

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-1>

Іванна ВАКАЛЮК

аспірантка кафедри фізики і хімії твердого тіла, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID ID: 0000-0002-6188-9793

SCOPUS-AUTHOR ID: 58042285000

Ростислав ЯВОРСЬКИЙ

доктор філософії зі спеціальності «Фізика та астрономія», доцент кафедри фізики і хімії твердого тіла, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID ID: 0000-0001-5690-7486

SCOPUS-AUTHOR ID: 57193824044

Оксана ЗАМУРУЄВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Лілія КАТАНОВА

аспірантка кафедри фізики і хімії твердого тіла, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

ORCID ID: 0000-0003-3593-9934

SCOPUS-AUTHOR ID: 57221619996

Микола СКІПАЛЬСЬКИЙ

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57670072000

Бібліографічний опис статті: Вакалюк І., Яворський Р., Замуруєва О., Катанова Л., Скіпальський М. (2023) Фотовольтаїчні матеріали: поточні ефективності та майбутні виклики. *Фізика та освітні технології*, 3, 3–12, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-1>

ФОТОВОЛЬТАІЧНІ МАТЕРІАЛИ: ПОТОЧНІ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА МАЙБУТНІ ВИКЛИКИ

Кожного дня ми використовуємо електроенергію для власних потреб, одночасно вичерплюючи корисні копалини, що призводить до екологічної катастрофи. Тому вже протягом багатьох років для науковців постає завдання вироблення електроенергії з альтернативних джерел енергії. Найбільш перспективним видом відновлюваних джерел енергії є енергія Сонця. Викликом сьогодення є знайти матеріали, які будуть найоптимальніші, як у вартості, так і ефективності. У статті наведено переваги тонкоплівкових сонячних елементів через їх економічність, ефективність, меншу витрату матеріалу, гнучкість і тенденцію до зростання ККД. Оцінка продуктивності нової технології необхідна для аналізу їхнього потенціалу в майбутніх застосуваннях.

Метою кожного покоління є зниження витрат і водночас підвищення ефективності порівняно з попередніми. У зв'язку з цим економічні характеристики необхідно зробити найоптимальнішими для проектування фотоелектричної системи.

У результаті було проведено огляд матеріалів: CdTe, CIGS ($\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$) та CZTS ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$). Представлено порівняння розглянутих тонкоплівкових сонячних елементів з точки зору фізичних властивостей і продуктивності.

Встановлено, що ефективність для одноперехідних комірок CIGS, CdTe та CZTS невеликої площі, виміряна в глобальному спектрі АМ1.5 (1000 Вт/м²) при кімнатній температурі становить 23,6%, 22,3% та 11,4% відповідно.

Отже, ФЕ на основі тонкоплівкових CdTe характеризуються своєю високою ефективністю, дешевими матеріалами, надійною та стабільною роботою елемента. Сонячні елементи CdTe мають такі переваги, як: економічно ефективні виробничі процеси виготовлення; наплення матеріалу на підкладки, як із скла, так і з полікристалічних матеріалів; висока ефективність і попит на виробництво; оптимальна пряма ширина забороненої зони (1,54 eV) з високим коефіцієнтом поглинання.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, фотоелектричні перетворювачі, тонкоплівкові сонячні елементи, гетероструктури.

Ivanna VAKALIUK

PhD student, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID ID: 0000-0002-6188-9793

SCOPUS-AUTHOR ID: 58042285000

Rostyslav YAVORSKYI

Doctor of Philosophy in the specialty "Physics and Astronomy", Associate Professor of the Department of Physics and Chemistry of Solids, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID ID: 0000-0001-5690-7486

SCOPUS-AUTHOR ID: 57193824044

Oksana ZAMURUIEVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Lilia KATANOVA

PhD student, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018

ORCID ID: 0000-0003-3593-9934

SCOPUS-AUTHOR ID: 57221619996

Mukola SKIPALSKYI

PhD student of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A.V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57670072000

To cite this article: Vakaliuk I., Yavorskyi R., Zamuruieva, O., Katanova L., Skipalskyi M. (2023). Fotovoltaichni materialy: potochni efektyvnosti ta maibutni vyklyky [Photovoltaic materials: present efficiencies and future challenges]. *Physics and Educational Technology*, 3, 3–12, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-1>

PHOTOVOLTAIC MATERIALS: PRESENT EFFICIENCIES AND FUTURE CHALLENGES

Every day we use electricity for our own needs, while simultaneously producing minerals, which leads to an environmental disaster. Therefore, for many years, the task of producing electricity from alternative energy sources has become a task for scientists. The most promising type of renewable energy sources is solar energy. The challenge today is to find materials that will be the most optimal, both in terms of cost and efficiency. The article presents the advantages of thin-film solar cells due to their cost-effectiveness, efficiency, lower material consumption, flexibility, and increasing efficiency. Performance evaluation of new technology is necessary to analyze their potential in future applications.

The goal of each generation is to reduce costs and at the same time increase efficiency compared to the previous ones. In this regard, it is necessary to make the economic characteristics the most optimal for the design of the photovoltaic system.

As a result, an overview of materials was conducted: CdTe, CIGS (Cu(In,Ga)_{1-x}Se₂) and CZTS (Cu₂ZnSnS₄). A comparison of the considered thin-film solar cells in terms of physical properties and performance is presented. The efficiencies for small-area CIGS, CdTe, and CZTS single-junction cells measured in the global AM1.5 spectrum (1000 W/m²) at room temperature are found to be 23.6%, 22.3%, and 11.4%, respectively.

Therefore, PEs based on thin-film CdTe are characterized by their high efficiency, cheap materials, reliable and stable operation of the element. CdTe solar cells have such advantages as: cost-effective manufacturing processes; sputtering of material on substrates, both glass and polycrystalline materials; high efficiency and demand for production; optimal direct band gap (1.54 eV) with a high absorption coefficient.

Key words: *renewable energy sources, photoelectric converters, thin film solar cells, heterostructures.*

Вступ. Світ крокує вперед у напрямку розвитку технологій для отримання енергії зі стійких ресурсів, і технологи намагаються подолати такі виклики, як дефіцит палива та енергії через швидке зростання світового населення, високі витрати на енергію, глобальне потепління та різні екологічні проблеми. Споживання енергії постійно зростає, а надмірна залежність від спалювання викопного палива призвела до збільшення концентрації вуглекислого газу (CO₂) в атмосфері та антропогенної зміни клімату з негативним впливом на суспільство. Наприклад, на кожну тонну спаленого вугілля в атмосферу відбувається викид 1 тонни вуглекислого газу, що є основною причиною глобального потепління, парникового ефекту, зміни клімату та виснаження озонового шару (Singh, 2021). Різка зміна клімату призвела до того, що у 2015 році майже кожна країна підписала Паризьку угоду, яка має на меті підтримувати глобальну температуру в межах 1,5°C (Allen, 2018). Враховуючи вище сказане, пошук нових форм відновлюваної енергії сьогодні є надзвичайно актуальною задачею.

При використанні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зменшуються викиди парникових газів, що робить їх чистішою та ефективнішою технологією для запобігання погіршення навколишнього середовища. Сонячна енергія є однією з найкращих екологічно чистих енергетичних технологій для масштабного виробництва електроенергії. Оскільки сонячна енергія є постійною, доступною, екологічно безпечною, не завдає шкоди навколишньому середовищу, то її можна використовувати для майбутніх поколінь. Перехід до сталої енергетичної інфраструктури, заснованої на відновлюваних джерелах енергії, вимагатиме розробки широкого спектру вискоелективних пристроїв для перетворення та зберігання енергії (Muhammad, 2019). Сонячні фотоелектричні, термоелектричні та електрохімічні пристрої для генерації водню та накопичення енергії –

це деякі з технологій, які можуть зробити величезний внесок у вирішенні проблеми залежності від викопного палива. Однак важливо, щоб ці технології були розроблені з використанням розповсюджених у землі, нетоксичних, хімічно стабільних і екологічно чистих матеріалів. Вартість фотоелемента та його ефективність залежать від матеріалу, з якого він виготовлений. У цьому напрямі було проведено багато досліджень, щоб знайти матеріал для створення фотоелектричних елементів (ФЕ) (Hayat, 2019).

Понад 90% світового ринку фотоелектричних модулів наразі складають сонячні елементи (СЕ) з кристалічного кремнію (с-Si) (Liu, 2020). Si є поширеним у землі, нетоксичним, вискоелективним, має відповідну ширину забороненої зони 1,12 eV для перетворення сонячної енергії в електричну. Незважаючи на успіх сонячних елементів с-Si, непряма заборонена зона та низький коефіцієнт оптичного поглинання кремнію вимагають товстого шару для досягнення теоретичної межі ефективності 33,5% при кімнатній температурі (Swanson, 2005). Крім того, для зменшення відбивання для такого типу СЕ необхідна текстурація кремнієвої пластини (Sreejith, 2022). Сучасні кремнієві сонячні батареї мають бути товщиною 160–180 мкм для досягнення ефективності перетворення понад 20%. Товстіший шар Si може підвищити ефективність, але для цього необхідно більше матеріалу, що призводить до зростання вартості фотоелектричного модуля. На даний час це залишається серйозною проблемою для кремнієвих сонячних елементів (Terheiden, 2015).

Використання фотоелектричних матеріалів з оптимальною прямою забороненою зоною та високим коефіцієнтом оптичного поглинання зменшує попит на сировину для виготовлення сонячних елементів. Комерційне виготовлення тонкоплівкових СЕ зазвичай базується на основі аморфного кремнію (а-Si), телуриду кадмію (CdTe), селеніду міді-індію-галію (CIGS) і суль-

фіду міді цинку олова (CZTS). Тонкоплівкові сонячні елементи є багатообіцяючою альтернативою наявній технології сонячних елементів з кремнію через їхню пряму ширину забороненої зони, зменшене використання матеріалу, низьку вартість і високу ефективність. На сьогоднішній день ефективність для одноперехідних комірок CIGS, CdTe (рис.1) та CZTS невеликої площі, виміряна в глобальному спектрі AM1.5 (1000 Вт/м²) при 25°C становить 23,6%, 22,3% та 11,4 % відповідно (Green, 2023).

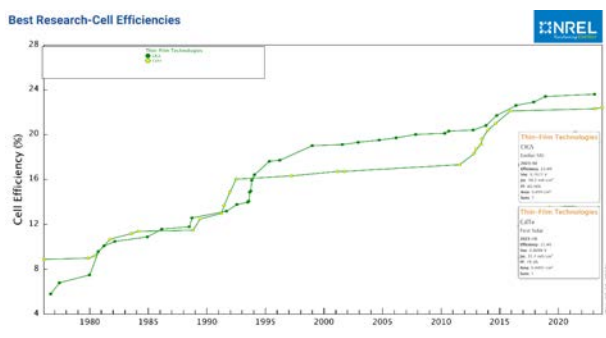


Рис. 1. Найкращі ефективності досліджуваних елементів для тонкоплівкових технологій CdTe, CIGS

Незважаючи на надзвичайно високу ефективність, перетворення потужності сонячних елементів CdTe та CIGS обмежені в тераватному масштабі через дефіцит складових елементів, таких як In і Te. Крім того, токсичність Cd також є фактором, що перешкоджає масовому виробництву сонячних елементів CdTe. Кестерит Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) є легкодоступним, нетоксичним, широко розповсюдженим складним напівпровідниковим матеріалом p-типу з прямою та регульованою забороненою зоною (1,4–1,6 eV) і високим коефіцієнтом поглинання (>10⁴см⁻¹) (Khoshsirat, 2019). Однак CZTS має ряд недоліків, таких як велика кількість об'ємних дефектів, наявність вторинних фаз, погана стехіометрія, що значно знижує ефективність перетворення енергії. Тому існує потреба в розробці тонкоплівкових фотоелектричних матеріалів, які складаються з поширених у землі та нетоксичних елементів для виготовлення потенційно недорогих сонячних елементів.

Метою кожного покоління є зниження витрат і водночас підвищення ефективності порівняно з попередніми. У зв'язку з цим економічні характеристики необхідно зробити

найоптимальнішими для проектування фотоелектричної системи. На рис. 2 показано найкращі результати ефективності для різних типів сонячних елементів (NREL, 2023).

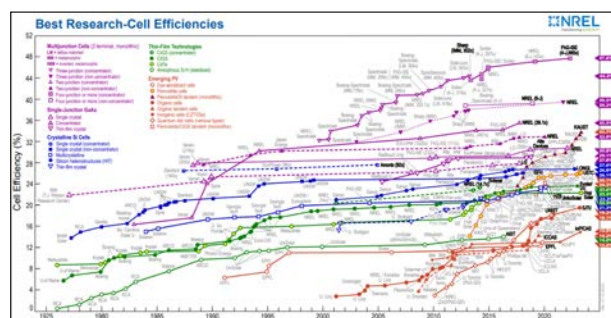


Рис. 2. Діаграма найкращих результатів ефективності сонячних елементів (NREL, 2023)

Приблизно 28 різних підкатегорій позначені різними кольоровими символами. Поточний світовий рекорд для кожної технології виділено вздовж правого краю графіка, який містить ефективність і символ технології.

Мета роботи: огляд сучасного стану фотоелектричних перетворювачів енергії, аналіз значення ефективності і будови комірки.

Методика та техніка експерименту. Огляд проводився серед наукових публікацій по даній тематиці у наукометричних базах даних Web of Science і Scopus, як українських, так і закордонних науковців.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Тонкоплівкові сонячні елементи на основі CdTe

Ключовим аспектом сонячних елементів, який потребував удосконалення, це зменшення кількості напівпровідникового матеріалу. Це стало рушійною силою, яка призвела до появи другого покоління фотоелектричних елементів, до яких відноситься CdTe. Тонкоплівкові фотоелектричні модулі на основі телуриду кадмію є основним продуктом на світовому ринку з піковою потужністю понад 30 ГВт. Американська компанія First Solar просунулася від виробничої лінії потужністю 25 МВт/рік у 2005 році до цільового показника 21 ГВт/рік до 2024 року. Цей прогрес відображає зростання ефективності перетворення електроенергії модуля з приблизно від 9% до трохи більше 19% за цей

період (Green, 2021). Тим часом ефективність лабораторних пристроїв прогресувала до >22% у 2015 році (Green, 2016).

Технологія тонкоплівкових ФЕ CdTe була розроблена на початку 1970-х років і в даний час є провідною технологією тонких плівок у десятці найкращих світових виробників. Це пояснюється тим, що CdTe є дуже міцним і хімічно стабільним матеріалом, який можна осаджувати за допомогою широкого спектру методів, що робить його ідеальним для виробництва на великій території (Yavorskyi, 2019; Romeo, 2021). У 1972 році Боннет і Рабенхорст створили перший сонячний елемент CdTe, з гетеропереходом CdS/CdTe ефективність якого становила 6% (Bonnet, 1972). Серія досліджень, таких як висока температура підкладки під час осадження CdTe, активаційні обробки CdCl₂, легування міддю призвели до високих коефіцієнтів перетворення 15,8% (Britt, 1993) та згодом до 16,5% (Wu, 2001).

За останнє десятиліття сонячні елементи CdTe зазнали значного вдосконалення, враховуючи нові характеристики, градацію забороненої зони, включення міді та більш прозорий n-шар (Wilson, 2020), що призвело до підвищення ефективності. Для підвищення ефективності елемента на основі телуриду кадмію зменшують шорсткість поверхні, використовуючи провідний шар TCO (ZnO) (Dhere, 2011). З цими коригуваннями First Solar розробила пристрій з ККД 21,5%, який дещо пізніше становив 22,1% (Green, 2020).

ФЕ на основі тонкоплівкових CdTe, відомі своєю високою ефективністю, дешевими матеріалами, надійною та стабільною роботою елемента. Сонячні елементи CdTe мають такі переваги, як:

- економічно ефективні виробничі процеси виготовлення (Dhere, 2011);
- наплення матеріалу на підкладки, як із скла, так і з полікристалічних матеріалів;
- висока ефективність і попит на виробництво (Bosio, 2011);
- оптимальна пряма ширина забороненої зони (1,54 eV) з високим коефіцієнтом поглинання.

Тонкоплівкові сонячні елементи характеризуються двома типовими конфігураціями: «substrate» та «superstrate» (рис. 3). Основна відмінність між цими двома поняттями полягає

в послідовності нанесення окремих тонких шарів. У конфігурації «superstrate» тонкі плівки наносяться на підкладку в напрямку від освітленої до затемненої сторони, тому можна використовувати лише прозорі підкладки. Згідно структури SE типу «substrate» шари наносяться в протилежній послідовності, тобто в напрямку від затемненої до освітленої сторони. З цієї причини зазвичай використовуються непрозорі підкладки, включаючи гнучку тонку металеву фольгу, полімери. Історично склалося так, що найкращі комірки виготовлялися в конфігурації «superstrate». Велика різниця між світовими рекордами ефективності сонячних елементів, виготовлених у конфігурації superstrate або конфігурації substrate, в основному залежить від зворотного контакту, який утворюють металеві фольги з CdTe р-типу. Вибір матеріалів підкладки обмежений відповідністю коефіцієнта розширення та роботи виходу. Крім того, під час активаційної обробки дифузія домішок, що надходять з підкладки, змінює електричні властивості контакту.

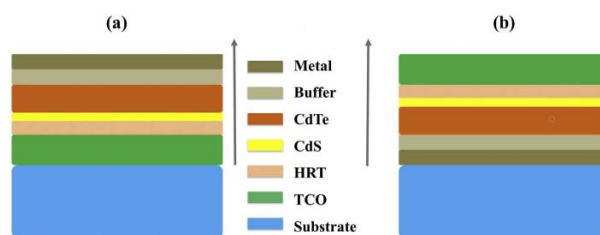


Рис. 3. Схема будови тонкоплівкового сонячного елемента CdTe з порядком осадження: (а) конфігурація «superstrate», (б) конфігурація «substrate» (Bosio, 2018)

Базова структура сонячного елемента на основі CdTe зображена на рис. 4. Структура містить скляну підкладку, шар прозорого провідного оксиду (TCO), віконний шар сульфіду кадмію n-типу (CdS), поглинач CdTe р-типу та задній контакт.

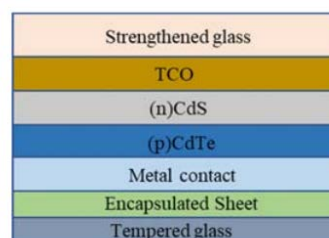


Рис. 4. Схема шарів сонячного елемента CdTe/CdS (Romeo, 2007)

TCO (Transparent Conductive Oxide) виконує функцію фронтального контакту та віконного шару. Розташування областей р-типу та n-типу створює структуру гетеропереходу. Ця побудова використовує переваги віконного шару для зменшення кількості індукованих світлом зарядів у шарі поглинача. Розпилення та вакуумне випаровування можна використовувати для осадження віконного шару CdS n-типу, який використовується, як буферний шар і має товщину близько 100 нм (Rance, 2014). Поглинаючий шар CdTe р-типу (~5 мкм завтовшки) наноситься за допомогою фізичного осадження з парової фази (PVD), спікання або трафаретного друку. Задній контакт може бути виготовлений з алюмінію (Al), золота (Au), нікелю (Ni) або платини (Pt) технологією вакуумного термічного випаровування (VTE). Гретенер та ін. (Gretener, 2016) розробили новий метод для дослідження стабільності сонячних елементів CdTe, створюючи їх у конфігурації підкладки та додавання невеликої кількості Cu до CdTe після перекристалізації. Їхні результати показали 90% початкової вихідної потужності після 1000 годин роботи на максимальній потужності при одній інтенсивності сонячного світла при температурі підкладки 80 °C, що свідчить про хорошу стабільність продуктивності.

Сучасна модульна технологія на основі CdTe базується на полікристалічному тонкоплівковому поглинаючому шарі CdTe р-типу або градуїрованому $CdSe_{1-x}Te_x$ ($CdSeTe$) з мінімальною шириною забороненої зони 1,5 eV – ~ 1,4 eV (відповідно), виготовлений у конфігурації підкладки на склі (рис. 5).

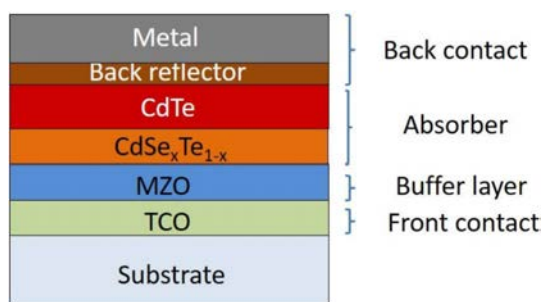


Рис. 5. Схема структури сонячного елемента на основі CdTe (Romeo, 2021)

На рис. 6 показано схематичне розміщення матеріалів для минулих, сучасних і майбутніх елементів на основі CdTe. Сучасні контрольні

показники продуктивності тонкоплівкових сонячних елементів і модулів CdTe визначені First Solar, із сертифікованою рекордною ефективністю перетворення електроенергії відповідно 22,3% і 19,5%.

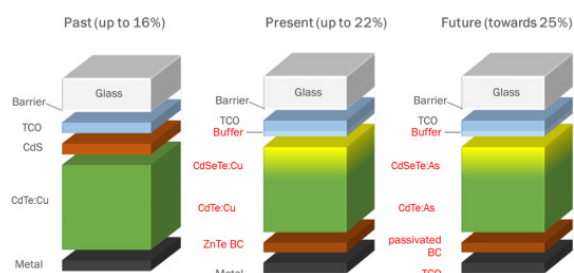


Рис. 6. Порівняння минулих, теперішніх і майбутніх сонячних елементів на основі CdTe (Scarpulla, 2023)

Сонячні елементи на основі селеніду міді-індію-галію (CIGS)

З точки зору ефективності, рекордне значення для CIGS становить 23,6%, яку можна порівняти з кремнієвими елементами. Слід зазначити, що ефективність досліджуваних елементів безпосередньо не відображає досягнуту у промисловому відношенні ефективність через великомасштабну обробку. Тим не менш, ККД модулів вище 20% вже є реальністю. В останні роки відбулося значне підвищення ефективності CIGS у результаті лужної обробки після осадження (Nakamura, 2019). Тонкоплівковий сонячний елемент селеніду міді-індію-галію (CIGS) використовується для перетворення сонячного світла в електричну енергію. CIGS – це напівпровідниковий матеріал із загальною формулою $Cu(In_xGa_{1-x})Se_2$, який змінює значення ширини забороненої зони в межах 1,0–1,7 eV залежно від частки елементів у сполуці (Niki, 2010). Для осадження CIGS можна використовувати підкладки зі скла, металевої фольги та полімерів (Mansfield, 2021). Виняткова ефективність, низька вартість і легкість інтеграції сонячних елементів на основі халькопїриту $Cu(InGa)Se_2$ (CIGS) роблять їх перспективними сонячними елементами. Це пов'язано з їх регульованою шириною забороненої зони і високим коефіцієнтом поглинання до 10^5 см^{-1} (Jeyakumar, 2017). CIGS досягли ефективності до 23,6% для невеликої площі 1 см^2 , виробленої Evolar/Upsala University, а ефективність модуля 19,2%.

Основні переваги сонячних елементів на основі CIGS:

- шари CIGS досить тонкі, що дозволяє наносити їх на гнучкі підкладки;
- багатообіцяюча та широко використовувана інтеграція;
- напilenня на різноманітних жорстких і гнучких підкладках за допомогою вакуумних і безвакуумних процесів;
- пряма ширина забороненої зони, високий коефіцієнт поглинання та дешеве виробництво;
- висока радіаційна стійкість, що робить їх придатними для використання в космосі.

Однак комерціалізація сонячних елементів на основі CIGS менш поширена, ніж сонячних елементів на основі c-Si, через складність отримання високоякісних і великомасштабних сонячних елементів на основі CIGS.

Недоліки сонячних елементів на основі CIGS:

- ефективність комерційного модуля CIGS значно нижча, ніж отриманий у лабораторному масштабі. Велика різниця в ефективності існує між елементами малої площі (> 23%) і комерційно доступними модулями (16,1%);
- ефективність є обмежена наявністю електронної неоднорідності;
- значна залежність від In, що може призвести до зростання ціни (для фотоелектричного модуля потужністю 1 ГВт потрібна 31 тонна індію);
- негативний вплив від утилізації продуктів, що містять кадмій.

Фотоелектрична комірка CIGS складається з кількох тонких шарів різних матеріалів, нанесених на підкладку. Шари складаються з тильного контакту, поглинача, буферного та віконного шару, як показано на рис. 7.

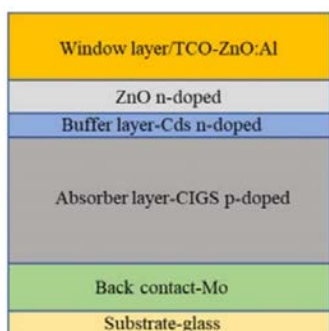


Рис. 7. Схема сонячного елемента на основі CIGS (Adeyinka, 2023)

На основі CZTS

Напівпровідниковий матеріал на основі $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) став одним із найперспективніших матеріалів для розробки нових поглиначів світла в сонячних елементах, виготовлених із екологічно чистих матеріалів, які широко розповсюджені в земній корі. Четвертинна сполука CZTS є прямозонною з шириною забороненої зони $E_g=1,5$ eV, має високий коефіцієнт поглинання ($\alpha > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) у видимому та близькому інфрачервоному спектральному діапазоні та р-тип провідності. Для отримання тонких плівок CZTS використовують різні фізичні методи, такі як розпилення, спільне випаровування, імпульсне лазерне осадження, а також хімічні методи, такі як електроосадження, золь-гель (Gurav, 2013; Vanalakar, 2015).

Схема структури сонячної комірки на основі CZTS показана на рис. 8.

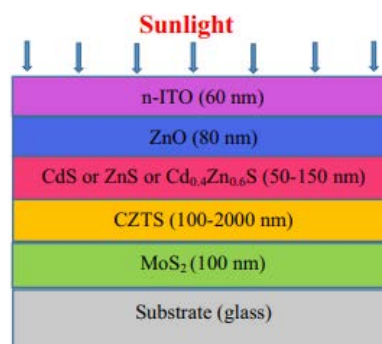


Рис. 8. Схема будови сонячного елемента на основі CZTS (Jhuma, 2019)

У структурі сонячного елемента CZTS використовується содово-вапняна скляна підкладка. У якості високорезистивного поглинаючого шару виступає шар MoS_2 товщиною до 100 нм (Yang, 2014). Абсорбуючим шаром є CZTS, в якому більшість падаючих фотонів поглинаються для отримання електронно-діркових пар. Для забезпечення вирівнювання шарів між CZTS та наступним віконним шаром використовується CdS або ZnS або $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{S}$ як буферний шар. Після цього для віконного шару над буферним шаром використовувався менш витратний і доступний оксид цинку (ZnO) товщини 80 нм, який підсилює розсіювання світла, що дозволяє ефективно використовувати сонячне світло, щоб максимізувати кількість падаючих фотонів до буферних і погли-

наючих шарів (Fuhs, 2005). Нарешті, прозора провідна плівка n-типу оксиду індієвого олова (n-ITO) товщини 60 нм була використана для забезпечення високої рухливості, що призводить до збільшення видимого поглинання для отримання меншого опору шару (Coutts, 1999).

Висновки. Упродовж багаторічної історії розвитку фотовольтаїки докладено багато зусиль для розробки тонкоплівкових сонячних елементів з їх унікальними технічними характеристиками, такими як легкість, гнучкість і доступність. Представлено огляд перспективних технологій фотоелектричних перетворю-

вачів в галузі сонячної енергетики. Показано динамічну тенденцію ефективності, стабільності та механізму деградації тонкоплівкових сонячних елементів. Також було здійснено порівняння структурних, електричних властивостей матеріалу та ефективності CdTe, CIGS та CZTS. Показано тенденцію зміни ККД тонкоплівкових сонячних елементів протягом багатьох років. Показники ефективності перетворення для CdTe, CIGS та CZTS становлять 23,6%, 22,3% та 11,4% відповідно. Однак, деякі з цих технологій виявляють проблеми, які обмежують їхнє майбутнє виробництво.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Singh B.P., Goyal S.K., Kumar, P. Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Mater. Today Proc.* 2021. Vol. 43. P. 2843–2849.
2. Allen M., Dube O.P., Solecki W., et al. Special Report: Global Warming of 1.5 C. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Framing and Context.* 2018. P. 49–92.
3. Muhammad J.Y.U., Waziri A.B., Shitu A.M., et al. Recent progressive status of materials for solar photovoltaic cell: A comprehensive review. *Sci. J. Energy Eng.* 2019. Vol. 7. P. 77–89.
4. Hayat M.B., Ali D., Monyake K.C., Alagha L., Ahmed N. Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *Int. J. Energy Res.* 2019. Vol. 43. P. 1049–1067.
5. Liu Z., Sofia S.E., Laine H.S., Woodhouse M., Wieghold S., Peters I. M., Buonassisi T. Revisiting thin silicon for photovoltaics: a technoeconomic perspective. *Energy Environ. Sci.* 2020. Vol. 13, № 1. P. 12–23.
6. Swanson R.M. Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells. *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.* 03-07 January 2005. Lake Buena Vista, FL, USA. 2005. P. 889–894.
7. Sreejith K.P., Sharma A.K., Basu P.K., Kottantharayil A. Etching methods for texturing industrial multi-crystalline silicon wafers: A comprehensive review." *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 2022. Vol. 238. P. 111531.
8. Terheiden B., Ballmann T., Horbelt R., et al. Manufacturing 100- μ m-thick silicon solar cells with efficiencies greater than 20% in a pilot production line. *Phys. Status Solidi A.* 2015. Vol. 212. P. 13–24.
9. Green M.A., Dunlop E.D., Yoshita M., et al. Solar cell efficiency tables (version 62). *Prog Photovolt Res Appl.* 2023. Vol. 31, № 7. P. 651–663.
10. Khoshsirat N., Bradford J., Shahbazi M., Zhang S., Shafiei M., Wang H., Motta N., Efficiency enhancement of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cells by chromium doping. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2019. Vol. 201. P. 110057.
11. Best Research-Cell Efficiency Chart веб-сайт. URL:<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення 15.10.2023).
12. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 57)). *Progress in photovoltaics: research and applications.* 2021. Vol. 29, № 1. P. 3–15.
13. Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in photovoltaics: research and applications.* 2016. Vol. 24, № 1. P. 3–11.
14. Yavorskyi R., Nykyruy L., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Górný S. Structural and optical properties of cadmium telluride obtained by physical vapor deposition technique. *Applied Nanoscience.* 2019. Vol. 9. P. 715–724.
15. Romeo A., Artagiani E. CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. *Energies.* 2021. Vol. 14, № 6. P. 1406–1684.
16. Bonnet D., Rabenhorst H. New results on the development of a thin film p-CdTe–n-CdS heterojunction solar. In 9th Photovoltaic Specialists Conference. Silver Spring, MD USA. 1972. P. 129–132.
17. Britt J.; Ferekides C.S. Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 62. P. 2851–2852.
18. Wu X., Dhere R.G., Albin D.S., et al. High-Efficiency CTO/ZTO/CdS CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. In *Proceedings of the NCPV Program Review Meeting.* Lakewood, CO, USA. 14–17 October 2001.
19. Wilson G.M., Al-Jassim M., Metzger W.K., et al. The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2020. Vol 53, № 49. P. 493001.
20. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films.* 2011. Vol. 519, № 21, 7142–7145.

21. Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. Solar cell efficiency tables (version 56). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2020. Vol. 28. P. 629–638.
22. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519, № 21. P. 7142–7145.
23. Bosio A., Menossi D., Mazzamuto S., Romeo N. Manufacturing of CdTe thin film photovoltaic modules. *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519, № 21. P. 7522–7525.
24. Bosio A., Rosa G., Romeo N. Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*. 2018. Vol. 175. P. 31–43.
25. Romeo N., Bosio A., Mazzamuto S., Romeo A., Vaillant-Roca L. High efficiency CdTe/CdS thin film solar cells with a novel back contact. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy. 2007. P. 1919–1927.
26. Rance L., Burst J. M., Barnes T. M., et al. 14%-efficient flexible CdTe solar cells on ultra-thin glass substrates. *Applied Physics letter*. 2014. Vol. 104, № 14. P. 143903.
27. Gretener C., Perrenoud J., Kranz, L. New perspective on the performance stability of CdTe solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2016. Vol. 146. P. 51–57.
28. Scarpulla M.A., McCandless B., Phillips A. B., et al. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2023. Vol. 255. P. 112289.
29. Nakamura M., Yamaguchi K., Kimoto Y., et al. Cd-free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%. *IEEE J. Photovolt.* 2019. Vol. 9. P. 1863–1867.
30. Niki S., Contreras M., Repins I., et al. CIGS absorbers and processes. *Prog. Photovolt.* 2010. Vol. 18. P. 453–466.
31. Mansfield L. Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells. Photovoltaic Research. 2021.
32. Jeyakumar R., Udai P. S. Copper indium gallium selenide based Solar cells – a review. *Energy and Environmental Science*. 2017. Vol. 10, № 6. P. 1306–1319.
33. Adeyinka A. M., Mbelu O. V., Adediji Y. B., Yahya D. I. (). A review of current trends in thin film solar cell technologies. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2023. Vol. 17, № 1. P. 1–10.
34. Gurav K. V., Pawar S. M., Shin S. W., et al. Electrosynthesis of CZTS films by sulfurization of CZT precursor: Effect of soft annealing treatment. *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 283. P. 74–80.
35. Vanalakar S.A., Agawane G.L., Shin S.W., et al. A review on pulsed laser deposited CZTS thin films for solar cell applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 619. T. 109–121.
36. Jhuma F. A., Shaily M. Z., Rashid M. J. Towards high-efficiency CZTS solar cell through buffer layer optimization. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. 2019. Vol. 8. P. 1–7.
37. Yang K.J., Sim J.H., Jeon B., et al. Effects of Na and MoS₂ on Cu₂ZnSnS₄ thin-film solar cell. *Progr Photovolt. Res. Appl.* 2014. Vol. 23, № 7. P. 862–873.
38. Fuhs W., Nickel N. H., Terukov E. Zinc oxide—a material for micro- and optoelectronic applications. *NATO Sci. Ser. II Math. Phys. Chem.* 2005, Vol. 194. P. 197–209.
39. Coutts T.J., Mason T.O., Perkins J.D., Ginley D.S. Transparent conducting oxides: status and opportunities in basic research. *Electrochem. Soc. Proc.* 1999. Vol. 99, № 11. P. 274–289.

REFERENCES:

1. Singh B.P., Goyal S.K., Kumar, P. Solar (2021) PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Mater. Today Proc.* Vol. 43. P. 2843–2849.
2. Allen M., Dube O.P., Solecki W., et al. (2018) Special Report: Global Warming of 1.5 C. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Framing and Context*. P. 49–92.
3. Muhammad J.Y.U., Waziri A.B., Shitu A.M., et al. (2019) Recent progressive status of materials for solar photovoltaic cell: A comprehensive review. *Sci. J. Energy Eng.* Vol. 7. P. 77–89.
4. Hayat M.B., Ali D., Monyake K.C., Alagha L., Ahmed N. (2019) Solar energy – A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *Int. J. Energy Res.* Vol. 43. P. 1049–1067.
5. Liu Z., Sofia S.E., Laine H.S., Woodhouse M., Wieghold S., Peters I. M., Buonassisi T. (2020) Revisiting thin silicon for photovoltaics: a technoeconomic perspective. *Energy Environ. Sci.* Vol. 13, № 1. P. 12–23.
6. Swanson R.M. (2005) Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells. *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 03–07 January 2005. Lake Buena Vista, FL, USA. 2005. P. 889–894.
7. Sreejith K.P., Sharma A.K., Basu P.K., Kottantharayil A. (2022) Etching methods for texturing industrial multi-crystalline silicon wafers: A comprehensive review." *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 238. P. 111531.
8. Terheiden B., Ballmann T., Horbelt R., et al. (2015) Manufacturing 100-µm-thick silicon solar cells with efficiencies greater than 20% in a pilot production line. *Phys. Status Solidi A*. Vol. 212. P. 13–24.
9. Green M.A., Dunlop E.D., Yoshita M., et al. (2023) Solar cell efficiency tables (version 62). *Prog Photovolt Res Appl.* Vol. 31, № 7. P. 651–663.

10. Khoshsirat N., Bradford J., Shahbazi M., Zhang S., Shafiei M., Wang H., Motta N., (2019) Efficiency enhancement of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin film solar cells by chromium doping. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. Vol. 201. P. 110057.
11. Best Research-Cell Efficiency Chart веб-сайт. URL:<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (дата звернення 15.10.2023).
12. Green M., Dunlop E., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. (2021) Solar cell efficiency tables (version 57)). *Progress in photovoltaics: research and applications*. Vol. 29, № 1. P. 3–15.
13. Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. (2016) Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in photovoltaics: research and applications*. Vol. 24, № 1. P. 3–11.
14. Yavorskyi R., Nykyruy L., Wisz G., Potera P., Adamiak S., Górny S. (2019) Structural and optical properties of cadmium telluride obtained by physical vapor deposition technique. *Applied Nanoscience*. Vol. 9. P. 715–724.
15. Romeo A., Artegiani E. (2021) CdTe-Based Thin Film Solar Cells: Past, Present and Future. *Energies*. Vol. 14, № 6. P. 1406–1684.
16. Bonnet D., Rabenhorst H. (1972) New results on the development of a thin film p-CdTe–n-CdS heterojunction solar. In 9th Photovoltaic Specialists Conference. Silver Spring, MD USA. P. 129–132.
17. Britt J.; Ferekides C.S. (1993) Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Appl. Phys. Lett.* Vol. 62. P. 2851–2852.
18. Wu X., Dhere R.G., Albin D.S., et al. (2001) High-Efficiency CTO/ZTO/CdS CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. In *Proceedings of the NCPV Program Review Meeting*. Lakewood, CO, USA. 14–17 October 2001.
19. Wilson G.M., Al-Jassim M., Metzger W.K., et al. (2020) The 2020 photovoltaic technologies roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol 53, № 49. P. 493001.
20. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. (2011) CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519, № 21, 7142–7145.
21. Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Hao X. (2020) Solar cell efficiency tables (version 56). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* Vol. 28. P. 629–638.
22. Dhere R.G., Bonnet-Eymard M., Charlet E., et al. (2011) CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass. *Thin Solid Films*. Vol 519, № 21. P. 7142–7145.
23. Bosio A., Menossi D., Mazzamuto S., Romeo N. (2011) Manufacturing of CdTe thin film photovoltaic modules. *Thin Solid Films*. Vol. 519, № 21. P. 7522–7525.
24. Bosio A., Rosa G., Romeo N. (2018) Past, present and future of the thin film CdTe/CdS solar cells. *Solar Energy*. Vol. 175. P. 31–43.
25. Romeo N., Bosio A., Mazzamuto S., Romeo A., Vaillant-Roca L. (2007) High efficiency CdTe/CdS thin film solar cells with a novel back contact. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3–7 September 2007, Milan, Italy. P. 1919–1927.
26. Rance L., Burst J. M., Barnes T. M., et al. (2014) 14%-efficient flexible CdTe solar cells on ultra-thin glass substrates. *Applied Physics letter*. Vol. 104, № 14. P. 143903.
27. Gretener C., Perrenoud J., Kranz, L. (2016) New perspective on the performance stability of CdTe solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Vol. 146. P. 51–57.
28. Scarpulla M.A., McCandless B., Phillips A. B., et al. (2023) CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Vol. 255. P. 112289.
29. Nakamura M., Yamaguchi K., Kimoto Y., et al. (2019) Cd-free $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%. *IEEE J. Photovolt.* Vol. 9. P. 1863–1867.
30. Niki S., Contreras M., Repins I., et al. (2010) CIGS absorbers and processes. *Prog. Photovolt.* Vol. 18. P. 453–466.
31. Mansfield L. (2021) Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells. *Photovoltaic Research*.
32. Jeyakumar R., Udai P. S. (2017) Copper indium gallium selenide based Solar cells – a review. *Energy and Environmental Science*. Vol. 10, № 6. P. 1306–1319.
33. Adeyinka A. M., Mbelu O. V., Adediji Y. B., Yahya D. I. (2023) A review of current trends in thin film solar cell technologies. *International Journal of Energy and Power Engineering*. Vol.17, № 1. P. 1–10.
34. Gurav K. V., Pawar S. M., Shin S. W., et al. (2013) Electrosynthesis of CZTS films by sulfurization of CZT precursor: Effect of soft annealing treatment. *Applied Surface Science*. Vol. 283. P. 74–80.
35. Vanalakar S.A., Agawane G.L., Shin S.W., et al. (2015) A review on pulsed laser deposited CZTS thin films for solar cell applications. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 619. T. 109–121.
36. Jhuma F. A., Shaily M. Z., Rashid M. J. (2019) Towards high-efficiency CZTS solar cell through buffer layer optimization. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. Vol. 8. P. 1–7.
37. Yang K.J., Sim J.H., Jeon B., et al. (2014) Effects of Na and MoS_2 on $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin-film solar cell. *Progr Photovolt. Res. Appl.* Vol. 23, № 7. P. 862–873.
38. Fuhs W., Nickel N. H., Terukov E. (2005) Zinc oxide a material for micro- and optoelectronic applications. *NATO Sci. Ser. II Math. Phys. Chem*. Vol. 194. P. 197–209.
39. Coutts T.J., Mason T.O., Perkins J.D., Ginley D.S. (1999) Transparent conducting oxides: status and opportunities in basic research. *Electrochem. Soc. Proc.* Vol. 99, № 11. P. 274–289.