фотоелементи

Щоб подолати обмеження ефективності, властиві одноперехідним ОСФЕ, навіть тим, що мають розвинений об'ємний гетероперехід або потрійну архітектуру, дослідники звернулися до тандемних органічних сонячних елементів. Для більш ефективного збору у ширшому діапазоні сонячного спектру та зменшення втрат енергії цей підхід передбачає розміщення двох або більше елементів з різними спектрами вбирання один на одному [56]. У типовому тандемному ОСФЕ верхній елемент розроблений з матеріалу з ширшою забороненою зоною, який вбирає фотони високої енергії (короткохвильова область спектру), водночас пропускаючи фотони нижчої енергії (довгохвильова область спектру) до нижнього елемента, який виготовлений з матеріалу з вузькою забороненою зоною [66]. Ця стратегія дає змогу повніше використовувати спектер сонячного випромінювання порівняно з одношаровими ОСФЕ, де значна частина сонячної енергії може втрачатися, оскільки фотони або не вбираються (якщо їхня енергія нижче ширини забороненої зони), або їхня надлишкова енергія перетворюється на тепло [66].

Тандемні органічні сонячні елементи можуть бути виготовлені у двох основних конфігураціях: двополюсній ($2T$) і чотириполюсній ($4T$). У двополюсних ($2T$) тандемних елементах субелементи монолітно інтегровано та з'єднано послідовно через інтерфейсний шар (ICL) [66]. Для оптимальної продуктивності густина струму, що генерується кожним елементом, має бути точно узгодженою, оскільки загальний струм, що протікає через пристрій, обмежений тим елементом, який виробляє найнижчий струм. Напруга холостого ходу (V_{oc}) тандемної гетероструктури $2T$ приблизно дорівнює сумі V_{oc} окремих елементів (за вирахуванням будь-яких втрат напруги, які можуть виникнути в ICL) [66]. Виготовлення тандемних гетероструктур $2T$ може бути складним, зокрема з'єднувальний шар, який має сприяти ефективній рекомбінації зарядів між окремими елементами, має бути прозорим, щоб світло могло ефективно досягати нижнього елемента [67]. Оптимізація товщини активного шару в кожному елементі також має вирішальне значення, особливо для досягнення узгодження струму в $2T$ -пристроях [68]. У чотириполюсних ($4T$) тандемних гетероструктурах окремі елементи працюють незалежно та механічно ро-

зташовані один на одному [67]. Кожен елемент має власний набір електрод, а їхні електричні виходи можна комбінувати ззовні. Така конфігурація не вимагає узгодження струмів між елементами, що потенційно спрощує створення прототипів і робить їх менш чутливими до точних комбінацій заборонених зон, вибраних для елементів [66]. Тандемні гетероструктури 4T мають втрати від паразитного вбирання та відбивання від додаткових напівпрозорих електрод, необхідних для верхнього елемента. Теоретична межа ефективності для одноперехідного неорганічного сонячного фотоелемента становить близько 33%, а для тандемного неорганічного фотоелемента вона може сягати приблизно 42% [67]. Тандемний сонячний фотоелемент, який поєднував перовськітні й органічні матеріяли, досяг рекордної ефективності у 25,7% [69]. Інша тандемна гетероструктура, що використовує селенід Сурми та перовськітний матеріял, також перевищила 20%-ефективність [70]. Перовськітно-органічний тандемний сонячний фотоелемент CsPbI₂Br D18:Y6 досяг рекордного PCE у 20,18% [71]. Крім того, тандемний ОСФЕ на основі потрійного активного шару досяг сертифікованого PCE у 20,3% (зафіксовано 20,6%) завдяки застосуванню стратегії зменшення втрат напруги [59].

3.6. Функціональні шари

Функціональні шари, які розміщуються між активним шаром та електродами, є одними з ключових компонентів ОСФЕ [53]. Ці тонкі шари виконують кілька важливих функцій. Вони використовуються для регулювання роботи виходу електрод, забезпечуючи ліпше узгодження енергетичних рівнів з матеріялами активного шару (донором і акцептором), що сприяє ефективнішому «введенню та вилученню» носіїв заряду (електронів і дірок) [53]. Функціональні шари також відіграють важливу роль у поліпшенні селективності заряду, блокуючи потік небажаних носіїв заряду до відповідних електрод, тим самим зменшуючи втрати на рекомбінацію [72]. Крім того, вони можуть допомогти у формуванні омичних контактів на інтерфейсах, мінімізуючи контактний опір і забезпечуючи плавний потік струму [53]. У деяких випадках функціональні шари можуть навіть впливати на морфологію фотоактивного шару під час його осадження, що приводить до поліпшення характеристик пристрою [72]. Особливо ефективна стратегія передбачає включення дипольного проміжного шару, який може створити різкий зсув в електронній зонній структурі по всій поверхні поділу, що дає змогу точно налаштувати транспорт носіїв заряду [73].

Залежно від їхньої функції, функціональні шари загалом класифікуються на електронно-транспортні шари (ETL) і дірково-

транспортні шари (HTL).

ETL розташовано між акцепторним матеріалом активного шару та катодою. Їхня основна функція полягає в інжекції та транспортуванні електронів до катоди, водночас ефективно блокуючи транспортування дірок [72]. Звичайні матеріали, що використовуються як ETL, включають оксиди металів *n*-типу, такі як оксид Цинку (ZnO), діоксид Титану (TiO₂) та діоксид Стануму (SnO₂) [53]. Ці оксиди є ефективними завдяки їхній відповідній роботі виходу, високій рухливості електронів, відповідній оптичній прозорості, термічній і хемічній стабільності, легкості технології осадження [53]. Органічні низькомолекулярні сполуки, такі як тетраціаноетилен (TCNE), також можуть бути використані для модифікування поверхні ETL на основі оксидів металів, пасивуючи поверхневі дефекти та поліпшуючи функціональний контакт, тим самим зменшуючи рекомбінацію зарядів [74]. Крім того, використання наноструктур оксидів металів, таких як наночастинки та нанострижні, може збільшити площу поверхні, доступну для переміщення заряду, що приводить до поліпшення транспорту електронів [75].

HTL розміщено між донорним матеріалом активного шару й анодою. Основна роль їх полягає в інжекції та транспортуванні дірок до аноди, запобігаючи транспорту електронів [72]. Використовуваним HTL-матеріалом, особливо для звичайних структур пристроїв, є полімер полі(3,4-етилендіокситіофен):полі(стиролсульфонова кислота) (PEDOT:PSS) [53], який забезпечує хорошу електропровідність, оптичну прозорість і може бути нанесений з розчину. Для інвертних структур пристроїв оксиди металів, такі як оксид Молибдену (MoO_x), оксид Вольфраму (WO_x), оксид Ванадію (VO_x) й оксид Ніклю (NiO_x), зазвичай використовуються як HTL завдяки їхній високій роботі виходу й ефективним можливостям блокування електронів [72]. Ці оксиди металів можна осаджувати за допомогою таких методів, як термічне осадження або нанесення з розчину. Органічні молекули, такі як 2,3,5,6-тетрафтор-7,7,8,8-тетраціанохінодиметан (F4-TCNQ), можна використовувати для точного налаштування роботи виходу HTL для досягнення кращої інжекції дірок [76, 77].

Крім того, в дослідженнях ОСФЕ спостерігається тенденція до розробки функціональних шарів, які не тільки поліпшують збирання заряду, але й сприяють загальній стабільності пристрою [53]. Наприклад, деякі функціональні матеріали також можуть виступати бар'єром проти проникнення вологи та кисню, забезпечуючи додатковий шар захисту для активних органічних шарів, які чутливі до руйнування навколишнім середовищем. Ця подвійна функціональність може привести до значного поліпшення як продуктивності, так і довгострокової надійності ОСФЕ.

4. ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ ОСФЕ

Перспективи найближчого розвитку в галузі ОСЕ є багатообіцяючими. Їх зосереджено на вирішенні ключових викликів і перетворенні лабораторних досягнень на комерційні продукти.

НФА, такі як ITIC й Y6, революціонізували продуктивність ОСФЕ, вможлививши досягнення показника PCE, що наближається до 20% у сонячних фотоелементах з одним переходом [9, 12]. Ці матеріали пропонують широке вбирання, регульовані рівні енергії та поліпшену стабільність порівняно з фуллеренами. Наприклад, система D18:Y6 досягла PCE у 19,2% завдяки оптимізованій морфології та зменшеним втратам енергії [9]. Поточні дослідження зосереджено на молекулярній інженерії для подальшого поліпшення вбирання, рухливості заряду та фотохімічної стабільності, причому НФА зі структурою A- π -A є особливо перспективними [78].

Тандемні ОСФЕ, які об'єднують піделементи з комплементарними спектрами вбирання, досягли ефективності, що перевищує 20%, причому перовскітно-органічні тандеми сягають 25,7% [69, 71]. Наприклад, тандемна гетероструктура CsPbI₂Br:PM6:Y6 досягла PCE у 25,1% шляхом поєднання широкозонного перовскітного матеріалу з вузькозонним органічним шаром [79]. Потрійні ОСФЕ, що включають третій компонент, також продемонстрували ефективність, що наближається до 20% [79]. Ці архітектури є критично важливими для подолання обмежень пристроїв з одним переходом.

Досягнення в донорних полімерах, таких як D18 і PBDB-T, та інтерфейсних шарах, таких як ZnO та MoO₃, теж привели до поліпшення збирання заряду та стабільності пристроїв [72, 74]. Наприклад, оптимізація шарів для перенесення дірок (HTL), таких як NiO_x, і шарів для перенесення електронів (ETL), таких як ZnO, зменшила втрати на рекомбінацію та поліпшила термін служби пристроїв [72].

Технології виготовлення, такі як рулонне оброблення та струменевий друк, мають потенціал для економічно ефективного виробництва на великих площах [15]. Нещодавні дослідження продемонстрували можливість масштабування виробництва ОСФЕ зі збереженням високої ефективності, особливо для повністю полімерних систем, які пропонують надійну морфологію плівки [16]. Оптимізація цих методів для забезпечення стабільної продуктивності у великих масштабах є ключовим напрямом для комерціалізації в найближчій перспективі.

Поліпшення довгострокової стабільності ОСФЕ є важливим для практичного застосування. Досягнення в розробці матеріалів, таких як стабільні НФА, та розробка надійних методів інкапсу-

ляції є ключовими стратегіями для зменшення деградації [11]. Наприклад, дослідження повідомляли про ОСФЕ з екстрапольованим терміном служби, що перевищує кілька десятиліть, що досягнуто завдяки оптимізованим функціональним шарам і захисним покриттям [10].

Інтеграція ОСФЕ з іншими фотоелектричними технологіями, такими як перовськітні сонячні елементи, пропонує шлях до вищої ефективності та поліпшеної стабільності. Перовськітно-органічні тандеми, що поєднують широкозонні перовськітні матеріали, такі як CsPbI_2Br , з органічними шарами, такими як PM6:Y6 , продемонстрували РСЕ у понад 25% [70, 79]. Ці гібридні пристрої використовують сильні сторони обох класів матеріалів, що робить їх перспективним напрямом для майбутнього розвитку.

5. ВИСНОВОК

ОСФЕ пройшли значний шлях від самого початку до технології, що демонструє лабораторну ефективність у понад 20%. Цей прогрес зумовлено революційними досягненнями у матеріалознавстві, зокрема розробкою ефективних нефуллеренових акцепторів (НФА) та вдосконаленням полімерних донорів. Еволюція архітектур пристроїв від простих одношарових до складних об'ємних гетеропереходів (ВНН), потрібних і тандемних конфігурацій, також відіграла вирішальну роль у максимізації «збору» світла й ефективності перетворення енергії. Притаманні ОСФЕ переваги, такі як легка вага, гнучкість, напівпрозорість і потенціал для низьковитратного великомасштабного виробництва за допомогою методів нанесення з розчинів, роблять їх надзвичайно привабливою альтернативою традиційним фотоелектричним технологіям.

Однак, незважаючи на ці вражаючі досягнення, ОСФЕ все ще стикаються з критичними викликами, що перешкоджають широкій комерціалізації їх. До них відносяться подальше підвищення ефективності для конкуренції з неорганічними аналогами, вирішення проблем довгострокової стабільності в реальних умовах експлуатації, точний контроль нанорозмірної морфології активного шару, розширення спектру вбирання та масштабування виробництва без шкоди для продуктивності. Подолання цих перешкод є ключовим для реалізації повного потенціалу ОСФЕ як життєздатного джерела відновлюваної енергії.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. K. Attanayake, I. Wickramage, U. Samarasinghe, Y. Ranmini, S. Ehalapitiya,

- R. Jayathilaka, and S. Yapa, *PLoS ONE*, **19**, Iss. 6: e0299807 (2024); <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299807>
2. ‘What is the sustainable energy transition and why is it key to tackling climate change?’, *UNDP Climate Promise* (n.d.) (2024); <https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/what-sustainable-energy-transition-and-why-it-key-tackling-climate-change>
 3. Martin, ‘Climate Change’, *United Nations Sustainable Development* (n.d.); <https://www.un.org/sustainabledevelopment/climate-change/>
 4. U. Nations, ‘Renewable Energy — Powering a Safer Future’, *United Nations* (n.d.); <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
 5. ‘Net Zero by 2050’, *IEA* (n.d.) (2021); <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
 6. Neeraj Pandey and Amit Shrivastava, *JoMSD*, **12**, Iss. 01: 1 (2025); <https://journals.stmjournals.com/jomsd/article=2025/view=197523/>
 7. C. Bates, *Solar Reviews* (2024); <https://www.solarreviews.com/blog/organic-solar-cells>
 8. Yang Li, Wei Huang, Dejiang Zhao, Lu Wang, Zhiqiang Jiao, Qingyu Huang, Peng Wang, Mengna Sun, and Guangcai Yuan, *Molecules*, **27**, No. 6: 1800 (2022); <https://doi.org/10.3390/molecules27061800>
 9. Lei Zhu, Ming Zhang, Jinqiu Xu, Chao Li, Jun Yan, Guanqing Zhou, Wenkai Zhong, Tianyu Hao, Jiali Song, Xiaonan Xue, Zichun Zhou, Rui Zeng, Haiming Zhu, Chun-Chao Chen, Roderick C. I. MacKenzie, Yecheng Zou, Jenny Nelson, Yongming Zhang, Yanming Sun, and Feng Liu, *Nature Materials*, **21**, No. 6: 656 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41563-022-01244-y>
 10. Xiang Xu, Dongxu Li, Jun Yuan, Yonghua Zhou, and Yingping Zou, *Energy Chem.*, **3**, No. 1: 100046 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.enchem.2020.100046>
 11. P. Ding, D. Yang, S. Yang, and Z. Ge, *Chemical Society Reviews*, **53**, No. 5: 2350 (2024); <https://doi.org/10.1039/D3CS00492A>
 12. Jiehao Fu, Qianguang Yang, Peihao Huang, Sein Chung, Kilwon Cho, Zhipeng Kan, Heng Liu, Xinhui Lu, Yongwen Lang, Hanjian Lai, Feng He, Patrick W. K. Fong, Shirong Lu, Yang Yang, Zeyun Xiao, and Gang Li, *Nature Communications*, **15**, No. 1: 1830 (2024); <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46022-3>
 13. Shiyan Zhu, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, **125**: 155 (2025); <https://doi.org/10.54097/ak4vgb06>
 14. Chen Yang, Qiao Wang, Yufa Hou, Yifan Yang, Wenfei Shen, and Jianguo Tang, *Energy & Fuels*, **39**, No. 18: 8706 (2025); <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c00715>
 15. Mitsunori Nagahara, Huynh Thi Cam Tu, and Keisuke Ohdaira, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **64**, No. 6: 06SP05 (2025); <https://doi.org/10.35848/1347-4065/add168>
 16. Weitao Qi, Xiyue Yuan, Yuanqi Liu, Shutao Yang, Yunsha Chu, Fan Qian, Lingpeng Yan, Zhenguo Wang, Chunhui Duan, Qun Luo, and Chang-Qi Ma, *Science China Materials*, **68**, No. 5: 1435 (2025); <https://doi.org/10.1007/s40843-024-3156-6>
 17. Ardalan Armin, Wei Li, Oskar J. Sandberg, Zuo Xiao, Liming Ding, Jenny Nelson, Dieter Neher, Koen Vandewal, Safa Shoaee, Tao Wang, Harald Ade, Thomas Heumüller, Christoph Brabec, and Paul Meredith, *Advanced Energy Materials* **11**, No. 15: 2003570 (2021); <https://doi.org/10.1002/aenm.202003570>
 18. Nan Wei, Yawen Guo, Haoming Song, Yahui Liu, Hao Lu, and Zhishan Bo,

- ChemSusChem.*, **18**, No. 6: e202402169 (2025);
<https://doi.org/10.1002/cssc.202402169>
19. Kang An, Wenkai Zhong, Feng Peng, Wanyuan Deng, Ying Shang, Huilei Quan, Hong Qiu, Cheng Wang, Feng Liu, Hongbin Wu, Ning Li, Fei Huang, and Lei Ying, *Nature Communications*, **14**: 2688 (2023);
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-38306-x>
 20. Wen-Shuo Du, Gong Wang, Yun-Fei Li, and Yu Yu, *Frontiers in Physics*, **12**: 1378909 (2024); <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1378909>
 21. G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, and A. J. Heeger, *Science*, **270**, No. 5243: 1789 (1995); <https://doi.org/10.1126/science.270.5243.1789>
 22. Jan C. Hummelen, Brian W. Knight, F. LePeq, Fred Wudl, Jie Yao, and Charles L. Wilkins, *J. Org. Chem.*, **60**, No. 3: 532 (1995);
<https://doi.org/10.1021/jo00108a012>
 23. P. R. Berger and M. Kim, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **10**, No. 1: 013508 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5012992>
 24. Amit Kumar, Smrity Ratan, Deepak Kumar Jarwal, Ashwini Kumar Mishra, Chandan Kumar, Abhinav Pratap Singh, Bratindranath Mukherjee, and Satyabrata Jit, *Mater. Res. Express*, **6**, No. 11: 115514 (2019);
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4708>
 25. Jicheng Yi, Guangye Zhang, Han Yu, and He Yan, *Nature Reviews Materials*, **9**, No. 1: 46 (2023); <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00618-1>
 26. Ramasamy Ganesamoorthy, Govindasamy Sathiyam, and Pachagounder Sakthivel, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **161**: 102 (2017);
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.11.024>
 27. Christian B. Nielsen, Sarah Holliday, Hung-Yang Chen, Samuel J. Cryer, and Iain McCulloch, *Accounts of Chemical Research*, **48**, No. 11: 2803 (2015);
<https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00199>
 28. Hemlata Bisht, Abhinav Pratap Singh, Satyabrata Jit, and Hirdyesh Mishra, *Journal of Luminescence*, **258**: 119808 (2023);
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.119808>
 29. Andrew Wadsworth, Maximilian Moser, Adam Marks, Mark S. Little, Nicola Gasparini, Christoph J. Brabec, Derya Baran, and Iain McCulloch, *Chemical Society Reviews*, **48**, No. 6: 1596 (2019);
<https://doi.org/10.1039/C7CS00892A>
 30. *Fullerene vs Non-Fullerene Acceptors for OPVs (Ossila)*;
<https://www.ossila.com/pages/fullerene-vs-non-fullerene-acceptors>
 31. *Application of Non-Fullerene Acceptors in Organic Solar Cells (Ossila)*;
<https://www.ossila.com/pages/non-fullerene-acceptors-in-organic-solar-cells>
 32. Bei Wang, Yingying Fu, Chi Yan, Rui Zhang, Qingqing Yang, Yanchun Han, and Zhiyuan Xie, *Frontiers in Chemistry*, **6**: Article 198 (2018);
<https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00198>
 33. Emily M. Speller, Andrew J. Clarke, Nicholas Aristidou, Mark F. Wyatt, Laia Francas, George Fish, Hyojung Cha, Harrison Ka Hin Lee, Joel Luke, Andrew Wadsworth, Alex D. Evans, Iain McCulloch, Ji-Seon Kim, Saif A. Haque, James R. Durrant, Stoichko D. Dimitrov, Wing C. Tsoi, and Zhe Li, *ACS Energy Letters*, **4**, No. 4: 846 (2019);
<https://doi.org/10.1021/acsenergylett.9b00109>
 34. Wei Liu, Xiang Xu, Jun Yuan, Mario Leclerc, Yingping Zou, and Yongfang Li, *ACS Energy Letters*, **6**, No. 2: 598 (2021);

- <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.0c02384>
35. *ITIC & Derivatives as OPV Acceptors (Ossila)*; <https://www.ossila.com/pages/itic-and-derivatives-as-opv-acceptors>
 36. *ITIC (Ossila)*; <https://www.ossila.com/products/itic>
 37. *Y6 in Solar Cells: Structure, Benefits, Alternatives and Donors (Ossila)*; <https://www.ossila.com/pages/what-are-y6-acceptors>
 38. *Y6, BTP-4F (Ossila)*; <https://www.ossila.com/products/y6>
 39. Congqi Li, Xiaobin Gu, Zhihao Chen, Xiao Han, Na Yu, Yanan Wei, Jinhua Gao, Hao Chen, Meng Zhang, Ao Wang, Jianqi Zhang, Zhixiang Wei, Qian Peng, Zheng Tang, Xiaotao Hao, Xin Zhang, and Hui Huang, *Journal of the American Chemical Society*, **144**, No. 32: 14731 (2022); <https://doi.org/10.1021/jacs.2c05303>
 40. Feng Liu, Wei Zhao, John R. Tumbleston, Cheng Wang, Yu Gu, Dong Wang, Alejandro L. Briseno, Harald Ade, and Thomas P. Russell, *Advanced Energy Materials*, **4**, No. 5: 1301377 (2014); <https://doi.org/10.1002/aenm.201301377>
 41. Miao Zhang, Jian Wang, Qiaoshi An, Xiaoling Ma, Zhenghao Hu, Jianxiao Wang, and Fujun Zhang, *World Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **1**: Article 1002 (2018); <https://www.medtextpublications.com/open-access/development-history-of-ternary-organic-solar-cells-47.pdf>
 42. *What Are Non-Fullerene Acceptors? (Ossila)*; <https://www.ossila.com/pages/what-are-non-fullerene-acceptors>
 43. Haruto Maruhashi, Takeo Oku, Atsushi Suzuki, Tsuyoshi Akiyama, and Yasuhiro Yamasaki, *AIP Conf. Proc.*, **1649**: 89 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4913550>
 44. Peixi Wu, Yuwei Duan, Yinfeng Li, Xiaopeng Xu, Ruipeng Li, Liyang Yu, and Qiang Peng, *Advanced Materials*, **36**, No. 3: 2306990 (2024); <https://doi.org/10.1002/adma.202306990>
 45. Ebru Kondolot Solak and Erdal Irmak, *RSC Advances*, **13**, No. 18: 12244 (2023); <https://doi.org/10.1039/D3RA01454A>
 46. Yesh Desh, *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, **11**, Iss. 06: 38 (2024); <https://www.aarf.asia/current/2024/Jul/zFkL1fEYjmFp0J2.pdf>
 47. Jean Roncali and Ion Grosu, *Advanced Science*, **6**, No. 1: 1801026 (2018); <https://doi.org/10.1002/advs.201801026>
 48. *Scientists Fabricate All-Organic Solar Cell with Record 8.7% Efficiency (PV Magazine International)*; <https://www.pv-magazine.com/2025/05/02/scientists-fabricate-all-organic-solar-cell-with-record-8-7-efficiency/>
 49. Fatima H. Malk, Alyaa Abdul Hasan Abdul Kareem, and E. H. Al-Tememe, *MINAR International Journal of Applied Sciences and Technology*, **4**, No. 4: 174 (2022); <https://doi.org/10.47832/2717-8234.13.16>
 50. J. Bellino, *Organic Solar Cells. Engineering LibreTexts* (Davis: University of California, Department of Chemical Engineering and Materials Science: 2016); [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Materials_and_Devices/Organic_Solar_Cells](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Materials_and_Devices/Organic_Solar_Cells)
 51. Kui Jiang, Jie Zhang, Zhengxing Peng, Francis Lin, Shengfan Wu, Zhen Li, Yuzhong Chen, He Yan, Harald Ade, Zonglong Zhu, and Alex K.-Y. Jen, *Nature Communications* **12**: Article No. 468 (2021);

- <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20791-z>
52. Suraj Manikandan, Dominik Bäuerle, Eswaran Jayaraman, Elisabet Romero, Morten Madsen, and Jens Wenzel Andreasen, *ChemRxiv*, **2**: version 1 (2024); <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-dmd61>
 53. M. C. Scharber and N. S. Sariciftci, *Progress in Polymer Science*, **38**, No. 12: 1929 (2013); <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.001>
 54. *Organic Solar Cells: An Introduction to Organic Photovoltaics (Ossila)*; <https://www.ossila.com/pages/organic-photovoltaics-introduction>
 55. Yujuan Huang, Longlong Zhang, and Yuying Hao, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **23**, No. 39: 22685 (2021); <https://doi.org/10.1039/D1CP03686F>
 56. Qiaoshi An, Fujun Zhang, Jian Zhang, Weihua Tang, Zhenbo Deng, and Bin Hu, *Energy & Environmental Science*, **9**, No. 2: 281 (2016); <https://doi.org/10.1039/C5EE02641E>
 57. *Introduction to Ternary Organic Solar Cells (Ossila)*; <https://www.ossila.com/pages/intro-to-ternary-organic-solar-cells>
 58. Marcella Günther, Negar Kazerouni, Dominic Blütte, Jose Dario Perea, Barry C. Thompson, and Tayebbeh Ameri, *Nature Reviews Materials*, **8**, No. 7: 456 (2023); <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00545-1>
 59. Jianqiu Wang, Zhong Zheng, Pengqing Bi, Zhihao Chen, Yafei Wang, Xiaoyu Liu, Shaoqing Zhang, Xiaotao Hao, Maojie Zhang, Yongfang Li, and Jianhui Hou, *National Science Review*, **10**, No. 6: nwad085 (2023); <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad085>
 60. Hongtao Wang, Zhuohan Zhang, Jiangsheng Yu, Po-Chen Lin, Chu-Chen Chueh, Xin Liu, Shun Guang, Shenya Qu, and Weihua Tang, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, No. 19: 21633 (2020); <https://doi.org/10.1021/acsami.0c03484>
 61. Xiaoling Ma, Anping Zeng, Jinhua Gao, Zhenghao Hu, Chunyu Xu, Jae Hoon Son, Sang Young Jeong, Caixia Zhang, Mengyang Li, Kai Wang, He Yan, Zaifei Ma, Yongsheng Wang, Han Young Woo, and Fujun Zhang, *National Science Review*, **8**, No. 8: nwaa305 (2021); <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa305>
 62. Bing Zheng, Xiaoling Ma, Yuchen Yue, Wenhao Peng, Han Shen, Fujun Zhang, Jingxia Wang, Panfeng Gao, and Lijun Huo, *Advanced Functional Materials*, **35**, Iss. 33: 2500148 (2025); <https://doi.org/10.1002/adfm.202500148>
 63. Xu Ding and Zhenye Li, *Journal of Polymer Science*, **61**, No. 23: 3022 (2023); <https://doi.org/10.1002/pol.20230432>
 64. Donghwan Yun, Song Xuyao, Seul-Yi Lee, Vivek Vishal Sharma, Huan Li, Soo-Jin Park, Yun-Hi Kim, and Gi-Hwan Kim, *ACS Applied Energy Materials* **7**, No. 3: 1243 (2024); <https://doi.org/10.1021/acsaem.3c02876>
 65. Ruijie Ma, Cenqi Yan, Jiangsheng Yu, Tao Liu, Heng Liu, Yuhao Li, Jian Chen, Zhenghui Luo, Bo Tang, Xinhui Lu, Gang Li, and He Yan, *ACS Energy Letters*, **7**, No. 8: 2547 (2022); <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.2c01364>
 66. *Tandem Solar Cell (Ossila)*; <https://www.ossila.com/pages/tandem-solar-cells>
 67. Brianna L. Greenstein and Geoffrey R. Hutchison, *The Journal of Physical Chemistry C*, **127**, No. 13: 6179 (2023); <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c00267>
 68. Jan A. Mayer, Ton Offermans, Marek Chrapa, Martin Pfannmöller, Sara Bals, Rolando Ferrini, and Giovanni Nisato, *Optics Express*, **26**, No. 6: A240 (2018); <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A240>
 69. Xin Jiang, Shucheng Qin, Lei Meng, Guorui He, Jinyuan Zhang, Yiyang Wang, Yiqiao Zhu, Tianwei Zou, Yufei Gong, Zekun Chen, Guangpei Sun, Minchao

- Liu, Xiaojun Li, Felix Lang, and Yongfang Li, *Nature*, **635**, No. 8040: 860 (2024); <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08160-y>
70. Zhiyuan Cai, Jia Sun, Huiling Cai, Yuehao Gu, Rongfeng Tang, Changfei Zhu, Paifeng Luo, and Tao Chen, *Energy Materials and Devices*, **2**, No. 1: 9370027 (2024); <https://doi.org/10.26599/EMD.2024.9370027>
71. Ling Liu, Zuo Xiao, Chuantian Zuo, and Liming Ding, *Journal of Semiconductors*, **42**, No. 2: 020501 (2021); <https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/2/020501>
72. Cinthya Anrango-Camacho, Karla Pavyn-Ipiales, Bernardo A. Frontana-Uribe, and Alex Palma-Cando, *Nanomaterials*, **12**, No. 3: 443 (2022); <https://doi.org/10.3390/nano12030443>
73. Qi Chen, Cheng Wang, Yaowen Li, and Liwei Chen, *Journal of the American Chemical Society*, **142**, No. 43: 18281 (2020); <https://doi.org/10.1021/jacs.0c07439>
74. Md. Aatif and J. P. Tiwari, *RSC Advances*, **10**, No. 69: 42305 (2020); <https://doi.org/10.1039/D0RA08093D>
75. Yuxin Wang and Sin Tee Tan, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, **12**: 99 (2022); <https://doi.org/10.54097/hset.v12i.1411>
76. Tianyu Kong, Genjie Yang, Pu Fan, and Junsheng Yu, *Polymers*, **15**, No. 8: 1875 (2023); <https://doi.org/10.3390/polym15081875>
77. Yujie Xu, Hang Zhou, Pengyi Duan, Baojie Shan, Wenjing Xu, Jian Wang, Mei Liu, Fujun Zhang, and Qianqian Sun, *Molecules*, **27**, No. 19: 6363 (2022); <https://doi.org/10.3390/molecules27196363>
78. Wei Liu, Jun Yuan, Can Zhu, Qingya Wei, Songting Liang, Huotian Zhang, Guan haojie Zheng, Yunbin Hu, Lei Meng, Feng Gao, Yongfang Li, and Yingping Zou, *Science China Chemistry*, **65**, No. 7: 1374 (2022); <https://doi.org/10.1007/s11426-022-1281-0>
79. Yu Han, Jiehao Fu, Zhiwei Ren, Jiangsheng Yu, Qiong Liang, Zhihang Xu, Xiyun Xie, Dongyang Li, Ruijie Ma, Menghua Cao, Yonggui Sun, Chen Yang, Jiaqi He, Xiaoming Chang, Kuan Liu, Patrick W. K. Fong, Jiaming Huang, Heng Liu, Zhike Liu, Dongfang Xu, Lei Cheng, Ji Yao Zhang, Guang Yang, Xinhui Lu, Ye Zhu, Qidong Tai, Qianqian Lin, Hanlin Hu, Yang Yang, and Gang Li, *Nat. Energy*, **10**, Iss. 4: 513 (2025); <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01742-8>
80. Zicheng Fan, Yanbin Wang, Shengang Xu, Shuhan Hou, Changlong Zhuang, and Biaobing Wang, *Solar Energy*, **231**: 732 (2022); <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.009>

Lviv Polytechnic National University,
12, Stepan Bandera Str.,
UA-79013 Lviv, Ukraine

¹ Fig. 1. Evolution of materials in organic solar cells: acceptor molecules (a), donor molecules (b).

² Fig. 2. Evolution of organic solar-cell structures.