

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ**

**Кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики
імені А. В. Свідзинського**

На правах рукопису

**ГАПОНЧУК РОМАН ЮРІЙОВИЧ
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ТОНКОПЛІВКОВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У
СЕРЕДОВИЩІ SCAPS-1D**

Спеціальність: 104 «Фізика та астрономія»

Освітня програма «Фізика та астрономія»

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»

Науковий керівник:

ЗАМУРУЄВА ОКСАНА ВАЛЕРІЇВНА

кандидат фізико-математичних наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ

Протокол № _____

засідання кафедри теоретичної та комп'ютерної
фізики імені А. В. Свідзинського

від _____ 202_ р.

Завідувач кафедри

_____ Сахнюк В. Є.

ЛУЦЬК – 2025

АНОТАЦІЯ

Гапончук Роман Юрійович Дослідження та чисельне моделювання тонкоплівкових сонячних елементів у середовищі SCAPS-1D. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра за освітньою програмою 104 «Фізика та астрономія». Волинський національний університет імені Лесі Українки. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та чисельному моделюванню тонкоплівкових сонячних елементів з використанням спеціалізованого програмного середовища SCAPS-1D. Актуальність роботи зумовлена зростаючою потребою у розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної фотовольтаїки, у контексті глобальних викликів енергетичної безпеки та зменшення негативного впливу на довкілля. Особливу увагу в роботі приділено тонкоплівковим сонячним елементам як перспективній альтернативі традиційним кремнієвим технологіям завдяки меншій витраті матеріалів, можливості інтеграції у гнучкі та архітектурні конструкції, а також потенціалу підвищення ефективності перетворення енергії.

Значну частину роботи присвячено огляду сучасних програмних засобів чисельного моделювання сонячних фотоелектричних комірок та обґрунтуванню вибору програмного комплексу SCAPS-1D. У середовищі SCAPS-1D виконано моделювання тонкоплівкової сонячної комірки на основі CIGS, проаналізовано вольт-амперні характеристики, коефіцієнт корисної дії та фактор заповнення. Досліджено вплив параметрів окремих шарів і матеріалів, а також інтерфейсних властивостей на ефективність роботи сонячного елемента.

Ключові слова: сонячні елементи, тонкоплівкові технології, CIGS, чисельне моделювання, SCAPS-1D, фотовольтаїка.

SUMMARY

Haponchuk R.Y. Research and Numerical Modeling of Thin-Film Solar Cells in the SCAPS-1D Environment. Manuscript.

Master's thesis in the educational program 104 “Physics and Astronomy.” Lesya Ukrainka Volyn National University. Lutsk, 2025. The master's thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, and a list of references.

The master's thesis is devoted to the study and numerical modeling of thin-film solar cells using the specialized software environment **SCAPS-1D**. The relevance of this work is driven by the growing need for the development of renewable energy sources, particularly solar photovoltaics, in the context of global challenges related to energy security and the reduction of negative environmental impacts. Special attention is paid to thin-film solar cells as a promising alternative to conventional silicon-based technologies due to their lower material consumption, the possibility of integration into flexible and building-integrated structures, and their potential for improving energy conversion efficiency.

A significant part of the thesis is dedicated to the review of modern software tools for numerical modeling of photovoltaic solar cells and to the justification of the choice of the SCAPS-1D program package. Within the SCAPS-1D environment, a thin-film CIGS-based solar cell was modeled, and its current–voltage characteristics, power conversion efficiency, and fill factor were analyzed. The influence of the parameters of individual layers and materials, as well as interface properties, on the performance of the solar cell was investigated.

Keywords: solar cells, thin-film technologies, CIGS, numerical modeling, SCAPS-1D, photovoltaics.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА РІЗНОВИДИ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.....	9
1. 1. Історія створення та принцип роботи сонячних батарей.....	9
1.2. Переваги та недоліки сонячних батарей.....	12
1.3. Різновиди сонячних батарей	14
РОЗДІЛ 2. ТОНКОПЛІВКОВІ СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ СПОЛУК CIGS	28
2.1. Структура та властивості матеріалів CIGS	28
2.2. Методи отримання шарів CIGS	31
2.2.1. Вакуумні методи	31
2.2.2. Невакуумні (хімічні) методи	33
2.3. Будова та функціонування сонячних елементів на основі CIGS.	34
2.4. Ефективність та стабільність CIGS сонячних елементів	37
2.5. Сучасні досягнення та виклики для сонячних елементів на основі CIGS	39
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ КОМІРКИ.....	42
3.1. Моделювання характеристик СЕ на основі ГП: основні підходи та принципи	42
3.2. Програмні засоби моделювання сонячних елементів та їх функціональні можливості.....	45
3.3. Моделювання тонкоплівкових сонячних комірок у середовищі SCAPS-1D	49
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

ВСТУП

Сучасний світ стикається з глобальними викликами, пов'язаними зі зміною клімату та виснаженням невідновлюваних енергетичних ресурсів, що зумовлює нагальну потребу у переході до сталих енергетичних систем. У цьому контексті інтенсивно розвиваються відновлювані джерела енергії, серед яких сонячна фотовольтаїка (PV) посідає провідне місце завдяки можливості прямого перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. За останні десятиліття сонячна енергетика продемонструвала значне зростання встановлених потужностей, зниження вартості виробленої електроенергії та суттєвий технологічний прогрес, що робить її ключовим елементом стратегій декарбонізації та енергетичної безпеки багатьох країн.

Домінуючою технологією на сучасному ринку залишаються сонячні елементи на основі кристалічного кремнію, які характеризуються високою ефективністю та довготривалою стабільністю. Водночас енергоємність виробництва кремнію та обмежені можливості інтеграції таких модулів у гнучкі або складні за формою конструкції стимулюють розвиток альтернативних технологій. Перспективним напрямом є тонкоплівкові сонячні елементи, які використовують надтонкі фотоактивні шари з високим коефіцієнтом поглинання світла. Завдяки цьому вони характеризуються зменшеною витратою матеріалів, коротшим часом енергетичної окупності, можливістю великомасштабного виробництва та застосування на гнучких підкладках, зокрема у системах будівельної інтеграції.

Подальше підвищення ефективності та надійності тонкоплівкових сонячних елементів потребує глибокого розуміння фізичних процесів генерації, транспорту та рекомбінації носіїв заряду у багатошарових структурах. У зв'язку з цим методи чисельного моделювання набувають особливої актуальності, оскільки дозволяють досліджувати електричні та оптичні властивості фотоелектричних комірок, інтерпретувати експериментальні дані та оптимізувати параметри пристроїв без проведення великої кількості дороговартісних експериментів. Разом з тим не всі програмні засоби

забезпечують комплексний аналіз сонячної комірки – від задання параметрів окремих шарів до розрахунку ключових характеристик, таких як фактор заповнення та ефективність перетворення енергії. Це зумовлює необхідність використання спеціалізованих програмних комплексів чисельного моделювання при дослідженні сучасних тонкоплівкових сонячних елементів.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз сучасних тонкоплівкових сонячних елементів, зокрема на основі сполук CIGS, та дослідження можливостей чисельного моделювання сонячної фотоелектричної комірки для оцінки й оптимізації її електричних та енергетичних характеристик.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

- Проаналізувати принцип роботи, переваги, недоліки та основні різновиди сонячних батарей.
- Розглянути фізико-хімічні властивості та методи отримання тонкоплівкових сонячних елементів на основі сполук CIGS.
- Дослідити будову та механізми функціонування CIGS сонячних елементів.
- Проаналізувати сучасні програмні засоби для чисельного моделювання сонячних фотоелектричних комірок.
- Дослідити фізико-математичні моделі, що використовуються при чисельному моделюванні сонячних елементів.
- Виконати моделювання характеристик тонкоплівкової сонячної комірки у програмному середовищі SCAPS-1D.
- Проаналізувати вплив параметрів матеріалів і шарів структури на ефективність та фактор заповнення сонячної комірки.

Об'єктом дослідження є тонкоплівкові сонячні фотоелектричні комірки.

Предметом дослідження є фізичні процеси генерації, транспорту та рекомбінації носіїв заряду в тонкоплівкових сонячних комірках, а також їх чисельне моделювання з використанням спеціалізованих програмних засобів.

Методи дослідження: аналітичний огляд наукових джерел, методи чисельного моделювання, комп'ютерне моделювання у середовищі SCAPS-1D, аналіз та порівняння розрахункових характеристик сонячних елементів.

Наукова новизна отриманих результатів

- Систематизовано та проаналізовано сучасні програмні засоби чисельного моделювання сонячних фотоелектричних комірок з позицій їх придатності для дослідження тонкоплівкових структур.
- Удосконалено підхід до аналізу фізичних процесів у тонкоплівкових сонячних комірках шляхом застосування чисельного моделювання на основі розв'язання рівнянь Пуассона та неперервності носіїв заряду.
- Досліджено вплив параметрів матеріалів та інтерфейсів шарів тонкоплівкової сонячної комірки на її вольт-амперні характеристики, фактор заповнення та ефективність перетворення енергії з використанням програмного комплексу SCAPS-1D.

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що:

Отримані результати чисельного моделювання можуть бути використані при проектуванні та оптимізації тонкоплівкових сонячних елементів, зокрема на основі сполук CIGS.

Розглянута методика моделювання у середовищі SCAPS-1D може застосовуватися для попередньої оцінки електричних характеристик сонячних комірок з метою зменшення обсягу експериментальних досліджень і матеріальних витрат.

Матеріали роботи можуть бути використані в навчальному процесі при викладанні дисциплін, пов'язаних із відновлюваною енергетикою, фізикою напівпровідників та чисельним моделюванням електронних пристроїв.

Апробація результатів дослідження. Основні результати кваліфікаційної роботи представлені автором на науковій конференції «Актуальні проблеми фундаментальних наук» (АПФН-2025) присвяченої пам'яті Джордано Бруно;

обговорення на засіданні кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського ННФТІ.

Структура кваліфікаційної роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА РІЗНОВИДИ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

1. 1. Історія створення та принцип роботи сонячних батарей

Історично розвиток технологій використання сонячної енергії відбувався поетапно, і сонячні батареї стали другим етапом у спробах людства ефективно використати енергію Сонця. Першими були розроблені сонячні колектори (сонячні термальні електростанції), у яких виробництво електричної енергії здійснюється за рахунок нагрівання води до температури кипіння під дією сконцентрованого сонячного випромінювання (рис. 1.1).



Рисунок 1.1. Сонячна термальна електростанція в іспанському місті Севілья

Історія створення сонячних батарей бере свій початок у ХІХ столітті, при цьому розвиток технологій їх виготовлення відбувався досить динамічно [1]. У 1839 році Антуан-Сезар Беккерель продемонстрував створену ним хімічну батарею, яка під дією сонячного випромінювання генерувала електричний струм. Ефективність перших сонячних елементів була надзвичайно низькою і становила близько 1 %, тобто лише незначна частка падаючого світла перетворювалася на електричну енергію.

Подальші дослідження у цій галузі пов'язані з відкриттям світлочутливих властивостей напівпровідникових матеріалів. У 1873 році Віллоубі Сміт виявив фоточутливість селену, а вже у 1877 році Адамс і Дей експериментально довели, що селен під впливом світла здатний генерувати електричний струм. На основі цих досліджень Чарльз Фріттс у 1880 році створив перший сонячний елемент із селену, покритого тонким шаром золота, ефективність якого також не

перевищувала 1 %. Незважаючи на низький коефіцієнт корисної дії, Фрітцс вважав свої розробки революційними та передбачав широке використання сонячної енергії як альтернативного джерела електропостачання [2].

Значний внесок у розвиток сонячної енергетики зробило пояснення фотоефекту, надане Альбертом Ейнштейном у 1905 році. Хоча це відкриття дало надію на створення сонячних батарей з вищою ефективністю, істотний технологічний прогрес на початковому етапі був обмеженим. Лише в середині XX століття, завдяки розвитку напівпровідникової електроніки, зокрема дослідженням у галузі діодів і транзисторів, з'явилися необхідні наукові передумови для створення ефективніших фотоелектричних пристроїв.

У 1954 році Гордон Пірсон, Дерріл Чапін і Келвін Фуллер розробили кремнієвий сонячний елемент з коефіцієнтом корисної дії близько 4 %, який згодом було підвищено до 15 % [2]. Перші практичні застосування сонячних батарей були пов'язані з електропостачанням систем телефонного зв'язку у віддалених і сільських районах, де вони успішно експлуатувалися протягом тривалого часу.

Надалі сонячні батареї стали основним джерелом енергії для забезпечення функціонування штучних супутників Землі. Це було зумовлено тим, що традиційні паливні системи та акумуляторні батареї мали значну масу, тоді як сонячні елементи характеризуються високим співвідношенням виробленої енергії до ваги та кращою економічною ефективністю. Попри те, що на сьогодні частка великомасштабних фотоелектричних енергетичних систем залишається відносно невеликою, основні зусилля спрямовані на енергозабезпечення важкодоступних і віддалених регіонів.

Незважаючи на те, що сонячна енергетика наразі забезпечує лише близько 1 % світового виробництва електроенергії, потенціал цього джерела є надзвичайно великим. За оцінками прихильників сонячної енергетики, кількість сонячного випромінювання, що щорічно досягає поверхні Землі, здатна у кілька разів перевищити сучасні потреби людства в енергії [3].

Сонячні панелі складаються з окремих фотоелектричних комірок, об'єднаних у загальну рамкову конструкцію. Першим матеріалом, який використовували для виготовлення фотоелектричних елементів, був селен; саме на його основі наприкінці XIX століття створювали перші сонячні батареї.

Під дією сонячного випромінювання у фотоелектричній комірці виникають електронно-діркові пари. Частина утворених носіїв заряду переноситься через р–п-перехід між шарами напівпровідника, що приводить до появи різниці потенціалів. Унаслідок цього у зовнішньому електричному колі виникає напруга: на контакті р-шару формується позитивний полюс, а на контакті n-шару – негативний (рис. 1.2) [4].

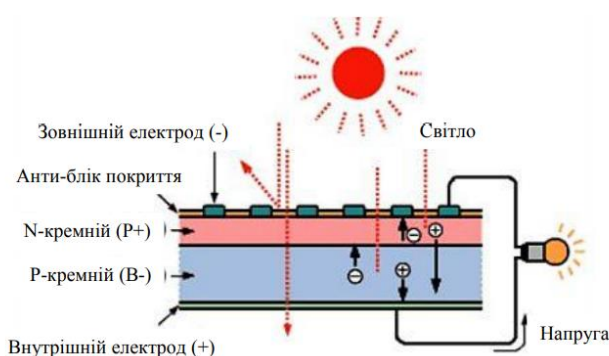


Рисунок 1.2. Принцип роботи сонячної батареї

Під час підключення сонячної панелі до зовнішнього навантаження, зокрема акумуляторної батареї, фотоелектричні комірки утворюють замкнене електричне коло. У результаті відбувається протікання електричного струму, а акумулятор поступово накопичує заряд, забезпечуючи подальше використання згенерованої електроенергії.

Стандартні кремнієві фотоелектричні перетворювачі належать до одноперехідних структур, у яких перенесення носіїв заряду відбувається через один р–п-перехід. Така будова обмежує ефективне використання лише певної частини спектра сонячного випромінювання, оскільки фотоелемент здатний перетворювати енергію фотонів лише в межах енергетичної зони цього переходу. Уся інша частина сонячної енергії не бере участі у генерації

електричного струму, що є однією з причин відносно низького коефіцієнта корисної дії фотоелектричних перетворювачів.

З метою підвищення ефективності перетворення енергії в останні роки все ширше застосовуються багатошарові (каскадні) фотоелементи. Такі структури містять декілька р–п-переходів, кожен з яких оптимізований для поглинання певної ділянки спектра сонячного випромінювання. Завдяки цьому зростає сумарний коефіцієнт корисної дії сонячних батарей, однак складність технології виготовлення зумовлює значне підвищення їх вартості.

Під час роботи фотоелектричні елементи та сонячна панель загалом зазнають нагрівання [5]. Та частина сонячної енергії, яка не перетворюється на електричну, переходить у теплову форму, що призводить до підвищення температури поверхні панелі. Зі зростанням температури ефективність фотоелектричних елементів знижується, унаслідок чого одна і та сама сонячна батарея в умовах високих температур генерує менший струм, ніж за холодної погоди.

Найвищі значення коефіцієнта корисної дії сонячні батареї демонструють у ясні зимові дні, коли поєднуються висока інтенсивність сонячного випромінювання та природне охолодження. Навіть за наявності снігу на поверхні панелі генерація електроенергії не припиняється, оскільки сніг швидко тоне під впливом тепла, що виділяється під час роботи фотоелементів.

1.2. Переваги та недоліки сонячних батарей

Головна перевага сонячних батарей – їх гранична конструктивна простота і повна відсутність рухомих деталей. Сонячні батареї не потребують будь-яких палив і здатні працювати на внутрішніх ресурсах. Власнику не потрібно хвилюватися про збереження приладу і постійно підтримувати його збереження. Сонячні батареї практично не бояться механічного зносу. Та й обслуговування їм ніяке не потрібно [6]. Невелику питому вагу, невибагливість, максимально простий монтаж і мінімальні вимоги до обслуговування під час експлуатації (зазвичай досить лише протирати бруд з робочої поверхні). Дані пристрої здатні

прослужити не менше двадцяти п'яти років. Застосовувані технології і матеріали повністю відповідають найвищим екологічним нормам, сонячні батареї не виробляють викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище і абсолютно безпечні. Отримання енергії з використанням сонячних батарей дозволяє заощадити чималі фінансові кошти. На відміну від традиційних джерел, цей тип ресурсів практично невичерпний. Отримання традиційних джерел енергії сьогодні стає все більш дорогим задоволенням і серйозно б'є як по кишені простих споживачів, так і по бюджетам багатьох держав.

Недоліки сонячних батарей *Невисокий ККД.* Сонячні батареї перетворюють енергію вибірково – для робочого збудження атомів потрібні певні енергії фотонів (частоти випромінювання), тому в одних смугах частот перетворення йде дуже ефективно, а інші частотні діапазони для них не приносять користі [7]. Крім того, енергія уловлених ними фотонів використовується квантово – її «надлишки», що перевищують необхідний рівень, йдуть на шкідливий в даному випадку нагрів матеріалу фотоперетворювача. Багато в чому саме цим і пояснюється їх невисокий ККД. До речі, невдало вибравши матеріал захисного скла, можна помітно знизити ефективність роботи батареї. Справа ускладнюється тим, що звичайне скло досить добре поглинає високоенергетичну ультрафіолетову частину спектру, а для деяких типів фотоелементів саме на часі саме цей діапазон, енергія інфрачервоних фотонів для них занадто мала.

Чутливість до забруднень. Навіть досить тонкий шар пилу на поверхні фотоелементів або захисного скла може поглинути істотну частку сонячного світла і помітно знизити вироблення енергії. У курному місті це зажадає частого очищення поверхні сонячних батарей, встановлених горизонтально або похило. Безумовно, така ж процедура необхідна і після кожного снігопаду, і після пилової бурі [8].

Зменшення ефективності протягом терміну служби. Напівпровідникові пластини, з яких зазвичай складаються сонячні батареї, з часом деградує і втрачають свої властивості, в результаті і без того не надто високий ККД

сонячних батарей стає ще менше. Тривала дія високих температур прискорює цей процес. Проте, сучасні фотоперетворювачів здатні зберігати свою ефективність протягом багатьох років [8]. Вважається, що в середньому за 25 років ККД сонячної батареї зменшується на 10%. Так що зазвичай набагато важливіше вчасно протирати пил. Сонячні батареї неможливо використовувати в більшості районів нашої країни через погодні умови і недостатню кількість сонячних днів [9].

Чутливість до високої температури. З підвищенням температури ефективність роботи сонячних батарей знижується. При температурах вище 100..150 °C вони можуть тимчасово стати непрацездатними, а ще більший нагрів може привести до їх повного пошкодження акумулятора. Тому необхідно вживати всіх заходів для зниження нагріву, неминучого під палючими прямими сонячними променями [10]. Додатково ускладнює ситуацію те, що чутлива поверхня досить тендітних фотоелементів часто закривається захисним склом або прозорим пластиком. В результаті утворюється своєрідний «парник», що збільшують перегрів. Правда, збільшивши відстань між захисним склом і поверхнею фотоелемента і з'єднавши зверху і знизу цю порожнину з атмосферою, можна організувати конвекційний потік повітря, природним чином охолоджуючий фотоелементи. Однак на яскравому сонці і при високій температурі зовнішнього повітря цього може виявитися недостатньо. Тому сонячна батарея навіть не дуже великих розмірів може зажадати спеціальної системи охолодження [10]. Треба зауважити, що подібні системи зазвичай легко автоматизуються, а привід вентилятора або помпи споживає лише малу частку енергії, що виробляється. При відсутності яскравого сонця такого великого нагрівання немає і охолодження взагалі не потрібно, так що енергія, зекономлена на приводі системи охолодження, може бути використана для інших цілей.

1.3. Різновиди сонячних батарей

Сонячні панелі на основі монокристалічного кремнію виготовляють із високочистого кремнію методом вирощування монокристала з розплаву. У

процесі кристалізації розплавлений кремній твердне при контакті з кристалічною затравкою, поступово формуючи циліндричний злиток монокристала. Типовий діаметр такого злитка становить від 13 до 20 см, а довжина може досягати 200 см. Надалі отриманий злиток розрізають на тонкі пластини товщиною приблизно 250–300 мкм, які використовують як основу для фотоелектричних елементів.

Монокристалічні кремнієві елементи характеризуються високою ефективністю перетворення сонячної енергії, що зумовлено впорядкованою кристалічною ґраткою матеріалу. Така орієнтація атомів сприяє підвищенню рухливості носіїв заряду та зменшенню втрат на рекомбінацію, завдяки чому коефіцієнт корисної дії монокристалічних сонячних елементів може досягати 19 % і більше. У промислових модулях значення ККД зазвичай перебуває в діапазоні 17–22 % [11].

Для збору та відведення електричного струму поверхня кремнієвих пластин покривається сіткою металевих контактів. Традиційно монокристалічні фотоелектричні елементи монтуються в алюмінієву рамку та захищаються загартованим протиударним склом. За зовнішнім виглядом такі елементи мають темно-синій або чорний колір, що є характерною ознакою монокристалічного кремнію.

Монокристалічні сонячні батареї відзначаються високою надійністю та довговічністю; їхній термін експлуатації може досягати 40–50 років. Відсутність рухомих частин забезпечує простоту монтажу та мінімальні витрати на обслуговування. Такі батареї особливо ефективні в регіонах з великою кількістю сонячних днів або в місцях, де централізоване енергопостачання є нестабільним чи відсутнім [11].

Основними сферами застосування монокристалічних сонячних батарей є дахові фотоелектричні установки житлових і громадських будівель, автономні системи освітлення (вуличні та садові ліхтарі), заряджання акумуляторів, енергозабезпечення обладнання на суднах, робота телекомунікаційних пристроїв, насосів, систем сигналізації та інших автономних споживачів.

Попри високу ефективність, монокристалічні сонячні панелі мають відносно високу вартість у перерахунку на одиницю потужності. Крім того, фотоелементи зазвичай мають багатокутну форму, що ускладнює повне заповнення площі модуля без втрат. Унаслідок цього питома потужність готової сонячної батареї дещо нижча за питому потужність окремих фотоелектричних елементів (рис. 1.3).



Рисунок 1.3. Сонячна батарея з монокристалічного кремнію

Альтернативою монокристалічного кремнію є полікристалічний кремній (рис. 1.4). У нього більш низька собівартість. Кристали в ньому ще агрегатні, але мають різну форму і орієнтацію. Цей матеріал, в порівнянні з темними монокристалами, відрізняється яскраво синім кольором. Удосконалення процесу виробництва елементів даного типу дозволяє сьогодні отримувати компоненти, характеристики яких лише трохи поступаються по електричним показникам монокристалів.



Рисунок 1.4 Сонячний елемент 4.7Вт полікристалічний

Тонкоплівкові сонячні батареї поділяються на декілька класів і типів залежно від сфери їх застосування. До малопотужних відносять пристрої, призначені для заряджання мобільних телефонів, портативних електронних пристроїв та іншої малогабаритної електроніки [12]. Такі батареї мають невелику площу фотоактивного шару та відносно високу вартість, що обмежує їх використання переважно портативними застосуваннями.

Окрему групу становлять універсальні тонкоплівкові сонячні батареї, які використовуються для живлення різноманітних споживачів у польових умовах. На ринку представлені як вітчизняні, так і імпорتنі зразки, що істотно відрізняються за ціною та експлуатаційними характеристиками. Такі батареї вважаються найбільш придатними для туристичних і автономних систем енергозабезпечення.

У контексті стаціонарних енергетичних систем найбільший інтерес становлять панелі сонячних елементів, які являють собою фотоактивні шари, нанесені на жорстку або гнучку підкладку. Такі панелі використовуються як базові модулі для побудови фотоелектричних установок, здатних забезпечувати електроенергією житлові або промислові об'єкти.

За технологією виготовлення сонячні батареї поділяють на монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Основною перевагою тонкоплівкових технологій є відносно низька собівартість виробництва, що робить їх перспективними з точки зору масового впровадження та подальшого розвитку. Саме завдяки цій особливості тонкоплівкові сонячні батареї розглядаються як потенційні лідери ринку у найближчі роки.

Використання тонкоплівкових матеріалів дозволяє створювати гнучкі та легкі сонячні батареї, які можуть монтуватися на поверхнях різної форми, включаючи криволінійні конструкції та навіть елементи одягу. Основу таких фотоелектричних елементів становлять полімерні плівки, аморфний кремній, алюміній, телурид кадмію та інші напівпровідникові матеріали, які вже широко застосовуються у портативних зарядних пристроях для мобільних телефонів, ноутбуків, планшетів, відеокамер та інших електронних гаджетів. Часто такі

системи виконуються у вигляді компактних або складаних сонячних батарей невеликого розміру (рис. 1.5).



Рисунок 1.5. Тонкоплівкова батарея

Найперші зразки тонко плівкових сонячних елементів виготовлялися із застосуванням нанесення на підкладку аморфного кремнію, і ККД виходив за все від 4% до 5%, а термін служби не був довгим [13]. Наступним кроком все тієї ж технології стало підвищення ККД до 8% і продовження терміну служби, він став порівняним з кристалічними попередниками (рис. 1.6).

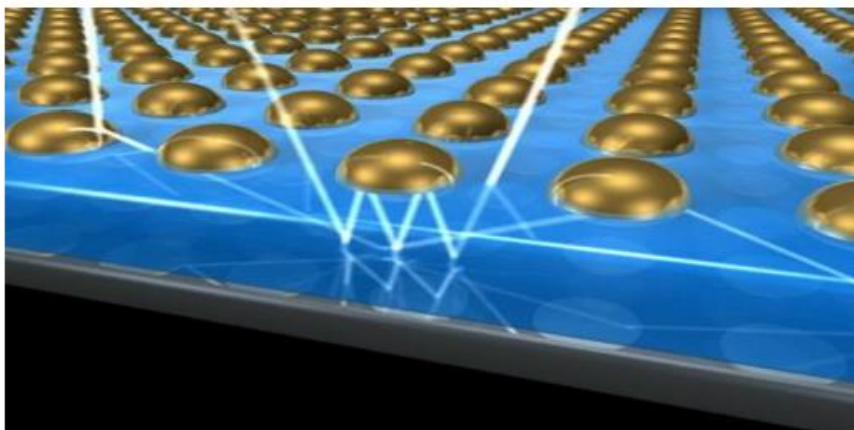


Рисунок 1.6. Структура тонкоплівкової батареї

Застосування таких напівпровідникових матеріалів, як селенід міді-індію та телурид кадмію, дало змогу створити гнучкі сонячні батареї та портативні зарядні пристрої з коефіцієнтом корисної дії до 10 %, що є суттєвим досягненням з огляду на складність підвищення ефективності фотоелектричних

перетворювачів навіть на декілька відсотків [14]. Це зумовлює необхідність детальнішого розгляду технологій виготовлення тонкоплівкових сонячних батарей.

Телурид кадмію як світлопоглинальний матеріал почали активно досліджувати ще у 1970-х роках у зв'язку з пошуком оптимальних матеріалів для космічних застосувань. На сьогодні CdTe залишається одним із найбільш перспективних матеріалів для тонкоплівкових сонячних батарей. Тривалий час дискусійним залишалося питання токсичності кадмію, однак подальші дослідження показали, що рівень його можливого вивільнення в атмосферу є мінімальним і не становить суттєвої загрози. При цьому досягнутий ККД становить близько 11 %, а вартість одного вата встановленої потужності приблизно на третину нижча порівняно з кремнієвими аналогами.

Іншим важливим матеріалом для тонкоплівкових фотоелементів є селенід міді-індію. З огляду на широке використання індію у виробництві плоских дисплеїв, у сучасних сонячних елементах його часто частково замінюють галієм, що має подібні властивості для фотоелектричних застосувань. Тонкоплівкові батареї на основі сполук CIGS здатні досягати ефективності до 20 % [15], що робить їх одними з найефективніших серед тонкоплівкових технологій.

Окремий напрям розвитку становлять полімерні сонячні батареї, у яких світлопоглинальними матеріалами є органічні напівпровідники, зокрема вуглецеві фулерени та фталоціанін міді. Товщина таких фотоелектричних елементів може становити близько 100 нм, однак їхній ККД зазвичай перебуває в межах 5–6 %. Водночас ці технології характеризуються низькою вартістю виробництва, малою масою, високою гнучкістю та екологічною безпечністю, що зумовлює їх популярність у сферах, де важливими є еластичність і простота утилізації.

До ключових особливостей тонкоплівкових сонячних батарей належить їх висока ефективність за умов розсіяного освітлення. У середньорічному вимірі це може забезпечувати до 15 % більшої генерації електроенергії порівняно з кристалічними кремнієвими модулями. Крім того, тонкоплівкові технології

мають перевагу у вартості виробництва, особливо в потужних фотоелектричних системах із встановленою потужністю понад 10 кВт, хоча при цьому потребують у 2–2,5 рази більшої площі розміщення [15].

Тонкоплівкові сонячні батареї є особливо ефективними в регіонах із переважно похмурою погодою, де домінує розсіяне світло, а також у районах з жарким кліматом, оскільки їх ефективність менш чутлива до підвищення температури. Додатковою перевагою є можливість інтеграції таких модулів у фасади будівель як елементів дизайнерських рішень. Деякі тонкоплівкові панелі можуть мати прозорість до 20 %, що розширює можливості їх архітектурного застосування.

У 2008 році американська компанія *Solyndra* запропонувала інноваційне рішення у вигляді циліндричних тонкоплівкових сонячних елементів, у яких фотоактивний шар наноситься на скляні трубки, розміщені всередині захисних оболонок з електричними контактами [16]. Такі конструкції виготовляються з використанням міді, селену, галію та індію. Циліндрична форма дозволяє ефективніше поглинати сонячне випромінювання, зокрема за рахунок відбитих променів від світлих поверхонь дахів, що може додатково підвищувати енергетичну віддачу приблизно на 20 %. Крім того, такі системи характеризуються високою стійкістю до сильних вітрових навантажень.

Більшість сучасних сонячних елементів містять лише один р–п-перехід, що обмежує спектр фотонів, які беруть участь у генерації електричної енергії. Для подолання цього обмеження були розроблені багатоперехідні (каскадні) фотоелементи, у яких кожен шар має власну ширину забороненої зони та окремий р–п-перехід [16]. Така структура забезпечує послідовне поглинання фотонів різних енергій, що суттєво підвищує загальний ККД системи.

У багат шарових тонкоплівкових структурах верхні шари зазвичай формуються з гідрогенізованого аморфного кремнію, а нижні — зі сплавів із додаванням германію у різних концентраціях. Завдяки поступовому зменшенню ширини забороненої зони від шару до шару непоглинуті фотони ефективно використовуються в нижніх шарах. Такий підхід дозволяє знизити вартість

виробленої електроенергії майже вдвічі порівняно з традиційними кремнієвими елементами. В експериментальних зразках досягнуто ККД близько 31 %, а для п'ятиперехідних структур прогноуються значення до 43 % [17].

Останніми роками активно розвиваються рулонні полімерні сонячні батареї. Зокрема, фахівцями МДУ були створені гнучкі фотоелементи на полімерній основі з ККД близько 4 %, які здатні стабільно працювати при температурах до +80 °С протягом понад 10 000 годин. Хоча ці дослідження ще тривають, вони демонструють значний потенціал технології. Водночас швейцарські та японські науковці досягли рекордних значень ККД на тонких полімерних плівках — понад 20 %, використовуючи напівпровідники на основі індію, міді, селену та галію [18]. У Японії також ведуться розробки так званої «сонячної тканини», де фотоелектричні циліндричні елементи малого діаметра інтегруються безпосередньо у текстильні матеріали.

Сонячні батареї з аморфного кремнію Кремнієві сонячні батареї, основу яких складає аморфний кремній, є результатом технологічного вдосконалення методик виготовлення сонячних елементів. Це, переважно, тонкоплівкові моделі. Якщо порівнювати їх з «класичними» на основі кристалів, технології їх виготовлення мають суттєві відмінності. Аморфний кремній, речовина, якому можна надати будь-яку бажану форму – пароутворюючий гідрид [18]. Його гарячі пари залишаються на підкладці, а освіти звичайних кристалів не відбувається. Це забезпечує різке зниження виробничих витрат. Аморфні сонячні панелі володіють істотною відмінністю від моно- та полікристалічних. Воно полягає в тому, що прямий потік світла, що виходить від Сонця, таким батареям не потрібно. Вони прекрасно генерують розсіяне світло, що виходить від світила, яке закрито хмарами. Завдяки гнучкості, на них легко наносяться сучасні напівпровідникові елементи (рис. 1.7).

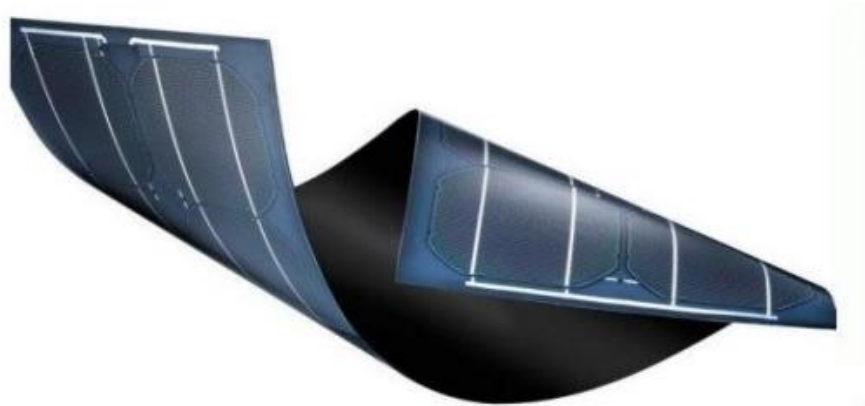


Рисунок 1.7. Сонячна батарея з аморфного кремнію

Аморфні сонячні батареї вирізняються високою здатністю ефективно поглинати слабке та розсіяне світло. Саме тому їх широко використовують у регіонах із прохолодним кліматом і переважно похмурими погодними умовами. Навіть за підвищених температур такі модулі не демонструють помітного зниження продуктивності, хоча панелі на основі арсеніду галію й досі перевершують їх за цим показником [19].

Таким чином, кремнієві сонячні батареї з аморфною структурою мають низку перспективних переваг, зокрема:

- вони менше нагріваються за високих температур і, відповідно, не втрачають ефективності, забезпечуючи вищий рівень виробництва електроенергії. Для кристалічних модулів, навпаки, характерне різке падіння ККД при сильному нагріванні, що супроводжується значними втратами потужності;
- здатні генерувати більшу кількість енергії за умов слабкої освітленості. У ситуаціях із розсіяним світлом кристалічні сонячні батареї можуть повністю припинити роботу, тоді як аморфні модулі під час дощу або суцільної хмарності накопичують на 10–20% більше енергії;
- практично не впливають на зовнішній вигляд будівель, оскільки мають мінімальні габарити та вигляд тонкої плівки або скла, що легко інтегрується в архітектуру або маскується;

- характеризуються низьким рівнем виробничого браку завдяки простішій технології виготовлення. На відміну від них, кристалічні модулі з'єднуються шляхом пайки, що залишається їхнім вразливим місцем. Крім того, аморфні батареї краще переносять часткове чи тимчасове затінення, втрачаючи при цьому меншу частку потужності.

Арсенід-галієві сонячні батареї виготовляються на основі арсеніду галію (рис. 1.8). Для отримання цього матеріалу здійснюють поєднання миш'яку та галію; такі елементи були розроблені як альтернатива традиційним кремнієвим сонячним батареям. Арсенід галію, що використовується у складі сонячних модулів, є напівпровідниковим матеріалом і за своїми фізичними властивостями подібний до кремнію. Водночас його ключовою перевагою є вищі експлуатаційні характеристики. Саме завдяки цим властивостям сонячні батареї на основі арсеніду галію мають значно вищий коефіцієнт корисної дії [20].

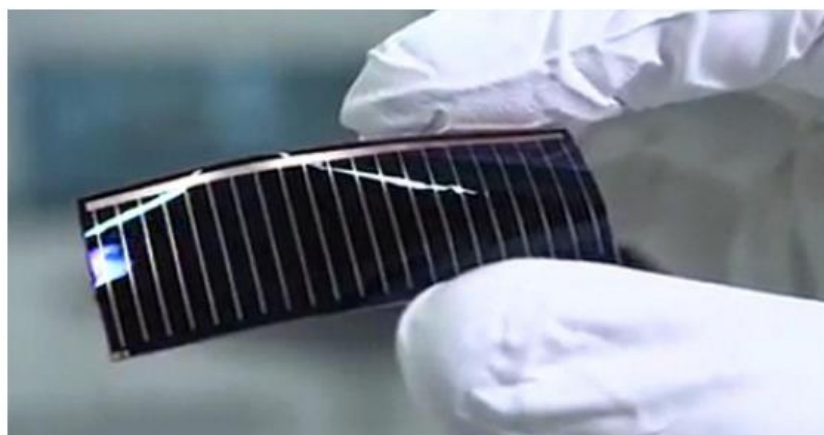


Рисунок 1.8. Арсенід-галієва сонячна батарея

Фотоелементи арсенід-галієвих сонячних панелей мають низку суттєвих переваг. Для досягнення високої ефективності достатньо напівпровідникового шару арсеніду галію товщиною лише кілька мікрометрів, що зумовлено його високою здатністю до поглинання енергії. Завдяки такому тонкому активному шару можливе зменшення розмірів фотокомірок без погіршення їхніх експлуатаційних характеристик [18]. Крім того, сонячні батареї на основі арсеніду галію відзначаються високою радіаційною стійкістю. Вони придатні

для застосування в різних галузях, проте через високу вартість виробництва використовуються обмежено.

Арсенід-галієві панелі також характеризуються високою термостійкістю та здатністю стабільно працювати за умов підвищених температур і навіть перегріву, що зменшує потребу в інтенсивному охолодженні. Сучасні розробки спрямовані на вдосконалення технології їх виготовлення шляхом введення різноманітних домішок. Це дає змогу гнучко коригувати виробничий процес, змінювати параметри сонячних осередків, а в окремих випадках формувати багатошарові структури з різним складом кожного шару. Такий підхід забезпечує більш точний контроль процесів генерації носіїв заряду [20].

Кремнієві сонячні батареї подібних технологічних можливостей не мають. Наразі вже існує можливість створення тришарових арсенід-галієвих структур, у яких кожен шар поглинає певну частину сонячного спектра. У результаті загальна кількість поглинутої енергії істотно перевищує показники одношарових конструкцій, які не здатні ефективно засвоювати широкий спектр випромінювання. Водночас виготовлення таких складних багатошарових систем є надзвичайно витратним як з фінансового, так і з технологічного погляду.

Сонячні батареї на основі телуриду кадмію (CdTe) виготовляються із застосуванням тонкоплівкової технології. Напівпровідниковий шар формується у вигляді тонкої плівки товщиною кілька сотень мікрметрів. Початково ефективність фотоелементів із телуриду кадмію була відносно невисокою — коефіцієнт корисної дії становив близько 11%. Проте, за результатами останніх досліджень компанії First Solar, такі елементи мають потенціал перевершити традиційні кремнієві аналоги. Під час польових випробувань CdTe-панелі продемонстрували продуктивність на рівні 17%, що є співставним із показниками кремнієвих сонячних батарей. Компанія First Solar не лише виробляє сонячні панелі, а й впроваджує їх у масштабних проєктах на великих сонячних електростанціях [21].

Протягом останнього десятиліття, на тлі зниження вартості сонячних елементів завдяки масовому виробництву в Китаї, First Solar зосередилася на

інвестуванні в складні та капіталомісткі технології. На науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи компанія спрямовувала близько 4% власної виручки, що майже вдвічі перевищує середній показник у галузі. Водночас для кристалічних кремнієвих елементів спостерігається уповільнення зростання ефективності: приблизно до 20% у лабораторних умовах і до 16% — у реальній експлуатації. Згідно з нещодавніми заявами First Solar, компанія планує досягти ефективності на рівні 24% у лабораторних умовах протягом двох років, а в польових — близько 19% упродовж трьох років [21].

Телурид кадмію особливо добре зарекомендував себе в умовах жаркого та вологого клімату, зокрема в регіонах південного сходу США та Південної Азії, де найближчим часом прогнозується активне зростання ринку сонячної енергетики. Додатковою перевагою є спрощений виробничий процес: завдяки технології осадження з парової фази повний цикл виготовлення тонкоплівкових панелей First Solar — від прозорого скла до готового модуля — триває лише близько 3,5 години, тоді як виробництво одного кремнієвого елемента може займати до двох діб (рис. 1.9).



Рисунок 1.9. Сонячні батареї на основі телуриду кадмію

CIGS – це напівпровідник, що складається з міді, індію, галію і селену (Cu(In,Ga)Se_2). Цей тип сонячних батарей теж виконаний за плівковою технологією, але в порівнянні з панелями з телуриду кадмію володіє більш високою ефективністю, його ККД доходить до 20% (рис. 1.10) [21].

Потенційні покупці сонячних батарей часто задають собі питання, чи зможе той чи інший тип фотоелектричних перетворювачів забезпечити необхідну потужність всієї системи. Тут треба розуміти, що ефективність сонячних батарей безпосередньо не впливає на кількість вироблюваної установкою енергії. Однакову потужність всієї установки можна отримати за допомогою будь-яких типів сонячних батарей, однак більш ефективні фотоелектричні перетворювачі займуть менше місця, для їх розміщення знадобиться менша площа. Наприклад, якщо для отримання одного кіловата електроенергії буде потрібно близько 8 м^2 поверхні сонячної батареї на основі монокристалічного кремнію, то панелі з аморфного кремнію займуть вже близько 20 м^2 .

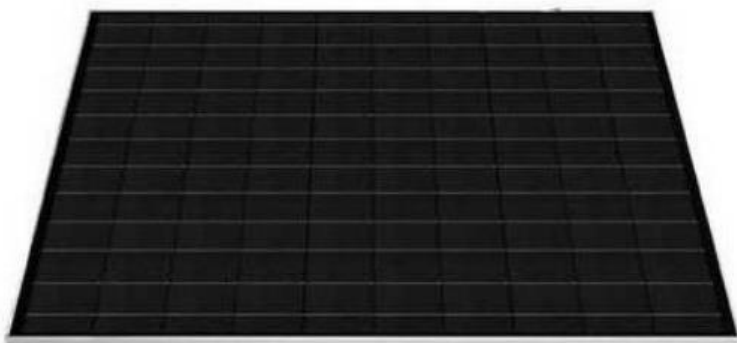


Рисунок 1.10. Сонячна батарея на основі CIGS_2

Наведений приклад, звичайно ж, не є абсолютним [22]. На вироблення електроенергії фотоелектричними перетворювачами впливає не тільки загальна площа сонячних панелей. Електричні параметри будь-якої сонячної батареї визначаються в так званих стандартних умовах тестування, а саме при інтенсивності сонячного випромінювання 1000 Вт/м^2 і робочій температурі панелі 25°C . У країнах Центральної та Східної Європи інтенсивності сонячного

випромінювання рідко досягає номінального значення, тому навіть в сонячні дні фотоелектричні панелі працюють з недовантаженням. Може здатися, що і температура 25° С теж зустрічається не так вже й часто. Однак мова про температуру сонячної панелі, а не про температуру повітря. В рамках загальної тенденції зниження потужності, що з ростом робочої температури, кожен тип сонячних батарей поводить по-різному. Так у кремнієвих елементів номінальна потужність падає з кожним градусом перевищення номінальної температури від 0,43% до 0,47% [22]. У той же час елементи з телуриду кадмію втрачають всього 0,25%.

Таблиця 1.1. Порівняльна таблиця ККД сонячних панелей різних типів

Тип сонячної панелі	ККД, %
Монокристал	17-22
Полікристал	12-18
З аморфного кремнію	5-6
Арсенід-галієві	35-40
На основі телуриду кадмію	10-12
На основі CIGS	15-20

РОЗДІЛ 2. ТОНКОПЛІВКОВІ СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ СПОЛУК CIGS

2.1. Структура та властивості матеріалів CIGS

Матеріали групи CIGS, що є основою високоефективних тонкоплівкових сонячних елементів, представляють собою тверді розчини на основі диселеніду міді-індію (CuInSe_2 , CIS) з частковим заміщенням індію галієм ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, CIGS) або селену сіркою ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x(\text{Se}_{1-y}\text{S}_y)_2$, CIGS(S) або CIGSS). Ці сполуки належать до напівпровідників типу I-III-VI та кристалізуються переважно у тетрагональній структурі халькопіриту (просторова група $I4_2d$) [23]. Структура халькопіриту є надструктурою кубічної структури сфалериту (ZnS), де катіонні позиції впорядковано зайняті атомами Cu та In (або Ga), а кожен атом селену (або сірки) координований двома атомами Cu та двома атомами In/Ga [23]. Параметри кристалічної ґратки дещо змінюються залежно від співвідношення $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ та $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$, причому збільшення вмісту галію або сірки призводить до зменшення параметрів а та с через менші атомні радіуси Ga порівняно з In, та S порівняно з Se (рис. 2. 1) [24].

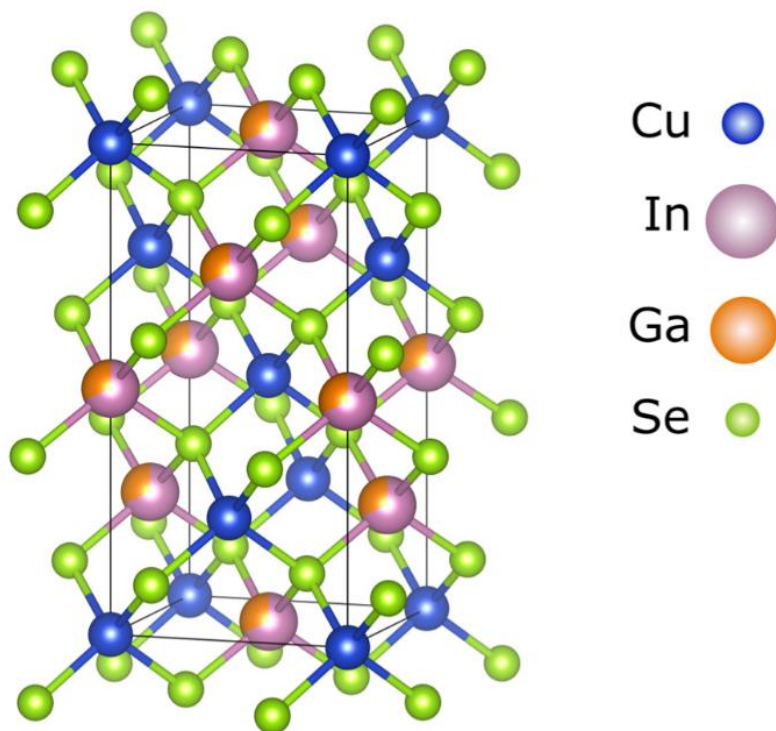


Рис. 2. 1. Тетрагональна структура сполуки типу CIGS [25]

Однією з ключових переваг матеріалів CIGS є їхні оптичні властивості. Вони є напівпровідниками з прямим типом оптичних переходів, що забезпечує високу ймовірність поглинання фотонів [26]. Ширина забороненої зони (E_g) матеріалів CIGS може варіюватися в широкому діапазоні шляхом зміни хімічного складу. Для чистого CuInSe_2 (CIS, $x=0$) E_g становить близько 1.00-1.04 eВ, тоді як для CuGaSe_2 (CGS, $x=1$) E_g зростає до приблизно 1.68-1.70 eВ [26]. Таким чином, змінюючи співвідношення $x=[\text{Ga}]/([\text{In}]+[\text{Ga}])$ від 0 до 1, можна плавно регулювати E_g в діапазоні, оптимальному для поглинання сонячного спектру та створення тандемних структур [27]. Зазвичай для високоефективних монокристалічних сонячних елементів використовують склад з $x \approx 0.3$, що відповідає $E_g \approx 1.15\text{--}1.20$ eВ [28]. Подальше збільшення E_g можливе шляхом заміщення селену сіркою; наприклад, CuInS_2 має $E_g \approx 1.5$ eВ, а CuGaS_2 – близько 2.4-2.5 eВ [29]. Надзвичайно важливим є те, що матеріали CIGS мають дуже високий коефіцієнт оптичного поглинання (α) в видимій та ближній інфрачервоній областях спектру, який сягає $10^4\text{--}10^5\text{см}^{-1}$ [30]. Це дозволяє ефективно поглинати більшу частину сонячного випромінювання у шарі товщиною всього 1-2 мкм, що суттєво зменшує витрату матеріалу [31].

Електричні властивості CIGS також добре підходять для фотовольтаїчних застосувань. Нелеговані матеріали CIGS зазвичай демонструють провідність р-типу [64]. Вважається, що цей тип провідності зумовлений переважно власними дефектами кристалічної структури, зокрема вакансіями міді (V_{Cu}), які є мілкими акцепторами [65, 66]. Інші важливі власні дефекти включають дефекти (InCu , GaCu – донори), вакансії селену (V_{Se} – донор), та комплекси дефектів, які можуть суттєво впливати на концентрацію та рухливість носіїв заряду, а також на час життя неосновних носіїв [28-30]. Концентрація дірок у плівках CIGS, що використовуються в сонячних елементах, зазвичай знаходиться в діапазоні $10^{15}\text{--}10^{17}\text{см}^{-3}$ [31]. Рухливість дірок може варіюватися, але типові значення лежать в межах $1\text{--}25\text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ залежно від складу, методів виготовлення та мікроструктури плівки [32].

Вплив співвідношення In/Ga та S/Se на властивості є визначальним для оптимізації параметрів сонячних елементів. Як зазначалося, збільшення співвідношення Ga/(In+Ga) призводить до зростання ширини забороненої зони E_g [25]. Це дозволяє не тільки адаптувати E_g поглинаючого шару для максимального використання сонячного спектру, але й створювати градієнт E_g по товщині плівки CIGS (рис. 2.2) [34]. Наприклад, збагачення галієм тильного контакту може створювати квазіелектричне поле, що покращує збір носіїв заряду (електронів) та зменшує рекомбінацію на тильному контакті, тоді як збагачення галієм приповерхневого шару (ближче до p-n переходу) може збільшити напругу холостого ходу (V_{oc}) [35].

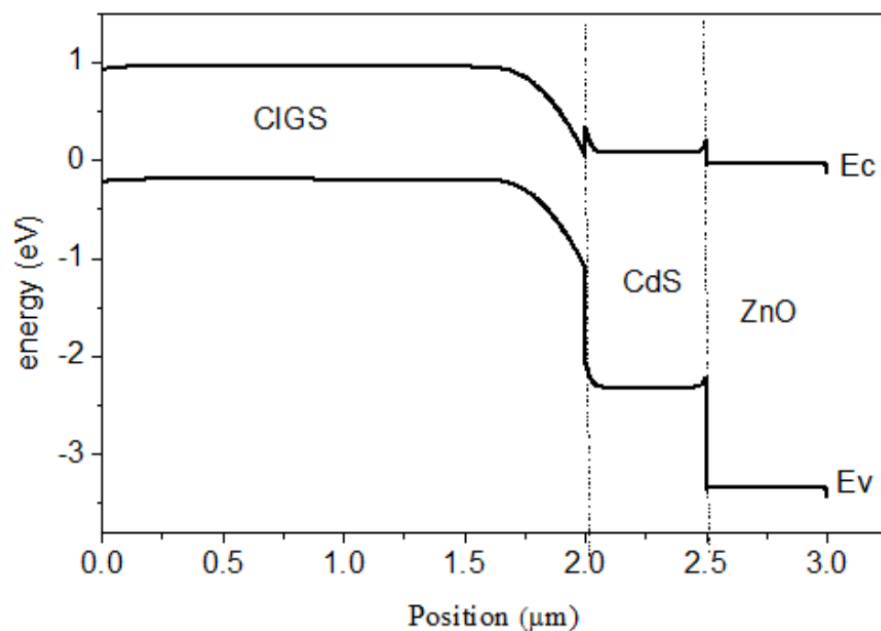


Рис. 2. 2. Зонна діаграма структури типу CIGS.

Однак, надто високий вміст галію може призвести до зменшення часу життя носіїв та погіршення характеристик приладу через утворення глибоких дефектних рівнів або проблем з формуванням якісного p-n переходу [35]. Заміщення селену сіркою також збільшує E_g , що може бути корисним для верхньої комірки в тандемних сонячних елементах або для пристроїв, що працюють при підвищених температурах [34]. Крім того, сірка може впливати на хімічну стабільність та властивості поверхні CIGS, що важливо для формування якісного гетеропереходу з буферним шаром [35]. Оптимальне співвідношення

компонентів та їх розподіл по товщині плівки є предметом активних досліджень та оптимізації для кожного конкретного процесу виготовлення сонячних елементів.

2.2. Методи отримання шарів CIGS

Якість поглинаючого шару Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) є критично важливою для досягнення високої ефективності сонячних елементів. Властивості плівки CIGS, такі як стехіометрія, кристалічна структура, розмір зерен, наявність дефектів та розподіл елементів (особливо Ga та In) по товщині, значною мірою визначаються методом її отримання [36]. На сьогодні розроблено та досліджується значна кількість методів осадження шарів CIGS, які можна умовно поділити на дві великі групи: вакуумні та невакуумні (хімічні) методи [36].

2.2.1. Вакуумні методи

Вакуумні технології, незважаючи на вищу вартість обладнання, дозволяють отримувати плівки CIGS з найкращими характеристиками та найвищою ефективністю перетворення енергії [34].

Метод **співвипаровування (Co-evaporation)** вважається еталонним для отримання плівок CIGS найвищої якості, саме завдяки цьому методу можна досягти рекордних значень ККД для лабораторних зразків [37]. Процес полягає в одночасному або послідовному термічному випаровуванні компонентів – міді (Cu), індію (In), галію (Ga) та селену (Se) (або сірки (S) для CIGS(S)) – з окремих джерел на підігріту підкладку в умовах високого вакууму ($<10^{-3}$ Па) (рис. 3)[38]. Ключовою особливістю методу є можливість точного контролю швидкостей випаровування кожного елемента, що дозволяє формувати плівки із заданим хімічним складом та створювати градієнт концентрації Ga та/або In по товщині плівки [37]. Найбільш поширеним є "тристадійний процес співвипаровування", що забезпечує формування якісної мікроструктури та складу плівки. Цей метод забезпечує дуже високу ефективність сонячних елементів, відмінну якість плівок, точний контроль над складом та можливістю його профілювання, а також можливість росту плівок "in-situ". Однак, до його недоліків відносять високу

вартість обладнання, складність процесу та його контролю, відносно низьку швидкість осадження для масового виробництва та певні труднощі з масштабуванням на дуже великі площі при збереженні однорідності.

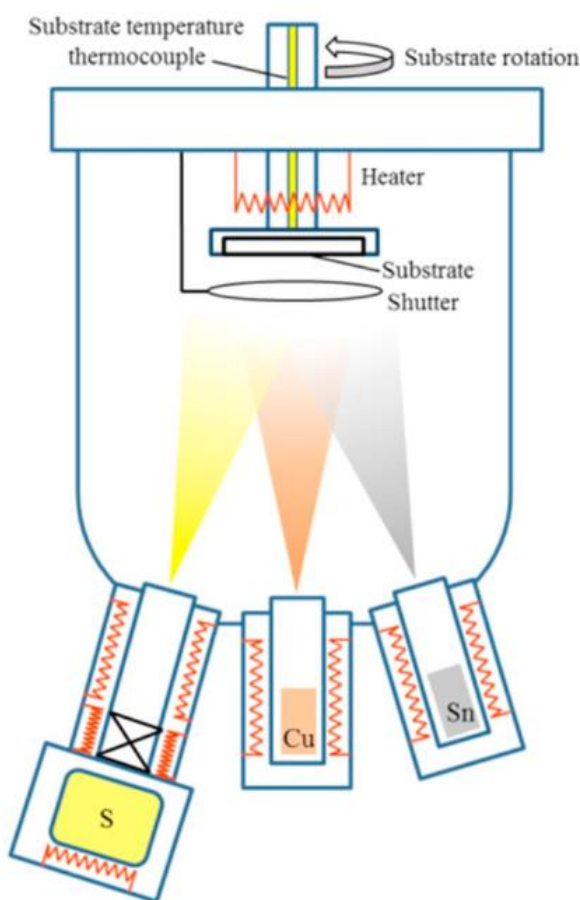


Рис. 2. 3. Схематичне зображення методу співвипаровування [25]

Іншим поширеним вакуумним методом є **магнетронне розпилення з наступною селенізацією/сульфуризацією (Sputtering followed by Selenization/Sulfurization)**. Цей двостадійний підхід є більш притаманний для промислового виробництва завдяки кращій масштабованості та потенційно нижчій вартості [25]. На першій стадії на підкладку методом магнетронного розпилення осаджують металеві прекурсори (окремі метали або сплави) [25]. На другій стадії сформований прекурсор відпалюють при високих температурах (400-600 °C) в атмосфері, що містить пари селену, сірки або їхніх сполук (H_2S , H_2Se), що призводить до утворення плівки $\text{CIGS}(\text{Se}, \text{S})$ (рис. 2.4) [25].

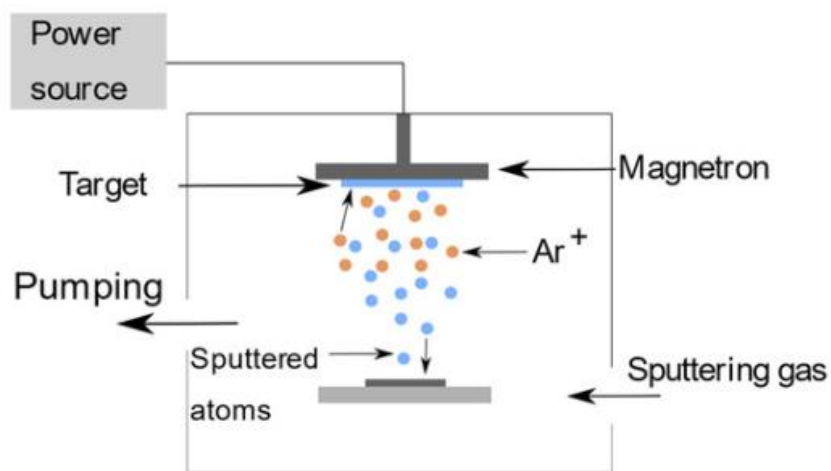


Рис. 2. 4. Метод магнетронного розпилення [25]

Цей метод добре підходить для великомасштабного виробництва, має вищу швидкість осадження прекурсорів, потенційно нижчу вартість обладнання та процесу, а також забезпечує добру адгезію плівок. З іншого боку, це "ex-situ" процес, де контроль стехіометрії та розподілу елементів може бути складнішим; можливе утворення вторинних фаз, а плівки часто мають вищу концентрацію дефектів або менший розмір зерен порівняно з найкращими плівками, отриманими співвипаровуванням, що може обмежувати ККД [36].

2.2.2. Невакуумні (хімічні) методи

Невакуумні методи розглядаються як перспективна альтернатива, оскільки вони потенційно можуть значно знизити виробничі витрати та дозволяють використовувати технології безперервного нанесення [30]. Проте, ефективність сонячних елементів, виготовлених цими методами, поки що зазвичай нижча [30].

До методів на основі розчинів належить **електроосадження**, при якому прекурсори Cu, In, Ga осаджуються на провідну підкладку з електроліту під дією струму, з наступною селенізацією [30]. Цей метод характеризується низькою вартістю обладнання та можливістю осадження на великі площі, але стикається з труднощами контролю складу, однорідності плівок та можливим включенням домішок. **Золь-гель методи** передбачають приготування розчину прекурсорів, нанесення його на підкладку, висушування та термічну обробку з селенізацією. Вони дозволяють добре контролювати стехіометрію в розчині, але отримані плівки можуть мати високу пористість та містити залишкові органічні домішки.

Значну увагу привертають **методи на основі наночастинок або друковані технології**, що передбачають синтез наночастинок CIGS або прекурсорів, формування з них «чорнил» та їх нанесення різними друкарськими техніками з подальшим спіканням та/або селенізацією [30-33]. Ці методи є дуже привабливими через потенціал для високопродуктивного та низькотемпературного виробництва, особливо на гнучких підкладках. Проте, основними проблемами залишаються низька щільність плівок, наявність органічних залишків, малий розмір зерен та, як наслідок, нижча ефективність приладів.

Загалом, невакуумні методи пропонують переваги у вигляді потенційно низької вартості, високої пропускної здатності, можливості обробки в атмосферних умовах для деяких етапів та сумісності з гнучкими підкладками і технологіями рулон-до-рулону. Однак, вони зазвичай поступаються вакуумним методам за ефективністю сонячних елементів через проблеми з контролем мікроструктури, фазової чистоти, можливу наявність домішок та складність отримання плівок з високою щільністю і великими зернами.

Вибір конкретного методу отримання шарів CIGS залежить від багатьох факторів, включаючи бажану ефективність, обсяги виробництва, вартість та специфіку застосування сонячних елементів. Дослідження продовжуються як у напрямку вдосконалення існуючих вакуумних технологій для зниження їх вартості, так і в напрямку покращення якості плівок та ефективності приладів, виготовлених невакуумними методами.

2.3. Будова та функціонування сонячних елементів на основі CIGS.

Ефективна робота сонячного елемента на основі CIGS залежить не тільки від якості самого поглинаючого шару, але й від оптимальної багатошарової будови всього приладу та правильного функціонування кожного з його компонентів [39]. Типовий сонячний елемент CIGS має гетероструктуру, що включає декілька послідовно нанесених шарів, кожен з яких виконує специфічну

функцію для забезпечення ефективного поглинання світла, генерації, розділення та збору носіїв заряду [12].

Стандартна будова такого приладу починається з підкладки, яка слугує механічною основою (рис. 2.5). Найчастіше для цього використовується натрієво-кальцієве скло (SLG), що є відносно дешевим, термічно стабільним та важливим джерелом дифузії натрію (Na) в шар CIGS під час високотемпературних процесів, що дає змогу покращити загальну ефективність комірки [12]. Альтернативно, для гнучких сонячних елементів застосовують поліімідні плівки або тонку металеву фольгу [24]. На підкладку наноситься тильний контакт, зазвичай шар молібдену (Mo) товщиною 0.5-1 мкм, осаджений методом магнетронного розпилення [28]. Молібден забезпечує хороший омичний контакт з р-типом CIGS, має високу електропровідність та хімічну стійкість до селену при високих температурах. Часто на межі Mo/CIGS утворюється тонкий шар MoSe_2 , який може покращувати контакт та зменшувати рекомбінацію [30].

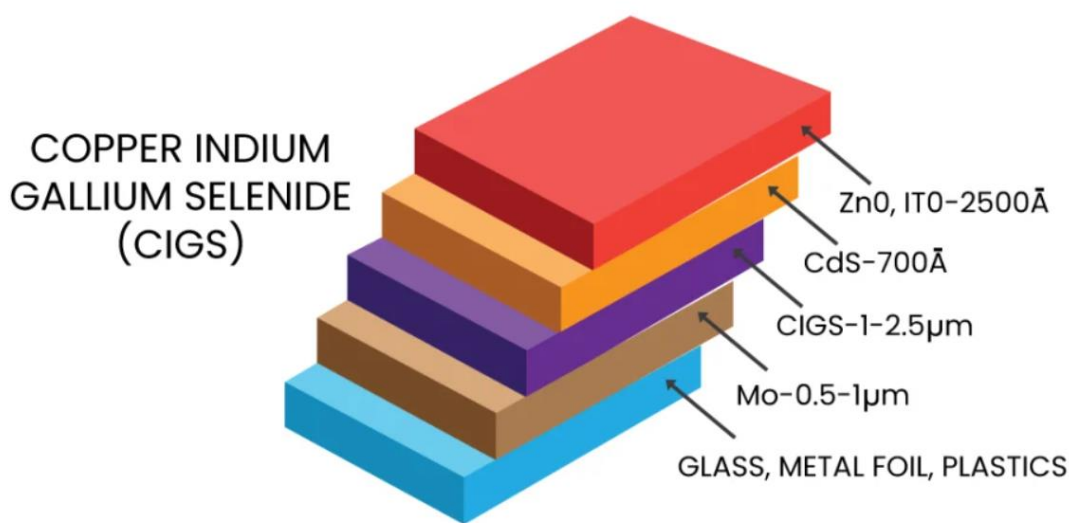


Рис. 2.5. Схема тонкоплівкових перетворювачів на основі сполук CIGS.

Наступним шаром є поглинаючий шар CIGS ($\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$) р-типу провідності, товщиною 1-2,5 мкм, де відбувається поглинання сонячного світла та генерація електронно-діркових пар [38]. За ним формується буферний шар, зазвичай тонкий (30-100 нм) шар сульфід кадмію (CdS) n-типу, що осаджується методом хімічного осадження з розчину (CBD) [39]. Цей шар утворює р-п

гетероперехід із CIGS, захищає його поверхню та оптимізує узгодження енергетичних зон для мінімізації рекомбінації на гетеропереході [15]. Через екологічні міркування та для покращення оптичних властивостей активно розробляються безкадмієві буферні шари, такі як $\text{Zn}(\text{O},\text{S})$, ZnMgO або In_xS_y [15-17].

Прозорий провідний оксид (TCO) слугує фронтальним контактом. Він повинен бути одночасно високопрозорим для сонячного світла та мати високу електропровідність. Часто використовується двошарова структура: тонкий шар власного оксиду цинку ($i\text{-ZnO}$) для захисту буферного шару, а поверх нього – товстіший шар ZnO , легованого алюмінієм (AZO) або бором (BZO), чи оксид індію-олова (ITO) [15-17]. В якості тильного контакту використовують металеву контактну сітку, зазвичай з нікелю/алюмінію (Ni/Al) або срібла (Ag), нанесена на TCO для ефективного збору струму та зменшення послідовного опору сонячного елемента [18].

Механізми генерації та рекомбінації носіїв заряду є ключовими для розуміння роботи сонячного елемента. Коли фотони з енергією, що перевищує ширину забороненої зони E_g матеріалу CIGS, поглинаються в ньому, відбувається генерація електронно-діркових пар [37]. Вбудоване електричне поле $p\text{-}n$ гетеропереходу, що формується на межі CIGS (p -тип) та буферного шару (n -тип), розділяє ці пари: електрони рухаються до n -області (буферний шар та TCO), а дірки – до p -області (тильний контакт) [39]. Цей спрямований рух зарядів і створює фотострум у зовнішньому колі.

Однак, не всі генеровані носії заряду сприяють фотоструму. Частина з них рекомбінує, тобто електрон та дірка «анігілюють», віддаючи свою енергію у вигляді тепла або світла. Рекомбінаційні процеси є основним механізмом втрат у сонячних елементах CIGS і можуть відбуватися в різних областях приладу [40]. До них належать рекомбінація в об'ємі поглинаючого шару через дефекти або на границях зерен, рекомбінація на гетеропереході CIGS/буферний шар, яка часто є домінуючою, рекомбінація на тильному контакті, а також рекомбінація в області просторового заряду гетеропереходу. Мінімізація цих рекомбінаційних втрат

шляхом покращення якості матеріалів, оптимізації будови приладу та пасивації дефектів є ключовим завданням для подальшого підвищення ефективності сонячних елементів на основі CIGS [40].

2.4. Ефективність та стабільність CIGS сонячних елементів

Сонячні елементи на основі Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) міцно утвердилися як одна з провідних тонкоплівкових фотовольтаїчних технологій, що значною мірою зумовлено їхньою високою **ефективністю перетворення енергії (ККД)** та потенціалом для подальшого вдосконалення [39]. Станом на сьогодні, лабораторні зразки CIGS сонячних елементів невеликої площі демонструють ККД, що перевищує 23%, наприклад, досягнення у 23.35% було зафіксовано дослідницькою групою Solar Frontier, а також 23.6% з використанням легування сріблом (Ag) [18]. Для комерційних модулів ККД зазвичай знаходиться в діапазоні 15-19%, що є конкурентоспроможним показником на ринку фотовольтаїки [18]. Такі високі значення ефективності є результатом оптимізації ключових фотовольтаїчних параметрів: напруги холостого ходу (V_{oc}), густини струму короткого замикання (J_{sc}) та коефіцієнта заповнення (FF – fill factor) [15].

Висока густина струму короткого замикання (J_{sc}) в CIGS елементах (часто понад 35-40 mA/cm^2) досягається завдяки широкому спектральному поглинанню матеріалу CIGS, зумовленому його прямим типом забороненої зони та високим коефіцієнтом поглинання, а також ефективному збору генерованих носіїв заряду. Напруга холостого ходу (V_{oc}), яка для найкращих зразків перевищує 0.70-0.75 В, залежить від ширини забороненої зони E_g поглинача, а також від рівня рекомбінаційних втрат, особливо на гетеропереході CIGS/буферний шар та в об'ємі поглинача. Оптимізація градієнта складу Ga/(In+Ga) по товщині шару CIGS, що дозволяє створити сприятливий профіль E_g , відіграє важливу роль у максимізації як J_{sc} (через покращений збір носіїв), так і V_{oc} (через зменшення рекомбінації на тильному контакті та оптимізацію E_g поблизу гетеропереходу). Коефіцієнт заповнення (FF), що характеризує "прямокутність" вольт-амперної характеристики і для якісних CIGS елементів перевищує 75-80%, залежить від

послідовного та паралельного (шунтуючого) опорів сонячного елемента, а також від діодних характеристик p-n переходу [28]. Зменшення дефектності матеріалу CIGS, покращення якості гетеропереходу, оптимізація контактів та мінімізація опору прозорого провідного оксиду є ключовими факторами для досягнення високого FF [28]. Важливу роль у підвищенні ефективності відіграє також контрольоване введення домішок, зокрема натрію (Na) з підкладки або шляхом цілеспрямованого легування, що сприяє пасивації дефектів на границях зерен та покращенню електронних властивостей поглинача [21].

Поряд з високою ефективністю, **стабільність та довготривала надійність** є критично важливими параметрами для будь-якої фотовольтаїчної технології, що претендує на широке комерційне застосування [22]. CIGS сонячні елементи загалом демонструють хорошу стабільність, однак існують певні механізми деградації, які можуть обмежувати їх термін служби або продуктивність в реальних умовах експлуатації. Однією з основних проблем є чутливість до вологи та кисню, особливо за наявності ультрафіолетового (УФ) випромінювання та підвищених температур [21]. Проникнення вологи може призвести до корозії металевих контактів (особливо тильного молібденового контакту), деградації шару TCO, а також до хімічних змін у самому поглинаючому шарі CIGS або на його поверхні/гетеропереході [21]. Наприклад, волога може взаємодіяти з компонентами CIGS, спричиняючи утворення оксидів або гідроксидів, що погіршує електронні властивості. Кисень також може впливати на дефектну структуру та поверхневі стани CIGS [20].

Для підвищення стабільності CIGS сонячних елементів застосовується низка підходів. Найважливішим є забезпечення якісної герметизації (інкапсуляції) модуля, що запобігає проникненню вологи та кисню до активних шарів [20]. Це включає використання спеціальних бар'єрних плівок, герметиків та конструкційних рішень. Окрім цього, ведуться дослідження зі створення більш хімічно стабільних буферних шарів та TCO, а також модифікації самого шару CIGS для підвищення його власної стійкості [21]. Наприклад, використання легуючих домішок або спеціальної обробки поверхні може покращити стійкість

до окиснення. Також важливою є стабільність контактів, зокрема, досліджуються альтернативні матеріали для тильного контакту або захисні покриття для молібдену [5]. Хоча світлова деградація не є такою вираженою проблемою для CIGS, як, наприклад, для деяких аморфних кремнієвих елементів, довготривалий вплив світла та температури може призводити до повільних змін у властивостях, пов'язаних з дифузією атомів або зміною стану дефектів, що також є предметом досліджень [5]. Загалом, при належній інкапсуляції та дизайні, CIGS модулі демонструють довготривалу стабільність, що підтверджується результатами польових випробувань та комерційною експлуатацією протягом багатьох років [40].

2.5. Сучасні досягнення та виклики для сонячних елементів на основі CIGS

Технологія тонкоплівкових сонячних елементів на основі $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) продовжує активно розвиватися, демонструючи значні сучасні досягнення, водночас стикаючись із певними викликами, які необхідно подолати для її ще ширшого впровадження та підвищення конкурентоспроможності [40]. Дослідницькі зусилля зосереджені на подальшому підвищенні ефективності, зниженні виробничих витрат, покращенні довготривалої стабільності та розширенні сфер застосування, зокрема шляхом розробки гнучких фотоелектричних пристроїв.

Одним із ключових напрямків залишається підвищення ефективності перетворення енергії. Останні прориви включають досягнення лабораторних ККД понад 23%, що стало можливим завдяки вдосконаленню процесів виготовлення та глибшому розумінню фізики матеріалу та приладу [39]. Це, зокрема, оптимізація градієнтів складу $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ по товщині поглинаючого шару для покращення збору носіїв та підвищення напруги холостого ходу, використання пост-депозиційних обробок (наприклад, обробка лужними металами, такими як калій (K) або цезій (Cs) на додаток до натрію (Na)), що пасивують дефекти на поверхні та в об'ємі CIGS, а також розробка та впровадження нових або модифікованих буферних шарів для кращого

узгодження зон та зменшення рекомбінації на гетеропереході [15-18]. Вдосконалюються і самі методи осадження, наприклад, розробляються швидші процеси співвипаровування або модифіковані підходи до селенізації розпиленних прекурсорів для покращення якості плівок при одночасному збільшенні пропускної здатності виробництва [12].

Незважаючи на високу ефективність, важливим викликом для технології CIGS є вартість та доступність деяких її компонентів, зокрема індію (In) та галію (Ga) [15]. Ці метали є відносно рідкісними та їх видобуток часто пов'язаний з виробництвом інших металів, що робить їх ціни нестабільними та створює потенційні ризики для сталого великомасштабного виробництва сонячних елементів. У зв'язку з цим, значні зусилля спрямовані на зменшення використання цих матеріалів. Одним із підходів є розробка ультратонких поглинаючих шарів CIGS (товщиною менше 1 мкм) без суттєвої втрати ефективності, що вимагає дуже високої якості матеріалу та оптимізованих стратегій поглинання світла [25]. Інші напрямки включають дослідження можливостей рециклінгу індію та галію з відпрацьованих модулів або виробничих відходів, а також пошук шляхів часткового заміщення індію та галію більш поширеними елементами, хоча останнє завдання є надзвичайно складним через унікальну роль цих елементів у формуванні бажаних електронних властивостей CIGS [25].

Значний прогрес спостерігається у розробці гнучких CIGS сонячних елементів, які відкривають нові можливості для інтеграції фотовольтаїки в різноманітні конструкції, де жорсткі скляні модулі не підходять [24, 25]. Для виготовлення гнучких CIGS елементів використовуються підкладки з полімерів (наприклад, поліімід) або тонкої металевої фольги (наприклад, нержавіюча сталь) (рис.2.6.). Ефективність гнучких CIGS сонячних елементів вже досягла значень, близьких до тих, що отримані на скляних підкладках, перевищуючи 20-22% у лабораторних умовах [28]. Однак, існують специфічні виклики, пов'язані з гнучкими підкладками, такі як забезпечення надійної адгезії шарів, керування механічними напруженнями при вигині, різниця в коефіцієнтах термічного

розширення між шарами та підкладкою, а також необхідність ефективних бар'єрних шарів для захисту від проникнення вологи та кисню через гнучку підкладку, яка може бути менш герметичною, ніж скло [21]. Успішне вирішення цих проблем дозволить розширити застосування CIGS у портативній електроніці, транспорті, аерокосмічній галузі та інтегрований в будівлі фотовольтаїці (BIPV).

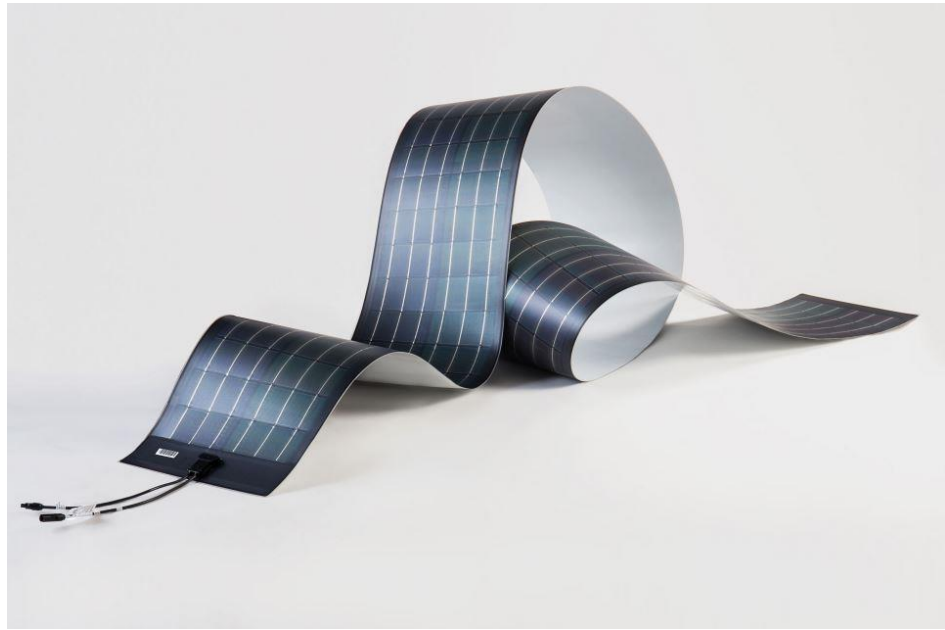


Рис. 2.6. Вигляд гнучкого сонячного елемента на основі CIGS

Незважаючи на вражаючі досягнення, основними викликами для технології CIGS залишаються подальше зниження собівартості виробництва модулів для успішної конкуренції з масовим виробництвом кремнієвих сонячних елементів, масштабування найбільш ефективних лабораторних процесів до промислових обсягів без втрати якості, а також забезпечення гарантованої довготривалої стабільності та надійності модулів у різноманітних кліматичних умовах протягом усього терміну експлуатації [16]. Подолання цих викликів потребує комплексних зусиль у галузі матеріалознавства, інженерії приладів та виробничих технологій.

РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ КОМІРКИ

Потреба у підвищенні коефіцієнта корисної дії сонячних елементів зумовлює ускладнення конструкції та пошук найефективніших механізмів рекомбінації носіїв. Найшвидшими та найменш затратними є методи чисельного моделювання, що дозволяють досліджувати фізичні властивості та конструкцію сонячних елементів [41]. За допомогою модельних підходів можна прогнозувати робочі параметри кристалічних, полікристалічних та аморфних матеріалів у складних структурах, здійснювати проектування та оптимізацію передових сонячних структур.

Завдання спеціалізованих програм полягає у можливості дослідження властивостей фотоелектричної комірки починаючи з моделювання кожного шару і до розрахунку кінцевих параметрів, зокрема Фактору заповнення (FF) та ефективності кінцевої комірки. Особливо важливо отримувати дані в межах одного циклу розрахунку, або хоча б за допомогою одного застосунку, оскільки здійснення переходу між програмними пакетами часом є досить складним процесом і виникає проблема з синхронізацією даних.

3.1. Моделювання характеристик СЕ на основі ГП: основні підходи та принципи

З початку 80-х років ХХ століття комп'ютерне моделювання основних фізичних процесів, які відбуваються в тонкоплівкових СЕ, дуже цікавить дослідників. В наш час широко використовується тривимірне числове моделювання для проектування СЕ та їх тестування.

Програмний пакет, який використовують для моделювання роботи тонкоплівкових СЕ, повинен задовольняти наступним вимогам: - використовуватися для моделювання процесів у багат шарових структурах; - використовуватися для моделювання процесів у СЕ з шарами, ширина 33 яких є більшою 3eV; - враховувати рекомбінації генерованих носіїв заряду на глибоких

рівнях в об'ємі матеріалу та на поверхні; - поділ енергетичних зон на складові частини; - моделювання основних електричних характеристик СЕ як функції від часу; - значна швидкість моделювання фізичних процесів та легкість у використанні. Пакет моделювання повинен мати не менше 6 шарів СЕ, має бути передбачена можливість моделювання не лише темнових і світлових ВАХ, а також інших залежностей (квантовий вихід, частотно-ємнісні залежності тощо). Порівняльні характеристики основних програмних пакетів, які використовуються для моделювання фізичних процесів у СЕ на основі ГП, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Порівняльні характеристики програм для моделювання фізичних процесів у СЕ [42].

	AMPS	SCAPS	ASA	PCID
Макс. кільк. шарів	30	7	необмежена	5
Побудова зонних діаграм	Враховується модель Андерсона			
Розділення енергетичних зон	ні	ні	так	ні
Глибокі стани в ЗЗ	50	3	4	без заряду
Глибокі поверхневі стани	ні	так	ні	ні
Багатопрофільне моделювання	ні	так	так	короткочасно
Числове наближення	враховується			
Швидкість	мала	висока	дуже висока	дуже висока
Інтерактивність	задовільна	добра	відсутня	добра

«Активна» панель у відмічених програмних продуктах дозволяє встановити вхідні параметри для моделювання: робочу температуру, діапазон напруги, частоту, тип випромінювання тощо. Після введення початкових параметрів використовується «активний перелік розрахункових залежностей», що дозволяє одержувати ВАХ, частотно-ємнісні характеристики, залежності «квантовий вихід – довжина хвилі (енергія фотона)» та ін. Програмні пакети, наведені у таблиці 3.1. мають свої переваги і недоліки, але найбільш застосованим з них є програмний пакет SCAPS. У програмному пакеті SCAPS основні параметри моделювання можуть бути задані користувачем. Це дозволяє використовувати пакет програм для ефективного вирішення певних задач. В програмному пакеті SCAPS можна зберігати результати моделювання в форматі ASCII і далі обробляти їх в інших програмних пакетах. Завдяки своїм перевагам перед іншими програмними пакетами SCAPS набув широкого використання.

Опишемо основні особливості програмного пакету SCAPS-1D [43]:

1. Можливість розділення рівнів Фермі – користувач може редагувати показники для визначення електростатичного потенціалу та положення рівнів Фермі;
2. У випадку відхилень в розрахунках дані виводяться на екран, що дає користувачу можливість спостерігати всі розраховані точки;
3. Освітлення ГП можливо з фронтальної і з тильної сторони;
4. Методом інтерполяції з попередньо розрахованих ВАХ визначають основні параметри СЕ;
5. Результати дослідження виводяться в лінійному і в логарифмічному масштабах;
6. Числові дані моделювання зберігаються і можуть оброблятися в інших утилітах. Завдяки своїм можливостям програмний пакет SCAPS широко застосовується для моделювання основних характеристик СЕ на основі гетеропереходів.

3.2. Програмні засоби моделювання сонячних елементів та їх функціональні можливості

Gpvdм (нова назва OPVDM: Органічна фотоелектрична модель пристрою – (модель фотоелектричних пристроїв загального призначення)) – безкоштовний інструмент загального призначення для моделювання оптико-електронних пристроїв (рис. 1). Першими приладовими структурами для дослідження були органічні сонячні елементи, але тепер функціонал розширено для моделювання інших класів пристроїв, включаючи OLED, OFET та багато інших типів сонячних елементів 1-го, 2-го та 3-го поколінь [41]. На даний час модель дозволяє симулювати:

- Органічні сонячні батареї (пристрої OPV);
- Органічні світлодіоди (OLED);
- Транзистори з органічним полем (OFET);
- Сонячні батареї кристалічного кремнію;
- a-Si сонячні батареї;
- CIGS сонячні батареї.

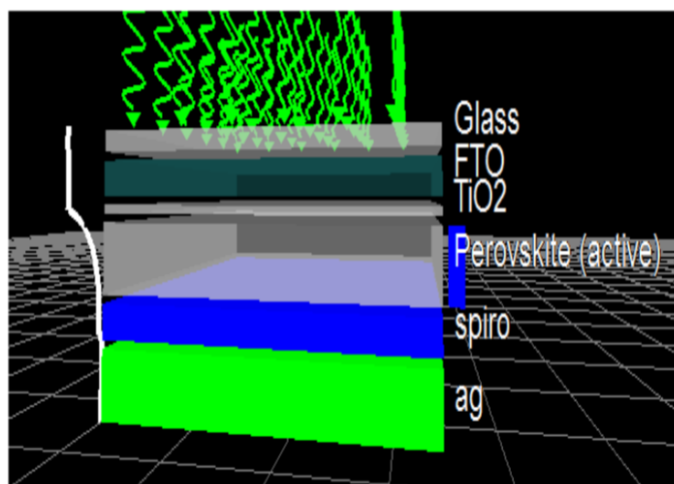


Рис. 3. 1. Загальний вигляд гетеропереходів досліджуваного сонячного елемента у середовищі Gpvdм [41, 42]

Для цього модель містить як електричну, так і оптичну модель, що дозволяє імітувати як характеристики струму / напруги, так і оптичний модальний профіль всередині пристрою [41, 42]. Модель та простий у

використанні графічний інтерфейс доступний для Windows та Linux (x86 та ARM).

PECSIM – програмне забезпечення для моделювання сенсibilізованих на фарбування сонячних елементів (DSSC). Програмне забезпечення для фотоелектрохімічного моделювання PECSIM – це імітаційне програмне забезпечення для системного аналізу на основі моделей та оптимізації сонячно-осередкових батарей (DSSC). Графічний інтерфейс користувача PECSIM простий та зручний у використанні.

Користувач отримує уявлення про складну взаємодію компонентів сонячних батарей DSSC, яка необхідна для аналізу втрат на перетворення енергії та розробки стратегій оптимізації сонячних елементів. PECSIM заснований на валідованій оптичній та електричній моделі. Оптична модель заснована на алгоритмі відстеження променів, який враховує тонкоплівкову оптику антивідбиваючих покриттів та безліч внутрішніх відбитків світла всередині пристрою. Електрична модель враховує впорскування, транспортування та рекомбінацію носія заряду.

SERIIUS: Центр моделювання та симуляції [41]

PVHub Університету Пурдю надає онлайн доступ до інструментів фотоелектричного моделювання:

Серед інструментів PVHub є такі:

PV Analyzer: інструмент для швидкого аналізу даних та вилучення параметрів з вимірювань сонячних елементів.

PVPanelSim: забезпечує двовимірне SPICE-моделювання тонкоплівкових сонячних елементів, включаючи навантаження, спричинену шунтом та часткові тіньові ефекти.

TAG Solar Cell Model: пакет, що містить компактну модель, модель на основі фізики для сонячних елементів a-Si, і генератор мережевого моделювання в Matlab, який може генерувати входи HSPICE для широкомасштабного моделювання панелей.

Університет Вашингтона в Сент-Луїсі та Національна лабораторія Лоуренса Берклі розробив наступний інструмент:

aMoBT, *ab initio* модель для обчислення коефіцієнта рухливості та Зеєбека в напівпровідниках з використанням транспортного рівняння Больцмана (aMoBT). aMoBT прогнозує електричну мобільність поточних або нещодавно розроблених фотоелектричних матеріалів та забезпечує розуміння транспортування носіїв та його теоретичних меж [15].

Центр вивчення науки, технологій та політики (CSTEP) також має такий інструмент:

Сонячна техніко-економічна модель **CSTEP (CSTEM)** – графічний інструмент користувальницького інтерфейсу, який оцінює продуктивність технології параболічного наближення з урахуванням варіантів термічного зберігання та гібридизації [41].

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) – це одновимірна програма моделювання тонкоплівкових сонячних елементів, розроблена на кафедрі електроніки та інформаційних систем (ELIS) університету в Генті, Бельгія.

Спочатку програма була розроблена для структур CuInSe_2 та сімейства CdTe . Останні розробки дають можливість застосувати програму також для кристалічних сонячних елементів (сімейство Si та GaAs) та аморфних (a-Si та мікроморфний Si) [45].

Інструменти моделювання процесів та пристроїв для прискорення інновацій, технологій комп'ютерного проектування (**TCAD**) стосуються використання комп'ютерних моделей для розробки та оптимізації технологій і пристроїв обробки напівпровідникових технологій. **Synopsys TCAD** пропонує широкий набір продуктів, що включає провідні інструменти для моделювання процесів та пристроїв, а також потужне середовище моделювання, кероване графічним інтерфейсом, для управління завданнями моделювання та аналізу результатів моделювання.

Засоби моделювання процесу TCAD та пристроїв підтримують широкий спектр застосувань, таких як CMOS, живлення, пам'ять, датчики зображення,

сонячні батареї та аналогові/радіочастотні пристрої. Крім того, Synopsys TCAD надає інструменти для моделювання та вилучення взаємозв'язків, надаючи критичну паразитарну інформацію для оптимізації продуктивності чіпа.

Рішення TCAD включають:

Моделювання сонячних елементів: Інструменти моделювання Sentaurus TCAD надають ключову інформацію про внутрішні фізичні механізми, що впливають на продуктивність сонячних елементів, тим самим підвищуючи ефективність та зменшуючи виробничі витрати [41].

SCAPS – це програма графічного моделювання сонячних комірок, розроблена на кафедрі електроніки та інформаційних систем (ELIS) університету в Генті, Бельгія, професором Марком Бургельманом [45]. Опис програми та алгоритми, які вона використовує, можна знайти у посиланнях [15-7].

Чисельне моделювання все частіше використовується як інструмент для розуміння фізичної роботи сонячних елементів. Для розуміння оптичних та електричних властивостей сонячної батареї проводяться різні вимірювання. Однак важко проаналізувати ці вимірювання без точної моделі. Тому чисельне моделювання необхідно для інтерпретації розширеного вимірювання на складних структурах, проектування та оптимізації вдосконалених клітинних структур. Нижче наведено основні переваги модельного інструменту SCAPS:

- Можливість розв'язання основних рівнянь – рівняння Пуассона та рівняння неперервності для електронів та дірок;
- Одночасне моделювання декількох напівпровідникових шарів із наявними опціями;
- Правильне зображення розривів в енергетичних діапазонах E_C та E_V на межі розділу;
- Забезпечення конвергенції більшості структур сонячних елементів;
- Можливість врахування різних механізмів тунелювання;
- Швидкий і зручний для користувачів.

3.3. Моделювання тонкоплівкових сонячних комірок у середовищі SCAPS-1D

В основному SCAPS використовується для моделювання тонкоплівкових сонячних елементів на основі CdTe, CIS та CIGS. SCAPS-1D є прикладною програмою для Windows і написана в коді C.

SCAPS-1D та AMPS – це дві програми для моделювання, розроблені в університетах Гента та Пенсільванії. SCAPS зазвичай використовується для моделювання сонячних елементів та обчислення стаціонарних діаграм смуг, профілів рекомбінації та транспортування носія в одному вимірі. Розрахунки ґрунтуються на розв’язанні рівняння Пуассона разом із рівняннями діркової та електронної неперервності. Струми рекомбінації обчислюються за моделлю Шоклі-Рид-Холла (SRH) для об’ємних дефектів, але розширення цієї моделі SRH застосовується до дефектів інтерфейсу. Щоб зробити модель максимально простою, у кожен шар вводиться лише один тип однорівневих дефектів. Всі ці дефекти є компенсуючими, розташованими на внутрішньому рівні близько до середньої щільності. Програмне забезпечення SCAPS-1D враховує світловий спектр AM 1,5 та потужність 1000 (Вт/м²) і може описувати шари PSC з різними властивостями. Функціонал програми також дозволяє імітувати кілька загальних вимірювань, включаючи $C-V$, $C-F$, $I-V$ та QE.

Програмне забезпечення дозволяє скласти пристрій максимально з семи шарів та вводити фізичні та електричні параметри окремо для кожного шару. Для температурної залежності ефективної щільності станів і теплової швидкості використовують прості моделі. Інші параметри, такі як пропускна здатність і рухливість, не залежать від температури. Можна визначити до трьох глибоких рівнів для кожного шару, а між цими трьома шарами можуть бути розміщені три стани інтерфейсу. Ці глибокі рівні можуть енергетично розподілятися в забороненій зоні (однорівневий, рівномірний, гаус або експоненціальний хвіст). Рівні глибоких об’ємних речовин також можуть змінюватися просторово всередині шару (рівномірний, ступінчастий, лінійний або експоненційний). Всі

інші властивості просторово рівномірні для кожного шару. Отже, для введення градуированих стиків у пристрій необхідно використовувати кілька шарів.

Параметри збудження відображаються в окремому вікні разом з параметрами, необхідними для визначення умов вимірювань. SCAPS здійснює розрахунок залежності щільності фотоструму і напруги (current density-voltage ($J-V$), ємності від напруги $C(V)$, ємності від геометричних параметрів $C(f)$ та спектральну відповідь модельних структур. Кожне вимірювання може бути обчислене для світлих або темних умов і як функція температури. В процесі створення та розрахунку моделі на екрані відображаються діаграми енергетичної смуги, заряд і струми в пристрої для кожної проміжної напруги зсуву або довжини хвилі. Ці проміжні рішення можуть бути збережені у файл. Коли моделювання завершено, характеристики можна переглядати та порівнювати з характеристиками інших симуляцій, які також – зберегти у файл. Ця функція робить SCAPS дуже інтерактивною програмою.

SCAPS-1D вирішує одновимірні напівпровідникові рівняння, такі як:

А. Рівняння струму – густини:

Провідність струму в основному складається з двох компонентів, а саме дрейф-компонента, який обумовлений електричним полем, і дифузійної складової, який обумовлений градієнтом носія-концентрації. Вони також називаються конститутивними рівняннями [5-6, 19].

$$J_n = q\mu_n n\varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} = q\mu_n \left(n\varepsilon + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) = \mu_n n \frac{dE_{Fn}}{dx}, \quad (1)$$

$$J_p = q\mu_p p\varepsilon + qD_p \frac{dp}{dx} = q\mu_p \left(p\varepsilon + \frac{kT}{q} \frac{dp}{dx} \right) = \mu_p p \frac{dE_{Fp}}{dx}, \quad (2)$$

де, ε – електричне поле,

μ_n, μ_p – рухливість електронів і дірок відповідно,

J_n, J_p – густина струму електронів і дірок відповідно,

D_n, D_p – коефіцієнт дифузії електронів і дірок відповідно,

E_{Fn}, E_{Fp} – квазі-рівень Фермі електронів і дірок відповідно.

Б. Рівняння безперервності:

У напівпровіднику існують різні механізми транспортування носіїв. Рівняння безперервності включають залежні від часу явища, такі як генерація, рекомбінація та ін'єкція низького рівня. Ефект дрейфу, дифузії, непрямой чи прямої теплової генерації чи рекомбінації призводить до зміни концентрації носіїв по відношенню до часу. Чиста зміна концентрації носія – це різниця між генерацією та рекомбінацією, плюс чистий струм, що протікає в зазначеній області та поза нею.

$$-\frac{\partial J_n}{\partial x} - U_n + G = \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (3)$$

$$-\frac{\partial J_p}{\partial x} - U_p + G = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (4)$$

де G – коефіцієнт генерації,

U_n, U_p , – поточна швидкість рекомбінації / генерації.

В. Рівняння Пуассона:

Рівняння Пуассона дає вихідну точку для отримання якісного рішення для електростатичних змінних у напівпровіднику. Відповідно:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_0 \epsilon \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = -q(p - n + N_D - N_A), \quad (5)$$

де $q(p - n + N_D - N_A) = \rho$ (щільність заряду), вважаючи легування повністю іонізованими,

N_D, N_A – концентрація домішок донора та акцептора відповідно.

Разом з відповідними граничними умовами на інтерфейсах та контактах, це призводить до створення системи сполучених диференціальних рівнянь у (ψ, n, p) або (ψ, E_{Fn}, E_{Fp}) .

Стаціонарний і малий сигнал сигналу цієї системи чисельно розраховується використовуючи SCAPS-1D. Спочатку рішення постійного струму обчислюється алгоритмом постійного струму. Тоді алгоритм змінного струму обчислює комплексне допущення з рішення постійного струму.

Фізична модель.

Для рекомбінації інтерфейсів SCAPS-1D використовує модель Pauwells Vanhoutte [44]. Модель розглядає чотири смуги для станів інтерфейсу, тобто смуги провідності та валентності обох напівпровідників на інтерфейсі.

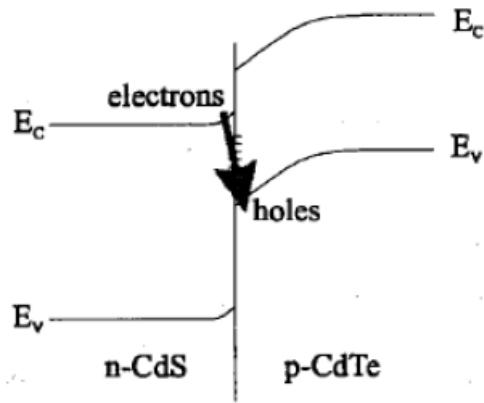


Рис. 3. 2. Модель Pauwells Vanhoutte гетеропереходу CdS/CdTe [44]

Ця теорія розглядає рекомбінацію електронів одного напівпровідника з дірками іншого напівпровідника разом зі стандартною рекомбінацією електронів з дірками всередині одного і того ж напівпровідника. Тут найважливіший шлях рекомбінації – це рекомбінація «віконних електронів» з «поглинальними» дірками. Сумарна зарядка в станах інтерфейсу дорівнює розриву діелектричного переміщення на інтерфейсі.

У SCAPS-1D передбачається, що квазі-рівні Фермі електронів і дірок перериваються на інтерфейсі, коли струм протікає через інтерфейс. Це враховується, включивши один додатковий вузол на інтерфейсі в числовий алгоритм. Електростатичний потенціал передбачається безперервним на інтерфейсах.

Для пояснення транспорту вільних носіїв через інтерфейс була використана термоіонна теорія викидів. Термоелектричний струм випромінювання електронів для двох напівпровідників прямої смуги з однаковими ефективними масами задається

$$j_{th\ n} = v_{th\ n} \left(n^{(1)} \exp \left(-\frac{|\Delta E_c|}{kT} \right) - n^{(2)} \right), \quad (6)$$

де $j_{th\ n}$ – струм частинки від напівпровідника 1 до 2,

$v_{th\ n}$ – теплова швидкість електронів,

$n^{(1)}, n^{(2)}$ – концентрація електронів,

ΔE_c – розрив зони провідності.

Аналогічно можна розрахувати струм випромінювання для дірок. При контакті металевого напівпровідника граничні рівняння накладаються на рівняння неперервності для електронів:

$$j_n = S_n(n - n_{eq}), \quad (7)$$

де n_{eq} – число електронів на контакті в рівновазі. Якщо електрони є більшістю носіїв на контакті, то:

$$S_n = \frac{A^* T^2}{q N_c} = v_{th} n, \quad (8)$$

де A^* – ефективна константа Річардсона.

Коли електрони є носіями в меншості на контакті, то S_n у рівнянні (7) – швидкість поверхневої рекомбінації електронів.

SCAPS-1D використовувався для моделювання $J-V$ характеристик сонячних елементів CdS-CdTe. Основний екран, який з'являється після запуску SCAPS-1D, показано на рисунку 3.3.

На робочій панелі вводяться температура (K), напруга (V), частота (Гц) та кількість операцій. Серія опорів, опір шунту, освітленість (темно/світло) вводяться на панель запуску.



Рис. 3.3. Панель запуску SCAPS

Користувач може отримати результати у вигляді таких характеристик: $I-V$, $C-V$, $C-f$, $Q(\lambda)$, електричне поле, діаграми забороненої зони, густину носіїв, часткові струми рекомбінації. Для отримання температурної залежності ефективної густини станів і теплової швидкості використовувались прості моделі. Інші параметри, такі як ширина забороненої зони та рухливість, не залежать від температури. Завдання вирішується натисканням на нижню кнопку SET PROBLEM на панелі запуску. На рисунку 3.4 показана панель визначення сонячної комірки SCAPS.

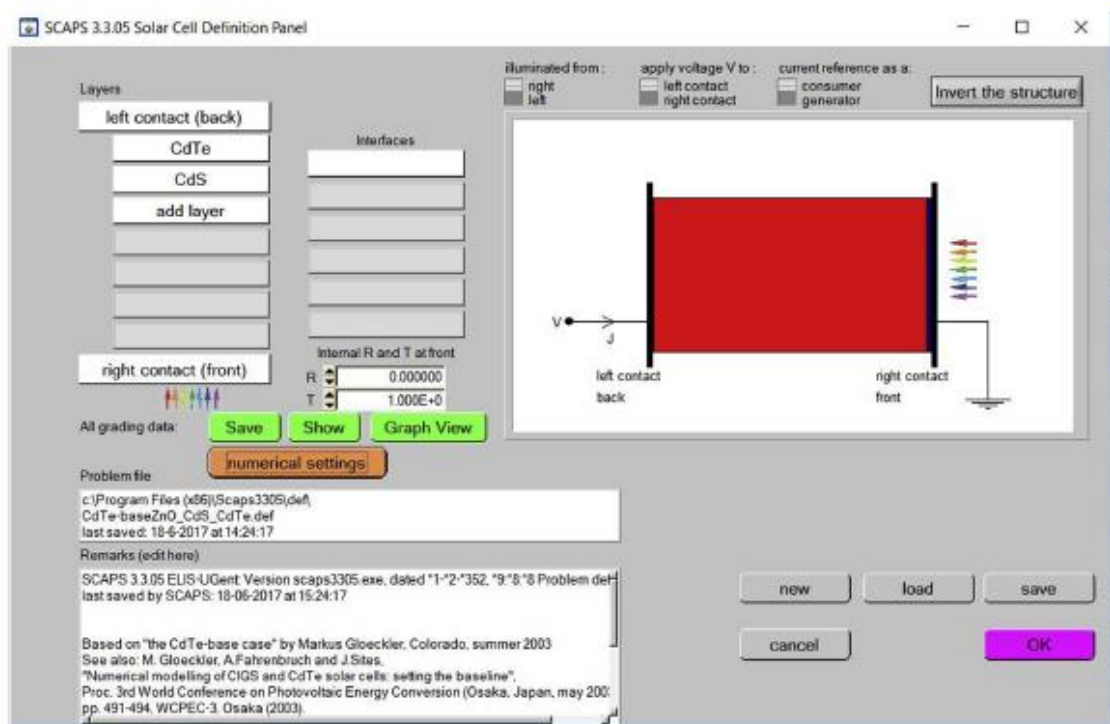


Рис. 3.4. Панель параметрів сонячної комірки SCAPS

ВИСНОВКИ

1. У роботі проаналізовано сучасний стан розвитку сонячної фотовольтаїки та показано, що тонкоплівкові сонячні елементи є перспективним напрямом відновлюваної енергетики завдяки зменшеній витраті матеріалів, можливості великомасштабного виробництва та розширеним сферам застосування порівняно з традиційними кремнієвими технологіями.
2. Встановлено, що сонячні елементи на основі сполук CIGS поєднують високий коефіцієнт оптичного поглинання, ширину забороненої зони та добру стабільність параметрів, що забезпечує їх конкурентоспроможність серед тонкоплівкових фотоелектричних технологій.
3. Показано, що чисельне моделювання є ефективним інструментом для дослідження фізичних процесів у багатошарових сонячних фотоелектричних комірках, оскільки дозволяє аналізувати генерацію, транспорт і рекомбінацію носіїв заряду без проведення значної кількості експериментальних досліджень.
4. Проаналізовано сучасні програмні засоби моделювання сонячних елементів та обґрунтовано доцільність використання програмного комплексу SCAPS-1D для дослідження тонкоплівкових сонячних комірок, зокрема на основі CIGS.
5. У результаті чисельного моделювання в середовищі SCAPS-1D досліджено вплив параметрів матеріалів і шарів структури на вольт-амперні характеристики, фактор заповнення та ефективність сонячної фотоелектричної комірки, що підтверджує доцільність застосування чисельного моделювання для оптимізації параметрів тонкоплівкових сонячних елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак (2015) Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. № 3. С. 2-10.
2. P. Sawicka-Chudy, M. Sibiński, E. Rybak-Wilusz, M. Cholewa, G. Wisz, R. Yavorskyi (2020) Review of the development of copper oxides with titanium dioxide thin-film solar cells AIP Advances. Vol. 10, № 1. P. 010701–010701-15.
3. Kumar, P. (2016). Organic solar cells: device physics, processing, degradation, and prevention. CRC press.
4. G. Wisz, L. Nykyruy, V. Yakubiv, I. Hryhoruk, R. Yavorskyi (2018) Impact of Advanced Research on Development of Renewable Energy Policy: Case of Ukraine International Journal of Renewable Energy Research (IJRER). Vol. 8, № 4. P. 2367–2384.
5. Nykyruy L.I., Zamurujeva O.V., Urban O.A., Fedosov S.A. (2020) The Impact of Scientific Research on the Development of Renewable Energy Perspective Technologies and Devices № 16. P. 82–91.
6. Lin, X., Wang, Y., Pedram, M., Kim, J., & Chang, N. (2013). Designing fault-tolerant photovoltaic systems. IEEE Design & Test, 31(3), 76-84.
7. Meyer, E. L., & Van Dyk, E. E. (2004). Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters. IEEE Transactions on reliability, 53(1), 83-92.
8. S. Degrave, M. Burgelman, P. Nollet (2003) Modelling of polycrystalline thin film solar cells: new features in scaps version 2.3 Proc. of 3rd World Conf. on Photovolt. Energy Convers Vol. 1. P. 487–490.
9. M. Gloeckler, A.L. Fahrenbruch, J.R. Sites (2003) Numerical modeling of CIGS and CdTe solar cells: setting the baseline Proc. of 3rd World Conf. on Photovolt. Energy Conver Vol. 1. P. 491–494. Vol. 8, № 4. – P. 2367–2384.
10. Haass S.G., Andres C., Priebe A., Figi R., Schreiner C., Romanyuk Y.E., Tiwari A.N. (2015) Efficient solution-processed kesterite solar cell with a low voltage deficit. Adv. Energy Mater., 5, 1500712.
11. J. Verschraegen, M. Burgelman (2007) Numerical modeling of intra-band tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS Thin Solid Films. Vol. 515, № 15. P. 6276–6279.
12. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.
13. Poortmans J. (2016) Thin film solar cells: Fabrication, characterization and application Poortmans, V. Arkhipov. Leuven, Belgium: John Wiley & Sons, Ltd. IMEC. p. 471
14. Wei, S.H.; Zunger, A. (1995) Role of ordering in chalcopyrite semiconductors. Applied Physics Letters.

15. Yang K.J., Son D.H., Kim S.Y., Jeon B., Kim J., Hwang D.H., Cheong H., Cho S. (2016) A band-gap-graded CZTSSe solar cell with 12.3% efficiency. *J. Mater. Chem. A*, 4, 10151–10158.
16. Y. Liu, Y. Sun, A. Rockett (2012) A new simulation software of solar cells wxamps Sol. Energy Mater. Sol. Cell. Vol. 98. P. 124–128.
17. M. Burgelman, J. Marlein (2008) Analysis of graded band gap solar cells with SCAPS Proc. Of the 23rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf., Valencia. P. 2151–2155.
18. A. Marini, C. Hogan, M. Gruning, D. Varsano (2009) Yambo: an ab initio tool for excited state calculations *Comput. Phys. Commun.* – Vol. 180, No. 8. P. 1392–1403.
19. Sun, K.; et al. (2014) Influence of deposition temperature on grain size in CIGS films. *Thin Solid Films*.
20. Kim, K.; et al. (2016) Solution processing of $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ absorbers: a review. *Energy & Environmental Science*.
21. Li, J.; et al. (2018) High efficiency CIGS solar cells by alkali post-deposition treatment. *Progress in Photovoltaics*.
22. Abou-Ras, D.; et al. (2021) CIGS photovoltaics: reviewing an evolving paradigm. *Journal of Physics D: Applied Physics*.
23. Salhi, B. (2022) The Photovoltaic Cell Based on CIGS: Principles and Technologies. *Materials*.
24. Chirilă, A.; et al. (2013) Potassium-induced surface modification of CIGS absorbers. *Nature Materials*.
25. Todorov, T.K.; et al. (2013) Progress towards kesterite solar cells with Voc close to 1 V. *Advanced Energy Materials*.
26. Guo, Q.; et al. (2014) Fabrication of CZTS solar cells by ink deposition. *Progress in Photovoltaics*.
27. Machkih, K.; Oubaki, R.; Makha, M. A (2024) Review of CIGS Thin Film Semiconductor Deposition via Sputtering and Thermal Evaporation for Solar Cell Applications. *Coatings* 14. 1088.
28. Walsh, A.; et al. (2012) Kesterite thin-film solar cells: advances and prospects. *Energy & Environmental Science*.
29. Mitzi, D.B.; et al. (2011) The path to kesterite solar cells with improved performance. *Advanced Materials*.
30. A. Morales-Acevedo, N. Hernández-Como, G. (2012) Casados-Cruz Modeling solar cells: a method for improving their efficiency *Mater. Sci. Eng. B*. Vol. 177, № 16. – P. 1430–1435.
31. A. Aissat, R. Bestam, J.P. Vilecot (2014) Modeling and simulation of $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$ quaternary structure for photovoltaic *Int. J. Hydrogen Energy*. Vol. 39, № 27. P. 15287–15291.
32. D. Wang, H. Cui, G. Su (2019) modeling method to enhance the conversion efficiency by optimizing light trapping structure in thin-film solar cells *Solar Energy*. Vol. 120. P. 505–513.

33. H. Arbouz, A. Aissat, J.P. Vilcot (2016) Modeling and optimization of CdS/CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ structure for solar cells applications Internat. J. Hydrog. Energy. Vol. 41, № 45. P. 20987–20992.
34. Ya.P. Saliy, R.S. Yavorskyi (2021) The redistribution modeling of implanted impurity stimulated by vacancies Materials Today: Proceedings. Vol. 35, Part 4. P. 576–578.
35. M. Burgelman, J. Verschraegen, S. Degrave, P. Nollet (2004) Modeling thin-film PV devices Prog. Photovoltaics Res. Appl. Vol. 12, № 2. P. 143–153.
36. M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave (2000) Modelling polycrystalline semiconductor solar cells Thin Solid Films. Vol. 361. P. 527–532.
37. Repins I., Beall C., Vora N., DeHart C., Kuciauskas D., Dippo P., To B., Mann J., Hsu W.C., Goodrich A., Noufi R. (2012) Co-evaporated Cu₂ZnSnSe₄ films and devices. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 101, 154–159.
38. P. Sawicka-Chudy, Z. Starowicz, G. Wysz, R. Yavorskyi, Z. Zapukhlyak, M. Bester, M. Sibiński, M. Cholewa (2019) Simulation of TiO₂/CuO solar cells with SCAPS-1D software Materials Research Express. Vol. 6, № 8. P. 085918.
39. L.I. Nykyrui, R.S. Yavorskyi, Z.R. Zapukhlyak, G. Wysz, P. Potera (2019) Evaluation of CdS/CdTe thin film solar cells: SCAPS thickness simulation and analysis of optical properties Optical Materials. Vol. 92. – P. 319–329.
40. V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. (2009) Goetzberger High –Efficient Low-Cost Photovoltaics: recent Developments Springer series in optical sciences Vol. 140. P.8541
41. Chen S., Gong X.G., Walsh A., Wei S.H. (2009) Defect physics of the kesterite thin-film solar cell absorber Cu₂ZnSnS₄. Appl. Phys. Lett., 94, 041903.
42. Li J., Sun K., Yan C., Sun H., Liu F., Zhang Y., Hao X. (2020) Boosting CZTSSe solar cell performance by a new interface passivation approach. Adv. Energy Mater., 10, 2002156.
43. A. Hima, A. Khechekhouche, I. Kemerchou, N. Lakhdar, B. Benhaoua, F. Rogti, I. Telli, A. Saadoun (2018) GPVDM simulation of layer thickness effect on power conversion efficiency of CH₃NH₃PbI₃ based planar heterojunction solar cell / // International Journal of Energetica. Vol. 3, № 1. P. 37–41.
44. Baraneedharan P., et al. Recent advances and remaining challenges in CZTS/CZTSe solar cells. Nanomaterials, 14, 1867
45. Z.R. Zapukhlyak, L.I. Nykyrui, G. Wysz, V.M. Rubish, V.V. Prokopiv, M.O. Halushchak, I.M. Lishchynskyy, L.O. Katanova, R.S. Yavorskyi (2020) SCAPS modelling of ZnO/CdS/CdTe/CuO photovoltaic heterosystem Physics and Chemistry of Solid State. Vol. 21, № 4. P. 660–668.