

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКОПЛІВКОВОЇ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ НА ОСНОВІ
ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МНПм-22-1

Стаднік Д. В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна
техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Мікро- та нанoeлектронні
прилади і пристрої

(повна назва освітньої програми)

Керівник к. фіз-мат. наук, доцент кафедри
МЕЕПШ Галат О.Б.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І. М.

(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

(повна назва)

Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____

(повна назва)

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 153 Мікро- та наносистемна техніка _____

(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої _____

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Стадніку Даніілу Володимировичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Дослідження тонкоплівкової сонячної батареї на основі органічних сполук _____

затверджена наказом університету від 20.11.2023 р. № 1368Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 02 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Структура фотоперетворювача – тонкоплівковий, активний шар – органічний, _____

U_{хх} не менше 0,8В, _____

Рекомендовані програми розрахунку – АІМР, gpvdm, OghmaNano. _____

Використати звітні матеріали передатестаційної практики, керівництво з використання програмного додатку OghmaNano. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

– огляд та аналіз сучасних публікацій на тему тонкоплівкових сонячних батарей на основі органічних сполук, _____

– розрахунки узагальненої моделі тонкоплівкової сонячної батареї, _____

– вибір прийнятних конфігурацій структури, її аналіз та оцінювання. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Презентація 16 слайдів. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	15.08.2023 – 27.08.2023	Виконано
2	Аналітичний огляд джерел	27.08.2023 – 25.09.2023	Виконано
3	Постановка задач дослідження	25.09.2023 – 01.10.2023	Виконано
4	Проведення обчислювального експерименту з розрахунку характеристик тонкоплівкового сонячного елемента	01.10.2023 – 27.10.2023	Виконано
5	Впровадження результатів наукових досліджень	27.10.2023 – 03.11.2023	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи	03.11.2023 – 26.12.2023	Виконано
7	Підготовка презентації	26.12.2023 – 02.01.2024	Виконано
8	Рецензування, нормоконтроль	02.01.2024 – 08.01.2024	Виконано
9	Захист роботи	08.01.2024 – 10.01.2024	

Дата видачі завдання 8 липня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи містить: 50 с., 2 табл., 15 рис., 18 джерел.

СОНЯЧНА БАТАРЕЯ, ОРГАНІЧНА ТОНКОПЛІВКОВА СТРУКТУРА, ЕФЕКТИВНІСТЬ, PEDOT:PSS, ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА, PM6:L8-VO.

Об'єктом дослідження в цій роботі є моделювання тонкоплівкової сонячної батареї на основі органічних сполук, який включає в себе ряд етапів та компонентів.

Предметом дослідження в роботі є взаємозв'язок та вплив параметрів товщини активного шару на вольт-амперні та інші характеристики.

Метою магістерського дослідження є вдосконалення структури тонкоплівкової сонячної батареї на основі органічних сполук з метою підвищення ефективності, зниження витрат та покращення якості виробу.

У ході виконання роботи було використано метод системного аналізу для комплексного вивчення структури та взаємозв'язків компонентів системи. Також використовувався метод аналізу предметної області для глибокого розуміння основних аспектів та тенденцій, що впливають на досліджуваний процес.

У результаті виконання магістерського дослідження розроблено оптимізовану модель тонкоплівкової сонячної батареї, яка враховує виявлені закономірності та рекомендації щодо покращення ефективності.

ABSTRACT

Explanatory note for the qualifying work includes: 50 pages, 2 tables, 15 figures, 18 references.

SOLAR PANEL, ORGANIC THIN-FILM SOLAR CELL, THIN-FILM PHOTOVOLTAIC, EFFICIENCY, PEDOT:PSS, VOLT-AMPERE CHARACTERISTIC, PM6:L8-BO.

The object of investigation in this work is the modeling of a thin-film solar panel based on organic compounds, which includes several stages and components.

The subject of the research in this work is the correlation and influence of parameters such as the thickness of the active layer on volt-ampere and other characteristics.

The aim of the master's research is to improve the structure of thin-film solar panels based on organic compounds to increase efficiency, reduce costs, and enhance product quality.

During the execution of the work, the method of system analysis was utilized to comprehensively study the structure and relationships of system components. Additionally, the method of analysis of the subject area was employed to gain a deep understanding of the fundamental aspects and trends affecting the investigated process.

As a result of the master's research, an optimized model of the thin-film solar panel was developed, taking into account identified regularities and recommendations for improving efficiency.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	5
ЗМІСТ	6
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП.....	8
1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПУБЛІКАЦІЙ З ТЕМАТИКИ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.....	11
1.1 Аналіз сонячних батарей з мультикристалічного (multi-Si) та монокристалічного (mono-Si) кремнію	11
1.2 Аналіз вимог до органічних сонячних батарей, щоб вони могли бути впроваджені у виробництво	17
1.3 Проблеми та напрямки розвитку органічних сонячних батарей.....	19
1.4 Потрійні органічні сонячні елементи	20
1.5 Побудова моделі органічної сонячної батареї	22
1.6 Негемінатна рекомбінація у сонячних елементах	25
2. ОДНОШАРОВІ ОРГАНІЧНІ ТОНКОПЛІВКОВІ СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ	27
2.1 Принцип роботи одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей	27
2.2 Змішана омічна та просторово-обмежена провідність.....	28
2.3 Органічні напівпровідникові матеріали.....	29
2.4 Застосування та перспективи розвитку тонкоплівкових сонячних батарей	33
2.4.1 Сфери застосування одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей.....	33
2.4.2 Екологічні вигоди використання технології ООТСБ	34
2.4.3 Застосування нових матеріалів та технологій.....	34
3. РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	36
3.1 Підготовка для розрахунку одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей.....	36
3.2 Розрахунок вольт-амперних та інших характеристик при різній товщині активного шару.....	40
3.3 Проведемо аналогічні розрахунки для іншого матеріалу активного шару	44
3.4 Розрахунок вольт-амперних та інших характеристик при різній товщині активного шару	45
ВИСНОВКИ.....	48
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	51
ДОДАТОК А.....	52
ДОДАТОК Б	53

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

PPV – Поліфеніленвінілен;

ВМДАС – Високомолекулярні донорно-акцепторні сполуки;

ЖЦ – Життєвий цикл;

КЗ – Коефіцієнт заповнення;

ККД – Коефіцієнт корисної дії;

Негемінатна рекомбінація – це процес, при якому електрони і дірки рекомбінуються не в місцях, де вони були створені, а в інших місцях, де є дефекти або домішки. Цей тип рекомбінації є основним фактором, що обмежує ефективність тонкоплівкових сонячних батарей;

НХХ – Напруга холостого ходу;

ООТСБ – Одношарові органічні тонкоплівкові сонячні батареї;

ОСБ – Органічні сонячні батареї;

ОТСБ – Органічні тонкоплівкові сонячні батареї;

ОФО – Оксид фтор-олова;

ППО –Прозорого провідний оксиду;

РРБ – Розподілені рефлектори Брегга;

СБ – Сонячні батареї;

СКЗ – Струм короткого замикання;

ТФ – Тонкоплівкові фотоелементи;

ФЕП – Фотоелектричних перетворювачів;

ШТЕ – Шари для транспортування електронів.

ВСТУП

На сьогодні сонячна електроенергетика має найвищі темпи зростання серед існуючих джерел електроенергії. На початку 2020 р. зростання становило 48% від загального приросту потужностей світового електроенергетичного комплексу. Частка сонячної енергії у виробленні електрики перевищує 2,6%. Найперспективнішим напрямом розвитку геліоенергетики є фотовольтаїчний сектор, що пов'язаний з прямим перетворенням енергії Сонця на електричний струм за допомогою сонячних фотоелементів.

До основних переваг СБ відносяться:

- доступність та невичерпність сонячної енергії (для задоволення глобальної енергетичної потреби достатньо покрити приблизно 0,1% поверхні Землі сонячними перетворювачами з ККД 10%, що відповідає площі $700 \text{ км}^2 \times 700 \text{ км}^2$);
- високий ступінь безпеки для навколишнього середовища;
- значне зниження на капітальні та експлуатаційні витрати порівняно з пристроями традиційної вуглеводневої енергетики;
- постійне зниження вартості «сонячної» електроенергії;
- мобільність та довговічність (середній термін експлуатації щонайменше 30 років);
- відсутність рухомих частин.

Головні недоліки сонячних батарей:

- залежність вироблення електроенергії від погодних умов та часу доби, що вимагає відповідних систем акумуляції енергії;
- сильна залежність ступеня токсичності від виду матеріалу активного шару фотоелемента та акумулятора;
- собівартість сонячної електроенергії може бути вищою за середні показники з енергетики.

Основні проблеми сучасної фотовольтаїки пов'язані із зниженням

їхньої вартості, з пошуком способів збільшення ККД, збільшенням довговічності, стабільності та ступенем екологічності сонячних батарей[1]. Тому в різних науково технологічних лабораторіях йде активний пошук нових процесів отримання та видів матеріалів для фотоелектричних енергоустановок.

Ключовим фактором, що визначає конкурентоспроможність, техніко-економічну ефективність, ступінь екологічної безпеки сонячних фотоелементів є вид матеріалів, на основі яких утворюється активний шар. Найбільш поширеними матеріалами зазначеного шару є кремній, телурид кадмію, арсенід, галію, мідь, селен, індій, галій.

До перспективних матеріалів активного шару СБ відносяться донорно-акцепторні низькомолекулярні та високомолекулярні органічні сполуки та перовскіти [3,4]. Фотоелементи, що створюються на їх основі, прийнято відносити до третього покоління. Переваги використання зазначених матеріалів пов'язані з потенційно низькою вартістю, доволі високою екологічністю (крім перовскітів, що містять свинець) та сильною поглинальною здатністю в максимальному сонячного спектру, що забезпечує створення на їх основі ультратонких фотоелектричних елементів (з активним шаром товщиною 100нм та менше). Основний недолік розглянутих сполук – нестабільність та деградація виготовлених із них фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) сонячної енергії, що виявляються у зменшенні їх ККД через вплив атмосферного кисню, вологості, ультрафіолетового випромінювання та підвищених температур.

Те, що органічна фотовольтаїка є однією з найбільш областей, що розвиваються, альтернативною енергетики, інтерес до якої зараз зростає експоненціально, що проявляється насамперед у зазначеній інноваційній тематиці.

Збільшення інтересу та зростання кількості наукових праць, присвячених одній з областей альтернативної енергетики, що найбільш успішно розвивається, а саме – органічної фотовольтаїки, зумовило вибір

об'єкту та предмету нашого дослідження

Об'єкт дослідження – тонкоплівкова сонячна батарея на основі органічних сполук.

Предмет дослідження – види тонкоплівкових сонячних батарей на основі органічних сполук.

Метою магістерського дослідження вдосконалення структури тонкоплівкової сонячної батареї на основі органічних сполук з метою підвищення ефективності, зниження витрат та покращення якості виробу.

Для досягнення цієї мети мають бути вирішені такі задачі:

- аналіз сучасного стану технологічних процесів виробництва тонкоплівкових сонячних батарей;
- дослідження взаємозв'язку параметрів товщини активного шару і характеристик сонячних батарей;
- експериментальне дослідження та валідація отриманих результатів.

Кваліфікаційну роботу виконано відповідно до вимог методичних вказівок та оформлено відповідно до вимог стандартів [2].

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПУБЛІКАЦІЙ З ТЕМАТИКИ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

1.1 Аналіз сонячних батарей з мультикристалічного (multi-Si) та монокристалічного (mono-Si) кремнію

Сучасний фотовольтаїчний ринок на понад 90% представлений сонячними батареями з мультикристалічного (multi-Si) та монокристалічного (mono-Si) кремнію. Ключовою конкурентною перевагою таких пристроїв є висока ефективність перетворення енергії Сонця (20-25 % для комерційно доступних сонячних модулів) [5]. Серед недоліків, фотоелементів що розглядаються слід відзначити, насамперед, складність технології виробництва, крихкість, непрозорість та велику вагу панелей (товщина активного шару кремнієвих СБ близько 3 мкм, густина кремнію 2,33 г/см³). До того ж, енергоустановки на основі кремнієвих кристалічних сонячних батарей вимагають дорогого та витратного за часом встановлення обслуговування.

Найбільш перспективною альтернативою фотоелементів на основі кристалічного кремнію є тонкоплівкові сонячні батареї (їм належить зараз приблизно 7,5% ринку фотовольтних пристроїв) [5]. Тонкоплівкові фотоелементи (ТФ) виготовляють шляхом нанесення одного або декількох тонких шарів або тонкої плівки фотоелектричного матеріалу на скляну, металеву чи пластикову підкладку .

Домінуючим матеріалом активного шару фотоелектричних осередків на тонких плівках є телурид кадмію (CdTe), кадмій селен (CdSe), диселенід міді-індія-галію (CIGS, $\text{CuIn}_x\text{Ga}(1-x)\text{Se}_2$, $0 \leq x \leq 1$), аморфний кремній (a-Si), нанокристалічний кремній (nc-Si), мікрокристалічний кремній ($\mu\text{c-Si}$) [5, 6, 7].

Кадмій телурид (CdTe) застосовується в неорганічних тонкоплівкових сонячних батареях і є одним із найефективніших матеріалів у цій категорії.

Переваги кадмію телуриду:

- батареї на основі CdTe мають високу ефективність перетворення сонячної енергії;
- виробництво тонких шарів CdTe є більш економічним у порівнянні з іншими технологіями сонячних батарей.

Недоліки:

- кадмій є токсичним елементом, що викликає побоювання з погляду безпеки;
- складнощі в процесі виробництва та переробки CdTe можуть ускладнити його широке застосування.

Кадмій селен (CdSe) - це ще один матеріал, який застосовується в неорганічних тонкоплівкових сонячних батареях. Він також може використовуватися як фоторезистор.

Переваги кадмію селену:

- кадмій селен має високу здатність поглинати світло в області видимого та ближнього інфрачервоного випромінювання, що робить його ефективним для перетворення сонячної енергії;
- тонкі шари CdSe можуть бути прозорими для видимого світла, що збільшує можливість вивчення різних матеріалів.

Недоліки:

- кадмій є надзвичайно токсичними, навіть у незначних концентраціях. Має властивість накопичуватися в організмах та екосистемах.

Порівнюючи комерційні тонкоплівкові фотоелементи (ТФ) та сонячні батареї на основі кристалічного кремнію, можна сказати, що:

- середні показники ефективності перетворення сонячної енергії у ТФ є нижчою (рис.1.1) [5];
- ФЕП на тонких плівках є міцнішими [7];
- ТФ мають меншу вагу (що важливо і при їх транспортуванні і при експлуатації в різних транспортних засобах, включаючи

- авіацію) [7];
- ТФ можуть бути виготовлено на гнучких підкладках, що дозволяє покривати ними поверхні різноманітної форми (як плоскі, так і криволінійні), різати на частини, випускати в рулонах тощо [7];
 - завдяки високому ступеню прозорості ТФ можна використовуватись замість скління [7];
 - кліматичні та екологічні зміни, слабка освітленість, розсіяність світла, високі та низькі температури мають на ТФ набагато менший негативний вплив [6,7];
 - вартість приблизно однакова (близько 0,3 \$/Вт) [5];
 - середній термін енергетичної окупності, визначається проміжком часу, впродовж якого має функціонувати фотоелектрична енергосистема, щоб згенерувати таку ж кількість енергії, що було використано для її створення на всіх попередніх стадіях життєвого циклу (ЖЦ), теж можна порівняти (1,1-1,2 року) [5, 6, 7].

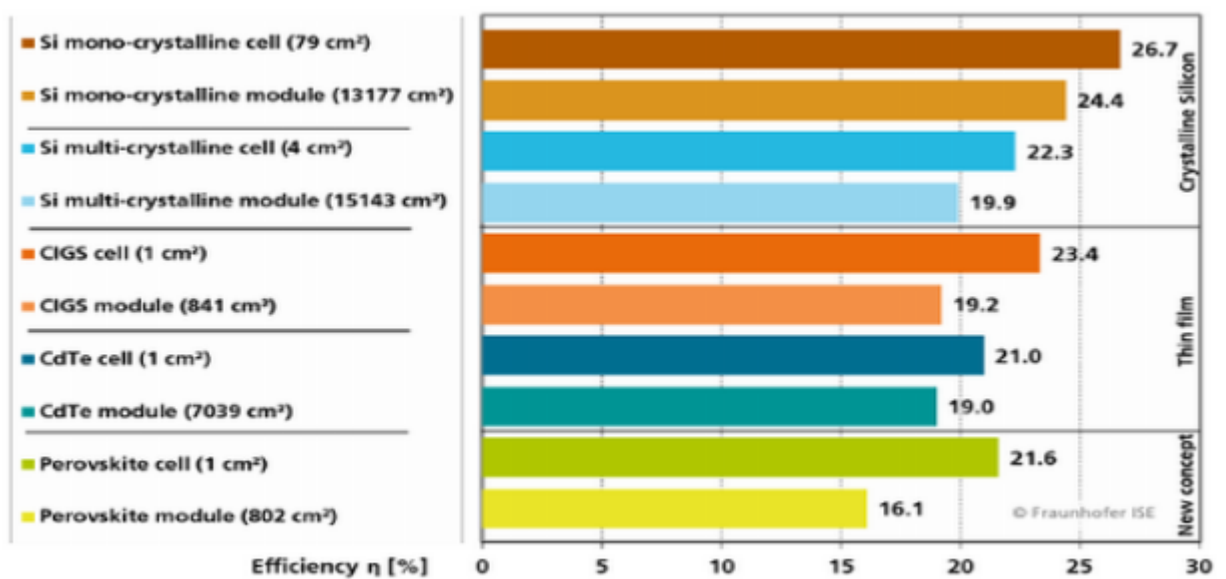


Рисунок 1.1 – ККД сонячних батарей з різним матеріалом активного шару [5]

За думкою багатьох експертів, у тонкоплівкової фотовольтаїки є доволі великий потенціал щодо інтегрування її пристроїв не тільки в наземні енергетично ефективні будівельні конструкції, системи моніторингу та транспортні засоби, а й у різні літальні апарати. Передбачається, що розвиток сонячної електроенергетики найближчими роками буде пов'язано, головним чином, як з удосконаленням технологій виготовлення так і з удосконаленням експлуатаційних характеристик тонкоплівкових сонячних фотоелементів та енергоустановок на них основі. При цьому великі надії покладаються на розробки ТФ на основі перовскітів (ABX_3 : А – одновалентний катіон ($CH_3NH_3^+$, Cs^+ та ін), В – двовалентний метал-іон (Pb^{2+} , Sn^{2+} , Ge^{2+} та ін.), Х – одновалентний аніон (Br^- , Cl^- , I^- та ін)) та органічних напівпровідників, до яких відносяться π -сполучені органічні та елементоорганічні молекули, олігомери та полімери, органічні барвники та комплекси металів [5-7].

Органічні тонкоплівкові сонячні батареї (ОТСБ) є попередньою заявкою, що використовує органічні матеріали як напівпровідники для перетворення сонячної енергії в електричну. Вони відрізняються від традиційних неорганічних батарей тим, що використовують сполуки вуглецю, такі як полімери або молекули зазначених матеріалів.

Органічні сполуки, що використовуються в тонкоплівкових ФЕП, забезпечують їм вигідні переваги перед їх традиційними неорганічними аналогами. До таких переваг відносяться легкість (товщина активного шару таких пристроїв близько 100нм, щільність органічних матеріалів 1,1-1,3 г/см³), екологічність (якщо при їх отриманні не використовують токсичні розчинники), широка кольорова гама, розтяжність, менша потенційна вартість. Органічні сонячні батареї (ОСБ) можуть бути виготовлені за допомогою простих, високопродуктивних та недорогих технологій, до яких відносяться рулонні методи друку гнучкі підкладки (рис. 1.2). Крім цього, ОСБ більш ефективно перетворюють розсіяне світло від штучних джерел, створюючи низьку освітленість, що значно розширює сферу застосування розглянутих пристроїв. Наприклад, такі джерела енергії можна

використовувати всередині приміщень та транспортних засобів. Ще одним аргументом на користь органічних фотовольтаїчних модулів є їх дуже проста фіксація: такі модулі монтуються двосторонньою липкою стрічкою.

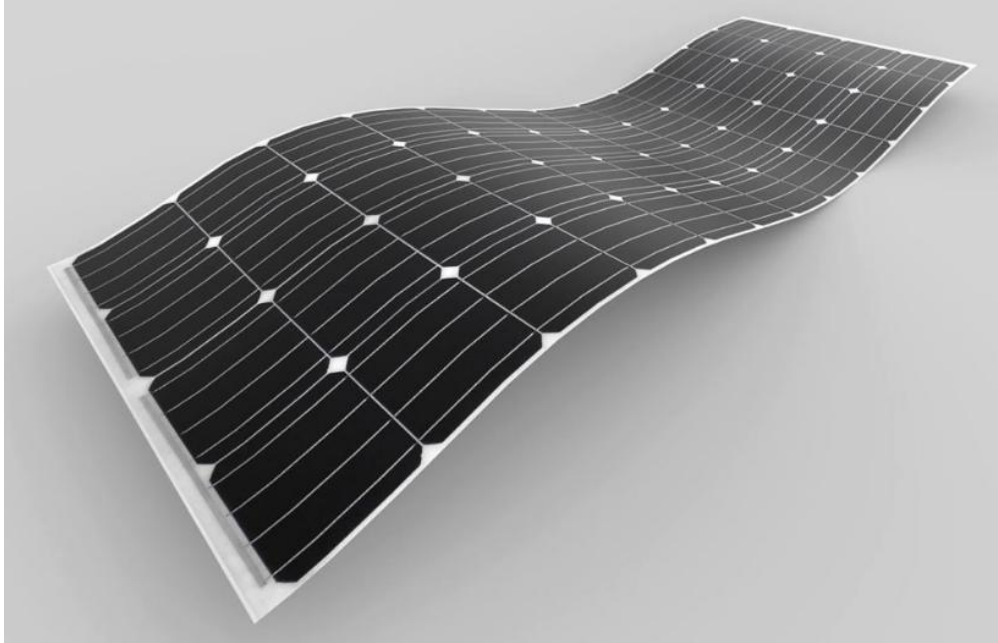


Рисунок 1.2 – Гнучкі органічні сонячні батареї

Найбільш перспективними матеріалами активного шару органічних сонячних елементів є низькомолекулярні та високомолекулярні донорно-акцепторні з'єднання. Для отримання високомолекулярних донорно-акцепторних сполук (ВМДАС) використовують розчинні технології, для синтезу низькомолекулярних донорно-акцепторних сполук (НМДАС) – розчинні та вакуумні технології.

В даний час ККД ОСБ досягає значень, що перевищують 18 %, що у 1,3 разу перевершує ефективність комерційних фотоелементів на основі аморфного кремнію та наближається до показників, характерних для більшості сонячних батарей (рис. 1.1). Проте такі показники продемонстровано тільки в пристроях невеликої площі (2 – 5 мм²), виготовлених у лабораторних умовах з використанням галогеновмісних розчинників, які є високотоксичними. Рулонні промислові технології

орієнтовані на виготовлення СБ з площами у десятки квадратних метрів. Середній ККД органічних сонячних батарей великої площі (понад 50 см²) становить близько 7% . Для досягнення вищих значень ефективності, а також для переходу до екологічному виробництву ОСБ, потрібні нові технології та матеріали, що є відтворюваними та масштабованими.

Для забезпечення стабільності ККД органічних та перовскітних СБ застосовують наступне [6]:

- до матеріалу вводять різні домішки;
- покривають плівки спеціальними ізолюючими покриттями;
- створюють гібридні сонячні осередки на основі кремнію з нанесенням на нього тонкоплівкового органічного або перовскітного матеріалу.

1.2 Аналіз вимог до органічної сонячної батареї, щоб вони могли бути впроваджені у виробництво

Основним фактором деградації органічних фотоелементів – проникнення в них молекулярного кисню та води. Тому ОСБ повинні шукати ніші, де кристалічний кремній та інші неорганічні фотоелектричні технології не можуть бути використані, а обмежений термін експлуатації органічних фотовольтаїчних пристроїв не є важливим експлуатаційним фактором. В даний час такими сонячними батареями можна покривати будівельні конструкції та транспортні кошти, не розраховані на перенесення великих навантажень, з проектним терміном експлуатації менше 20 років (складські приміщення, зупинки громадського транспорту, невеликі літаки та т. д.). Інше перспективне застосування ОСБ пов'язано з їх вбудовуванням у портативну електронну техніку та вироби легкої промисловості, включаючи одяг. Середній мінімальний термін служби найкращих зразків гнучких

органічних модулів становить зараз близько 5 років, а жорстких – 10 років. Головними причинами, що стримують широке поширення ОСБ, є їх низька експлуатаційна стабільність, низькі значення ККД пристроїв великої площі та використання токсичних розчинників у процесі їх створення. Незважаючи на це, компанії Heliatek, Infiniti PV, Solarmer та інші активно розробляють проекти практичного застосування технологій органічної фотовольтаїки. Наприклад, Heliatek реалізувала встановлення органічних сонячних батарей, виготовлених із застосуванням вакуумних технологій, на вітроустановці, фасадах та даху будівель (рисунок 1.3) [7].



Рисунок 1.3 – Проекти, реалізовані Heliatek, щодо встановлення ОСБ на вітроустановці, фасадах та даху будівель

Для того, щоб органічні сонячні батареї могли бути впроваджені у виробництво, необхідним є виконання цілого ряду умов:

- вони повинні мати досить високі значення ККД та тривалий термін експлуатації;
- виготовлення пристроїв розглянутого виду має бути недорогим та відповідати міжнародним екологічним стандартам;

– ОСБ мають бути такими, щоб їх можна було швидко інтегрувати до різних інфраструктурних об'єктів, транспортних засобів, до сучасної приладової бази та інших програм в якості елементів живлення.

На даний момент немає жодного матеріалу, використання якого дозволило б створити органічні фотовольтаїчні пристрої, що задовольняють усім зазначеним умовам. В залежності від варіантів використання до енергоустановок на основі сонячних батарей можуть бути особливі вимоги, що встановлюють обмеження на них використання.

1.3 Проблеми та напрямки розвитку органічних сонячних батарей

ОСБ страждають від низької ефективності та низької стабільності при високих температурах, що робить їх менш ефективними з точки зору комерціалізації. Проблема пропускання в ОСБ також є одним із бар'єрів на шляху їх комерціалізації, що необхідно вирішити шляхом введення ефективних міжфазних шарів або шляхом значного зменшення цієї проблеми пропускання та покращення відбиття світла та стабільності в активній області комірки. Традиційний нижній металевий електрод також виробляє тепло, що викликає термалізацію в комірці та призводить до зниження фотоелектричних параметрів [4, 5, 6]. Пари розподілених рефлекторів Бреґга (РРБ) використовуються для заміни металевих електродів, оскільки металеві електроди в сонячних батареях виробляють тепло, що додатково генерує теплові втрати, погіршуючи продуктивність пристрою. Що стосується цих теплових втрат, РРБ відіграє значну роль не лише через зменшення термалізації, але й через збільшення параметрів електричних фотоелектричних характеристик, наприклад, через високу ефективність перетворення. Однак інші підходи, якими користуються для заміни металевих електродів, лише зменшують термалізацію, але істотно не впливають на параметри роботи пристрою. На відміну від цього, пари РРБ збільшують товщину клітини, збільшуючи її висоту та загальну вартість; зі

збільшенням товщини використовується більше матеріалу, що означає збільшення вартості [7, 8].

Відповідно, низька ефективність завжди буде перешкодою для комерціалізації сонячних батарей. Було проведено численні експериментальні та теоретичні дослідження з моделювання для оптимізації клітинок та підвищення продуктивності в цьому контексті. Теоретично оптимізовані сонячні елементи надають чудову можливість для експериментального дослідження та можуть допомогти точніше визначити внутрішню продуктивність пристрою. Крім того, чисельне моделювання вважається економічно ефективним методом. Аналіз літератури, говорить, що коефіцієнт ефективності перетворення потужності комірки можна значно підвищити за допомогою різних підходів, зокрема, таких як інвертована структура, тандемна структура, оптимізація методом аналізу оптичної провідності, характеристика, та РРБ [8].

1.4 Потрійні органічні сонячні елементи

У порівнянні з одноперехідними ОСБ, сонячні елементи тандемної конфігурації можуть не тільки покращити поглинання світла, але й зменшити втрати фотонної енергії від термалізації шляхом укладання двох або більше субклітин із додатковим діапазоном поглинання [10]. На жаль, тандемні ОСБ неминуче стикаються з серйозними технічними проблемами через їх складне багат шарове укладання в ряд. Наприклад, обробка проміжних шарів, а також балансування поглинання світла між субклітинами ускладнює практичне застосування.

В якості альтернативи, потрійні ОСБ, що містять кілька матеріалів для збирання світла в одному активному шарі, стали однією з найперспективніших стратегій для покращення фотоелектричних характеристик. Потрійні суміші мають покращену здатність збирати фотони, подібно до тандемних елементів, і підтримують простоту виготовлення,

подібно до пристроїв з одним переходом [10]. Крім того, включення третього компоненту також може сприяти транспортуванню заряду, дисоціації екситонів та морфології плівки (молекулярна кристалічність, орієнтація кристалів, домен розмір, чистота) [10]. Ключові фотоелектричні параметри, струм короткого замикання (СКЗ), напруга холостого ходу (НХХ) та коефіцієнт заповнення (КЗ) можуть бути одночасно або окремо оптимізовані до своїх максимальних значень шляхом ретельного вибору третього компонента та коригування його складу.

Сьогодні, через швидкий розвиток донорських та акцепторних матеріалів, техніки оптимізації пристроїв, ефективність фотоперетворення (PCE) потрібних ОСБ перевищив 14% [10].

Потрійні ОСБ можна, в основному, розподілити на дві категорії відповідно до функції третього компонента:

- два донори/один акцептор,
- один донор/два акцептори.

Зараз існує чотири робочі механізми в обох категоріях потрібних ОСБ: перенесення заряду, перенесення енергії, паралельне з'єднання та модель сплаву, що тісно пов'язана з розташуванням третього компонента в потрібному активному шарі. Третій компонент може бути повністю вбудований в один конкретний домен; формувати власні канали; бути на інтерфейсі Д/А; чи на сплаві з матеріалами донора або акцептора, як це зображено на рисунку 1.4.

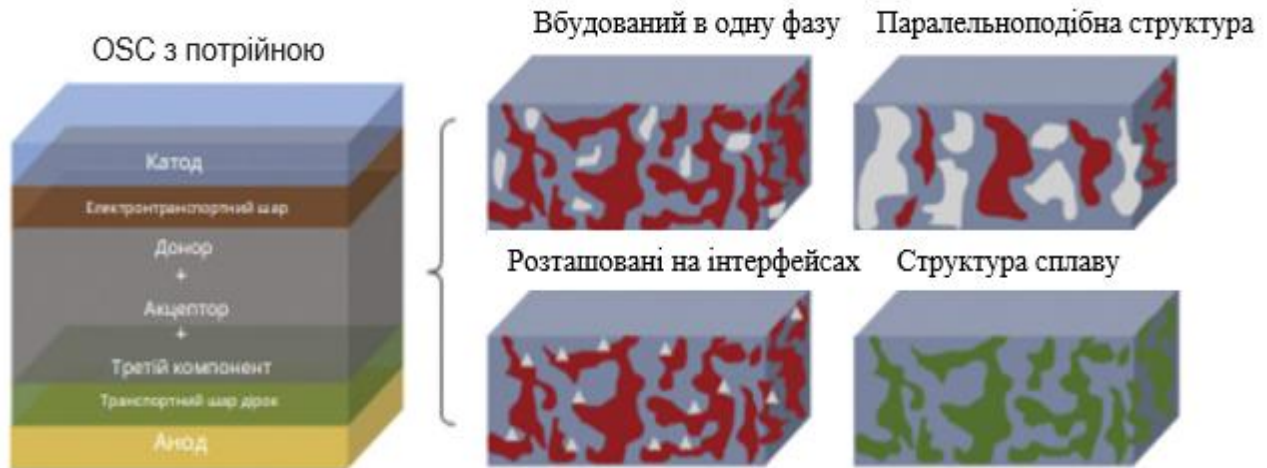


Рисунок 1.4 – Структури потрійних органічних сонячних елементів з гетеропереходом (ОСБ) з чотирма можливими морфологіями активного шару

1.5 Побудова моделі органічної сонячної батареї

На рисунку 2.2 показана схема комірки з комбінацією різних ефективних шарів. Оксид фтор-олова (ОФО) використовувався, в якості прозорого провідного оксиду (ППО) товщиною 125нм, як верхній електрод. Перевагою використання ОФО є його висока прозорість, хороша термічна стабільність та висока електропровідність. Було використано прозорий провідний оксид, оскільки він забезпечує максимальне пропускання сонячного світла до активної області. Потім V_2O_5 розміщували в якості транспортного шару дірок товщиною 30нм. Перевагою цього використання є те, що V_2O_5 має відмінну здатність до транспортування дірок та видатну функціональність як шар, що блокує електрони [9].

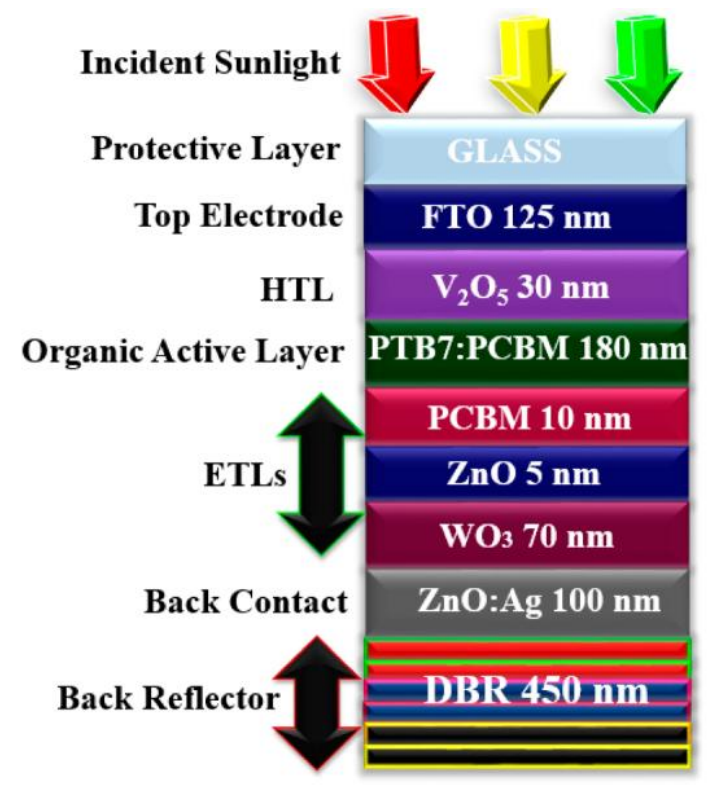


Рисунок 1.5 – Конфігурація запропонованої конструкції з різними критичними шарами та оптимізованою розрахунковою товщиною

Щодо інших шарів, PTB7:PCBM використовується як активний рівень; PCBM, ZnO і WO₃ використовуються як ETL (для виділення підвищеної кількості електронів); ZnO:Ag використовується як задній електрод; і пари РРБ використовуються як зворотні відбивачі.

Крім того, V₂O₅ має відмінну термостійкість. Поряд із шаром ППО було введено PTB7:PCBM як активний шар товщиною 180 нм. PTB7:PCBM може поглинати багато фотонів навіть в умовах слабого освітлення, оскільки він має високий коефіцієнт поглинання [9] та вузьку заборонену зону. Крім того, PTB7:PCBM, що має дуже гнучкі механічні властивості легко виготовити, що передбачає низькі витрати на виробництво. Таким чином, PTB7:PCBM є привабливим кандидатом для тонкоплівкової технології через його високу молекулярну масу 891,4 та широке значення коефіцієнта поглинання α 67 237 см⁻¹ [9]. Для кращого гасіння електронів було використано три шари для транспортування електронів (ШТЕ) (тобто

PCBM (10нм), оксид цинку (ZnO; 5нм), триоксид вольфраму, WO₃ (70нм) для покращення транспортування електронів та досягнення високої ефективності перетворення. ZnO використовувався через його низьку вартість, високу енергію зв'язку та набагато вищу мобільність електронів, в порівнянні з іншими типами оксидів, такими як TiO₂. Причиною використання WO₃ є те, що він може забезпечити механізм швидкого стрибка для електронів, чим додатково збільшує рухливість електронів, що призводить до збору покращених параметрів продуктивності [9]. Для заднього електрода використовувалося срібло (Ag) (ZnO:Ag), леговане ZnO, товщиною 100нм. Далі, Було представлено пари РРБ, а саме пари WO₃ та фториду літію (LiF). Причина використання РРБ є те, що він може відбивати світло від дна комірки, та відбите світло може повторно поглинатися в активному шарі, що має значний вплив на продуктивність клітини [10].

У цьому дослідженні модель фотоелектричного пристрою загального призначення [9] використовувалася для отримання електричних параметрів PV. Пакет програмного забезпечення використовує рівняння безперервності та Пуассона для розрахунків, а також модель дрейфу-дифузії для транспорту. Крім того, формалізм Шоклі–Ріда–Холла використовується для рекомбінації носіїв заряду, а підхід Шарфеттера–Гуммеля розглядається для чисельної стабільності.

Рівняння Пуассона виражається як (2.1):

$$\frac{d}{dx} \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{d\phi}{dx} = q (n - p) \quad , \quad (1.1)$$

тоді як рівняння (2.2) та (2.3) представляють дрейфово-дифузійну модель для дірок та електронів відповідно:

$$J_n = q\mu_c n \frac{\partial E_c}{\partial x} + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (1.2)$$

$$J_p = q\mu_cp \frac{\partial E_v}{\partial x} + qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.3)$$

де D_n та D_p являють собою коефіцієнт дифузії.

Рівняння неперервності можна записати як (2.4) і (2.5):

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} = q \left(R_n - G + \frac{\partial n}{\partial t} \right) \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} = q \left(R_p - G + \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (1.5)$$

Для плоских хвиль співвідношення між магнітним та електричним полями можна виразити як (2.6):

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \quad (1.6)$$

тоді як хвильовий вектор виражається як (2.7):

$$k = \frac{2\omega}{\lambda} = \frac{\omega n}{v} \quad (1.7)$$

1.6 Негемінатна рекомбінація у сонячних елементах

Негемінатна рекомбінація в сонячних елементах на основі суміші полімеру РЗНТ (полі(3-гексилтіофену)) та фулерену РСВМ (похідного [6,6]-біс(пропіоніл)-С60-бутирату) включає в себе процес, при якому вільні носії заряду (електрони та дірки), утворені при поглинанні світла, зустрічаються та рекомбінують, утворюючи фотони чи тепло. Термін «негемінатна» означає, що в цьому процесі беруть участь носії заряду одного типу (або електрони, або дірки) [18]. Як показано на рисунку 1.6 статична залежність швидкості

негемінатної рекомбінації R від щільності носіїв $n(V_{oc})$ була успішно визначена шляхом поєднання вимірювань TPV та CE в умовах розімкнутого ланцюга. Щоб розрахувати правильний струм негемінатних втрат, необхідний реконструкції j/V , повинні бути виконані дві попередні умови.

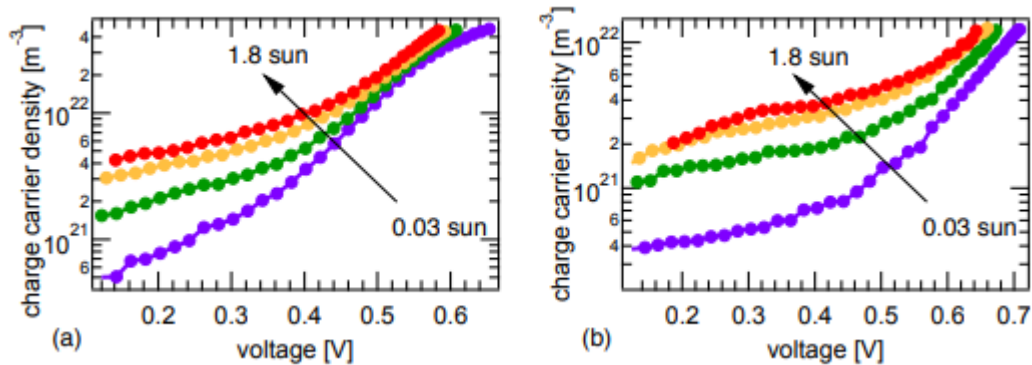


Рисунок 1.6 – Залежність напруги густини носіїв заряду $n(V)$ для різних інтенсивностей освітлення при кімнатній температурі для РЗНТ:PC₆₁BM

Негемінатна рекомбінація зменшує кількість вільних носіїв заряду, що можуть бути зібрані в електричний струм, та зрештою знижує ефективність сонячної батареї. Енергія, виділена під час рекомбінації, може виходити у вигляді тепла, а не у формі електричної енергії.

Оптимізація для зменшення негемінатної рекомбінації:

- матеріали з меншою дефектністю. Використання полімерів та фулеренів з меншою дефектністю та вищою рухливістю носіїв заряду;
- оптимізація інтерфейсів. Покращення структури інтерфейсів між різними шарами в сонячній батареї для зменшення втрат під час передачі заряду;
- управління морфологією активного шару. Створення оптимальної морфології активного шару для забезпечення ефективного транспортування та виділення носіїв заряду.

Якщо підсумувати багатошарові тонкоплівкові сонячні батареї

використовують кілька шарів різних фоточутливих матеріалів для збору різних діапазонів світла, що сприяє вищому ККД. Однак їх виготовлення вимагає високотехнологічних та витратних процесів, що робить їх дорожчими та більш складними в порівнянні з одношаровими альтернативами. Такий підхід виправдовується більш високою ефективністю, але водночас вимагає вагомих інвестицій та технічних ресурсів для виробництва.

Одношарові тонкоплівкові сонячні батареї виготовлені з одного шару фоточутливого матеріалу і володіють можливістю бути прозорими та гнучкими. Ця характеристика робить їх особливо підходящими для застосувань у сучасних технологіях, таких як гнучка електроніка та інтеграція в прозорі архітектурні елементи. Однак, в порівнянні з багатошаровими варіантами, їх ефективність у зборі сонячної енергії може бути нижчою.

2 ОДНОШАРОВІ ОРГАНІЧНІ ТОНКОПЛІВКОВІ СОНЯЧНІ БАТАРЕЇ

2.1 Принцип роботи одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей

Одношарові органічні тонкоплівкові сонячні батареї (ООТСБ) є інноваційною технологією в області сонячної енергетики. Ці батареї, створені з використанням органічних напівпровідників та тонких плівок, пропонують новий підхід до перетворення сонячного світла на електричну енергію. У сучасному світі, де увага до екології та потреби у відновлюваних джерелах енергії зростають, одношарові органічні тонкоплівкові сонячні батареї стають ефективним та екологічно чистим рішенням для отримання електроенергії [11].

Одношарові органічні тонкоплівкові сонячні батареї складаються з органічних напівпровідників, тонких плівок та електродів. Органічні матеріали, такі як полімери або молекули органічних сполук, відіграють вирішальну роль у перетворенні світлової енергії.

Процес перетворення сонячної енергії в ООТСБ базується на принципах фотоелектричного ефекту в органічних напівпровідниках.

Поглинання світла: В органічних напівпровідниках використовуються фоточутливі елементи, що мають широкий спектр поглинання світла. Взаємодія фотона з електронними оболонками молекул викликає збудження електрона, переводячи його з валентної зони до зони провідності.

Генерація електронів та дірок: Після абсорбції фотона відбувається формування електронно-діркової пари. Електрон переходить у зону, що проводиться, залишаючи за собою дірку у валентній зоні [12]. Ця пара являє собою розділені носії заряду, які мають певну кінетичну енергію.

Перенесення електронів та дірок. Електрони та дірки починають свої теплові рухи під впливом температури та зовнішнього електричного поля.

Ефективне перенесення зарядів здійснюється за допомогою транспорту всередині органічних шарів, оптимізованих для мінімізації процесів, що розсіюють.

Збір електричного струму. Електрони та дірки, перебуваючи в напівпровідникових шарах, мігрують до електродів з різними зарядами. Електроди збирають ці заряджені частинки, створюючи електричний струм у зовнішньому ланцюзі.

2.2 Змішана омічна та просторово-обмежена провідність

Це феномен, часто спостерігається в пристроях з однієї несучої, таких як транзистори. Ефект пояснюється комбінацією омічної (лінійної) та просторово-обмеженої (нелінійної) провідності в активному напівпровідниковому пристрої.

Омічна провідність характеризує лінійну поведінку пристрою при низьких рівнях напруги та струму. При цьому струм через пристрій пропорційний напрузі та опір вважається постійним. Омична провідність зазвичай переважає початковому діапазоні роботи пристрою.

З іншого боку, при збільшенні напруги та струму у пристрої може виникнути просторово-обмежена провідність. Це пов'язано з нелінійними ефектами, такими як насичення електронної рухливості або ефект тунелювання. Просторово-обмежена провідність стає більш переважаючою при вищих рівнях напруги.

Поєднавши теорії, що описують омічну провідність та провідність, обмежену просторовим зарядом, ми виводимо загальний аналітичний підхід до виділення щільності носіїв заряду, краю зони провідності та дрейфових компонентів кривих (I-U) однозарядного пристрою, коли напівпровідник нелегований, слабо або сильно легований [17].

Розуміння цієї змішаної провідності є важливим для оптимізації роботи органічних тонкоплівкових сонячних батарей. Врахування цих явищ

дозволяє більш точно налаштовувати параметри пристрою. Зокрема такі як склад матеріалів, товщина плівок та умови експлуатації з метою підвищення їх ефективності та стабільності [16].

2.3 Органічні напівпровідникові матеріали

Органічні напівпровідники, що застосовуються в ООТСБ, являють собою групу матеріалів, заснованих на органічних сполуках з електронними та дірковими провідностями. У даному контексті найбільш поширеними є кон'юговані полімери та молекули ароматичних вуглеводнів.

Кон'юговані полімери. У сонячних батареях широко застосовуються органічні полімери, такі як поліфеніленвінілен (PPV) та політіюфени. Ці полімери мають довгі кон'юговані ланцюги, що сприяють ефективної передачі електронів, а також створенню електронних та діркових смуг провідності з низькою енергією.

Поліфеніленвінілен – це клас кон'югованих полімерів, що включають повторювані блоки феніленів та вініленілів [13]. Ці полімери мають високий рівень кон'югації, що сприяє ефективної передачі електронів в органічних сонячних батареях.

КПД ОТСБ з урахуванням ПФВ зазвичай становить від 2 до 5%. Однак у деяких випадках було досягнуто значення ККД до 10%. Для підвищення КПД ОТСБ на основі ПФВ дослідники використовують різні методи, включаючи:

- оптимізація структури фотоактивного шару;
- використання добавок, що покращують фотопровідність;
- використання методів збільшення площі поверхні фотоактивного шару.

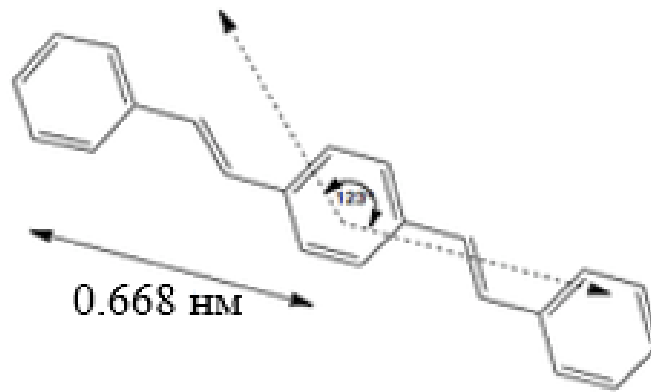


Рисунок 2.1 – Структура поліфеніленвінілену (PPV), що являє собою полімер з ланцюжком з елементами, що повторюються

Політофени – це група полімерів, де атоми водню у вуглеводневих ланцюгах замінені атомами сірки [14]. Ці полімери мають хорошу електропровідність та часто використовуються в органічних сонячних батареях як матеріали для передачі заряду.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) ОТСБ на основі політофенів становить близько 10%. Розрахунки показують, що ККД ОТСБ на основі політофенів можна підвищити до 15% і більше. Це можна зробити за рахунок покращення якості плівок політофенів, оптимізації структури сонячних батарей та використання нових методів обробки.

У 2023 році група дослідників з Університету Торонто розробила одношарову ОТСБ на основі політофену з ККД 12,5%. Це на 2,5% вище за попередній рекорд для одношарових ОТСБ на основі політофенів. У тому ж році група дослідників із Університету Цінхуа розробила одношарову ОТСБ на основі політофену з ККД 14,2%. Це на 1,7% вище за попередній рекорд.

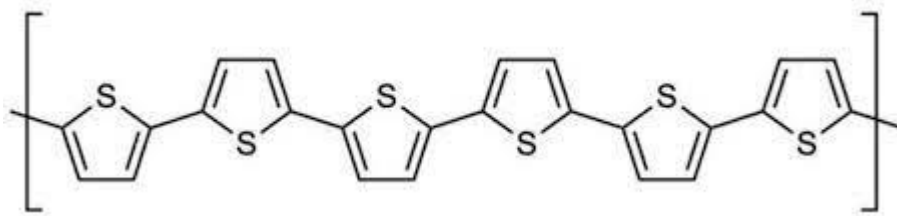


Рисунок 2.2 – Структура політіофену являє собою полімер з ланцюжком з елементами, що повторюються

Молекули ароматичних вуглеводнів: Деякі органічні батареї використовують молекули ароматичних вуглеводнів, такі як пентасіанін та фулерени. Ці молекули забезпечують специфічні енергетичні рівні, сприяючи ефективному поділу та передачі зарядів.

Пентасіанін ($C_6H_{12}Cl^+$) – це ароматична сполука, що відноситься до групи ціанінів. Воно має характерне синє забарвлення та використовується в якості органічного барвника. В сонячних батареях може служити для створення електронно-діркових пар із певною енергетикою [15].

Коефіцієнт перетворення (ККД) ОТСБ на основі пентасіанінів досягає 10%. Розрахунки показують, що ККД ОТСБ на основі пентасіанінів може бути ще вищим. Це пов'язано з тим, що пентасіаніни мають високу щільність енергії та ефективність перенесення заряду.

У 2022 року дослідники з Університету Пекінського повідомили про розробку ОТСБ на основі пентасіаніну з ККД 10,2%. У 2023 року дослідники з Університету Нанкіна повідомили про розробку ОТСБ на основі пентасіаніну з ККД 10,5%. У 2024 році дослідники з Університету Цінхуа повідомили про розробку ОТСБ на основі пентасіаніну з ККД 10,8%.

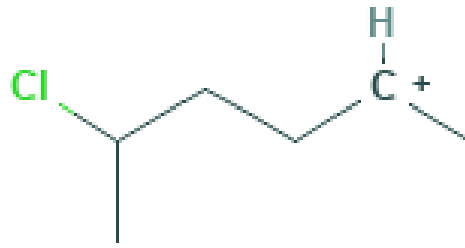


Рисунок 2.3 – Структура пентасіаніна

Фулерени є молекулами вуглецю, що утворюють повні сферичні або еліпсоїдальні структури. Вони можуть бути використані в якості акцептора в органічних сонячних батареях, де сприятимуть ефективному поділу та передачі заряду [16].

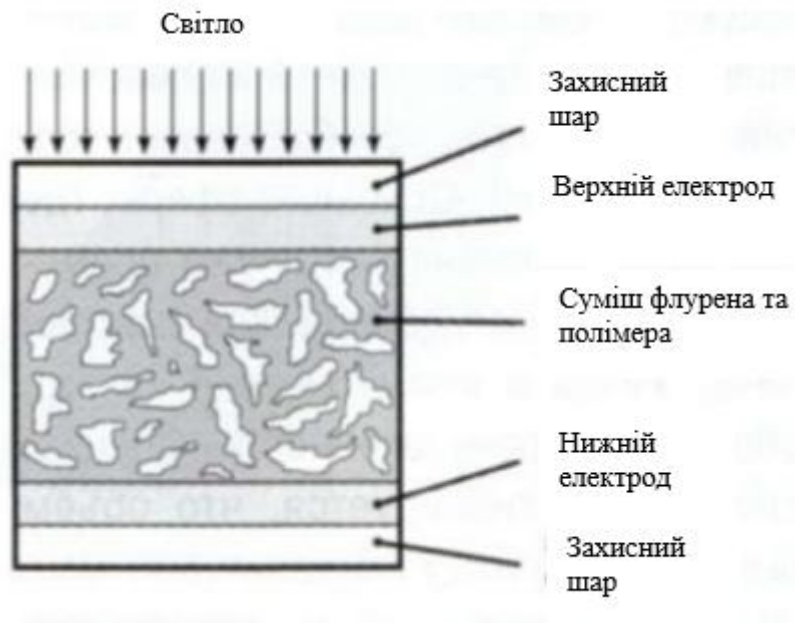


Рисунок 2.4 – Фулерени в органічних сонячних батареях

Коефіцієнт корисної дії ОСТСБ на основі флуренових сполук може досягати 15%. Це робить їх одними із найефективніших органічних фотоелектричних матеріалів. Розрахунки показують, що ККД ОСТСБ на

основі флуренових сполук можна підвищити за рахунок оптимізації структури напівпровідника та підкладки. Дослідження показали, що використання нових матеріалів та методів обробки може призвести до подальшого збільшення ККД ОСТСБ на основі флуренових сполук.

У 2022 році дослідники з Університету Сінцзяну у Китаї розробили ОСТСБ на основі флурен-полімерного композиту. ККД їхнього пристрою становив 14,1%. У 2023 році дослідники з Університету Хоккайдо в Японії розробили ОСТСБ на основі флурен-карбонільного з'єднання. ККД їхнього пристрою становив 15,2%.

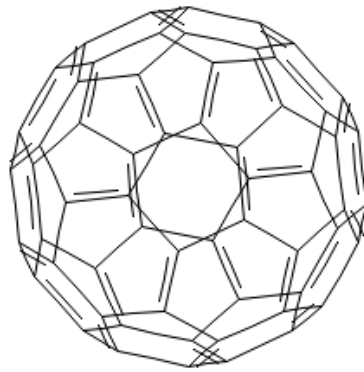


Рисунок 2.5 – Структура фулерену С60 представляє собою молекулу з 60 атомами вуглецю, організованими у форму, що нагадує футбольний м'яч

2.4 Застосування та перспективи розвитку тонкоплівкових сонячних батарей

2.4.1 Сфери застосування одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей.

ООТСБ, завдяки гнучкості та легкості, мають широкий спектр потенційних сфер застосування. Їх можна використовувати в різних областях, включаючи електроніку та інтегровані системи, навіть в текстильній індустрії, де їх можна інтегрувати в одяг. Наприклад, в електроніці такі батареї можуть використовуватися для живлення розумних

годинників, фітнес-трекерів або медичних пристроїв, надаючи джерело енергії, що не обмежує рухів користувача. В технології інтегрованих систем батареї можуть бути вбудовані в розумні пристрої в будинках, автомобілях або в будівельні матеріали для автономного енергопостачання.

2.4.2 Екологічні вигоди використання технології ООТСБ.

Використання одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей може суттєво сприяти зниженню вуглецевого сліду та створенню екологічно стійких енергетичних систем. Органічні матеріали та виробничі процеси, порівняно з традиційними сонячними технологіями, такими як кремнієві сонячні батареї, зазвичай мають менший екологічний слід. Через те що виробництво кремнієвих сонячних батарей пов'язане з високотемпературними процесами, включаючи вакуумні відпали та легування, що потребує значних енергетичних витрат. Також кремнієві сонячні батареї часто більш важкі та жорсткі, що обмежує їх застосування та ускладнює утилізацію.

2.4.3 Застосування нових матеріалів та технологій.

Одним з фундаментальних викликів в області одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей є забезпечення стабільності та надійності роботи батарей за різних умов експлуатації. Це включає подолання перешкод, пов'язаних зі змінами освітленості, температурними коливаннями та іншими факторами навколишнього середовища, що можуть істотно впливати на продуктивність батарейних систем. Дослідники фокусуються на розробці нових матеріалів, методів синтезу, а також оптимізації структурних параметрів підвищення квантової ефективності та довговічності батарей. Наприклад, розробка покращених матеріалів для фоточутливих шарів та електродів, оптимізація процесів депозиції тонких плівок спрямовані на мінімізацію розсіювання світла та підвищення електричної провідності.

Дослідники активно застосовують нові матеріали та технології для

покращення характеристик одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей. Використання наноматеріалів, таких як квантові точки або нанотрубки, може покращити поглинання світла та збільшити поверхню для ефективного поділу зарядів. Застосування інноваційних методів виробництва, таких, як друковані технології, дозволяє створювати більш дешеві та масові батареї, що сприяє їх широкому застосуванню в різних галузях.

Оптимізація виробничих процесів також є важливим аспектом, оскільки зниження витрат на виробництво та покращення ефективності процесів депозиції тонких плівок сприяє підвищенню доступності батарей для масового виробництва.

3 РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Підготовка для розрахунка одношарових органічних тонкоплівкових сонячних батарей

У цьому розділі представлені результати розрахунків що для необхідні подальшого аналізу та оптимізації тонко-плівкових органічних батарей. Розрахунки проводилися з використанням програмного забезпечення OghmaNano, широко визнаного у галузі моделювання наноструктурних матеріалів. Цей інструмент надав можливість провести детальний аналіз вольт-амперних характеристик і підсумковими характеристиками батареї, що є критичним етапом у подальшому вдосконаленні ефективності сонячних елементів.

Запустимо програмне забезпечення OghmaNano. Далі створимо нову симуляцію – New simulation - Organic solar cells - D18:L8-BO solar cell (PCE=14.5%). По замовчуванні OghmaNano створює батарею з товщиною активного шару 120нм. Результат модуляції представлено на рисунок 3.1.

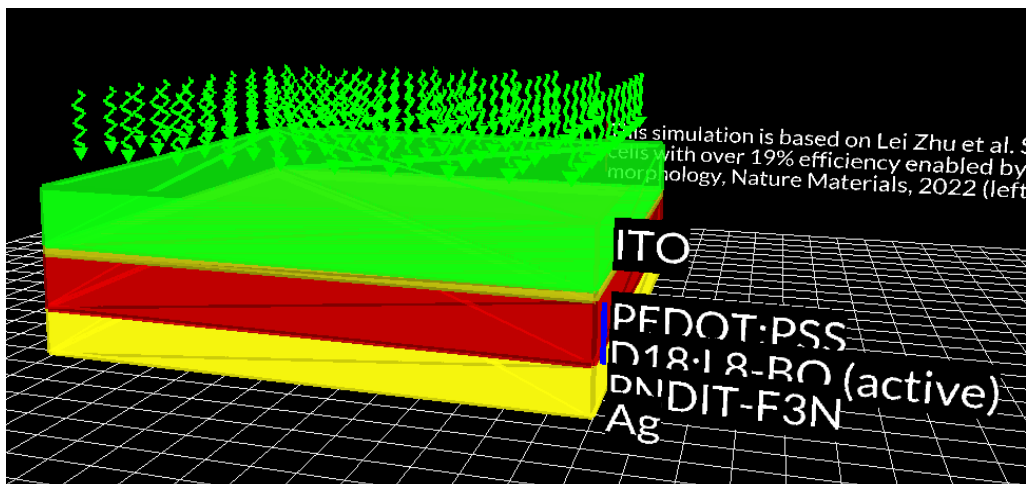


Рисунок 3.1 – ООТСБ D18:L8-BO з товщиною активного шару 120нм

Давайте детальніше розглянемо зображення, а також опишемо основні компоненти, виділені на ньому.

ITO – (Indium tin oxide – оксид індія-олова) являє собою потрібну композицію індія, олова та кисню у різних пропорціях. Оксид індію та олова зазвичай зустрічається у вигляді насиченої киснем композиції з вмістом 74% In, 8% Sn та 18% O за масою. У тонких шарах він прозорий і безбарвний, а в товстих від жовтуватого до сірого кольору.

Оксид індія-олова є одним з найбільш широко використовуваних прозорих провідних оксидів через його електропровідність і оптичну прозорість, легкість, з якої його можна наносити у вигляді тонкої плівки, а також його хімічної стійкості до вологи. Як і у всіх прозорих провідних плівках, необхідно знайти компроміс між провідністю та прозорістю, оскільки збільшення товщини та збільшення концентрації носіїв заряду збільшує провідність плівки, але знижує її прозорість. Тонкі плівки оксиду індію та олова найчастіше наносяться на поверхні методом фізичного осадження з парової фази. Часто використовується електронно-променеве випаровування або низка методів напилення.

У даному прикладі ITO використовується як прозорий катод.

PEDOT:PSS – Для поліпшення екстракції дірок застосовуються прозорі провідні полімери, наприклад суміш полі(3,4-етилendioкситіофена) і полістиролсульфонату (PEDOT:PSS) [18].

Полі(3,4-етилendioкситіофен)полістиролсульфонат (PEDOT:PSS) являє собою полімерну суміш двох іономерів. Один компонент цієї суміші складається з полістиролсульфонату, який є сульфонованим полістиролом. Частина сульфонільних груп депротонувана і несуть негативний заряд. Інший компонент полі(3,4-етилendioкситіофен) (PEDOT) являє собою сполучений полімер, несе позитивні заряди і заснований на політіофені. Разом заряджені макромолекули утворюють макромолекулярну сіль. PEDOT:PSS має найвищий ККД серед органічних термоелектричних матеріалів, що проводять, і, отже, його найбільше застосування — це прозорий провідний

полімер з високою пластичністю.

D18-L8-BO (active) це суміш двох матеріалів, що використовуються в органічних сонячних елементах (ОСС). D18 – це донорний полімер, а L8-BO – це акцепторний полімер.

D18 - це полімер з тiazольним ядром, який має хороші властивості поглинання світла та передачі електронів. Він має високу енергію збудження, що дозволяє йому поглинати світло у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі. D18 також має високу рухливість електронів, що сприяє ефективному перенесенню електронів у ОС.

L8-BO - це полімер з тієнотієнопіроло-тієнотієноіндолом (ТТР-ТТІ) ядром, який має хороші властивості захоплення електронів і перенесення електронів. Він має низьке значення енергії збудження, що дозволяє ефективно захоплювати електрони, що утворюються при збудженні D18. L8-BO також має високу рухливість електронів, що сприяє ефективному перенесенню електронів у ОС.

Суміш D18:L8-BO має хороші фотоелектричні характеристики, включаючи високу ефективність перетворення світла, високий вихід струму та високий коефіцієнт заповнення. Ефективність перетворення світла D18:L8-BO може досягати 15%.

Одна з причин високої ефективності D18:L8-BO полягає в тому, що D18 та L8-BO мають гарну сумісність. Вони можуть утворювати однорідну суміш, в якій електрони можуть переноситися ефективно від D18 до L8-BO.

D18:L8-BO є перспективним матеріалом для ОС. Він має хороші фотоелектричні характеристики і може бути використаний для виробництва ефективних і недорогих ОС.

PNDIT-F3N – це n-тип напівпровідниковий полімер, що використовується в органоорганічних сонячних елементах (ОСС). Він складається з конденсованих 9,9-дифеніл-2,7-нафталін-діїмідів та 4,4'-(N-(4-трет-бутилбензил)дифеніламіну).

PNDIT-F3N має гарні властивості поглинання світла та передачі

електронів. Він має високу енергію збудження, що дозволяє йому поглинати світло у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі. PNDIT-F3N також має високу рухливість електронів, що сприяє ефективному перенесенню електронів у ОС.

PNDIT-F3N може бути використаний як акцепторний полімер в ОС. Він може бути змішаний з полімером донором, таким як D18, щоб сформувати ефективний фотоелектричний елемент.

Ефективність перетворення світла PNDIT-F3N може досягати 15%. Це робить його одним із найефективніших n-тип напівпровідникових полімерів для ОС.

PNDIT-F3N також має гарні механічні властивості. Він може бути використаний для виробництва гнучких та прозорих ОС.

PNDIT-F3N є перспективним матеріалом для операційної системи. Він має хороші фотоелектричні та механічні властивості і може бути використаний для виробництва ефективних та недорогих ОС.

Ось деякі характеристики PNDIT-F3N:

- молекулярна формула: $(C_{61}H_{70}N_4O_4S_2)_n$;
- молекулярна маса: ~ 200000 г/моль;
- температура скла: ~ 110 °C;
- рухливість електронів: $\sim 10^{-4}$ см²/(В·с);
- ефективність перетворення світла: $\sim 15\%$.

PNDIT-F3N був уперше синтезований у 2014 році групою дослідників з Університету Тохоку в Японії.

Срібло (Ag) є одним із найбільш перспективних матеріалів для використання в органічних сонячних батареях (ОСБ). Воно має низку переваг у порівнянні з іншими матеріалами, такими як метали платинової групи (ПГМ), включаючи:

- високу фотопровідність;
- низький рівень рекомбінації носіїв заряду;
- стійкість до окиснення.

Як електрод з боку анода срібло використовується для збору дірок, що генеруються в органічному фотоактивному шарі. Воно має високу фотопровідність, що дозволяє йому ефективно збирати дірки. Срібло також має низький рівень рекомбінації носіїв заряду, що знижує втрати енергії в батареї.

Однак використання срібла в ОСБ пов'язане з деякими проблемами, такими як:

- висока вартість;
- низька стійкість до довкілля.

Срібло є дорогим матеріалом, що обмежує його використання в ОСБ. Срібло також має низьку стійкість до впливу навколишнього середовища, що може призвести до його деградації та зниження ефективності батареї.

Незважаючи на ці проблеми, срібло залишається одним із найперспективніших матеріалів для використання в ОСБ. Дослідження щодо зниження вартості та підвищення стійкості срібла до впливу навколишнього середовища продовжуються.

3.2 Розрахунок вольт-амперних та інших характеристик при різній товщині активного шару

У цьому підрозділі представлений докладний аналіз вольт-амперних характеристик тонко-плівкових органічних батарей залежно від зміни товщини активного шару. Цей аналіз не тільки включає графіки, що наочно відображають залежність вихідної напруги і струму від товщини шару, але також надає систематизовану таблицю, що містить ключові характеристики батарей при різних параметрах. Подання цих даних має вирішальне значення виявлення оптимальної товщини активного шару, здатної забезпечити максимальну ефективність сонячних елементів.

Переведемо графіки вольт-амперних характеристик для різних товщин активного шару. На першому графіку зображено вольт-амперну

характеристику при 50 нанометрів товщини активного шару. На графіку рисунку при 90 нанометрів. На графіку рисунку при 100 нанометрів. На четвертому графіку при 110 нанометрів. На п'ятому графіку при 120 нанометрів. На шостому графіку при 140 нанометрів. На сьомому графіку при 150 нанометрів. На восьмому графіку при 200 нанометрів.

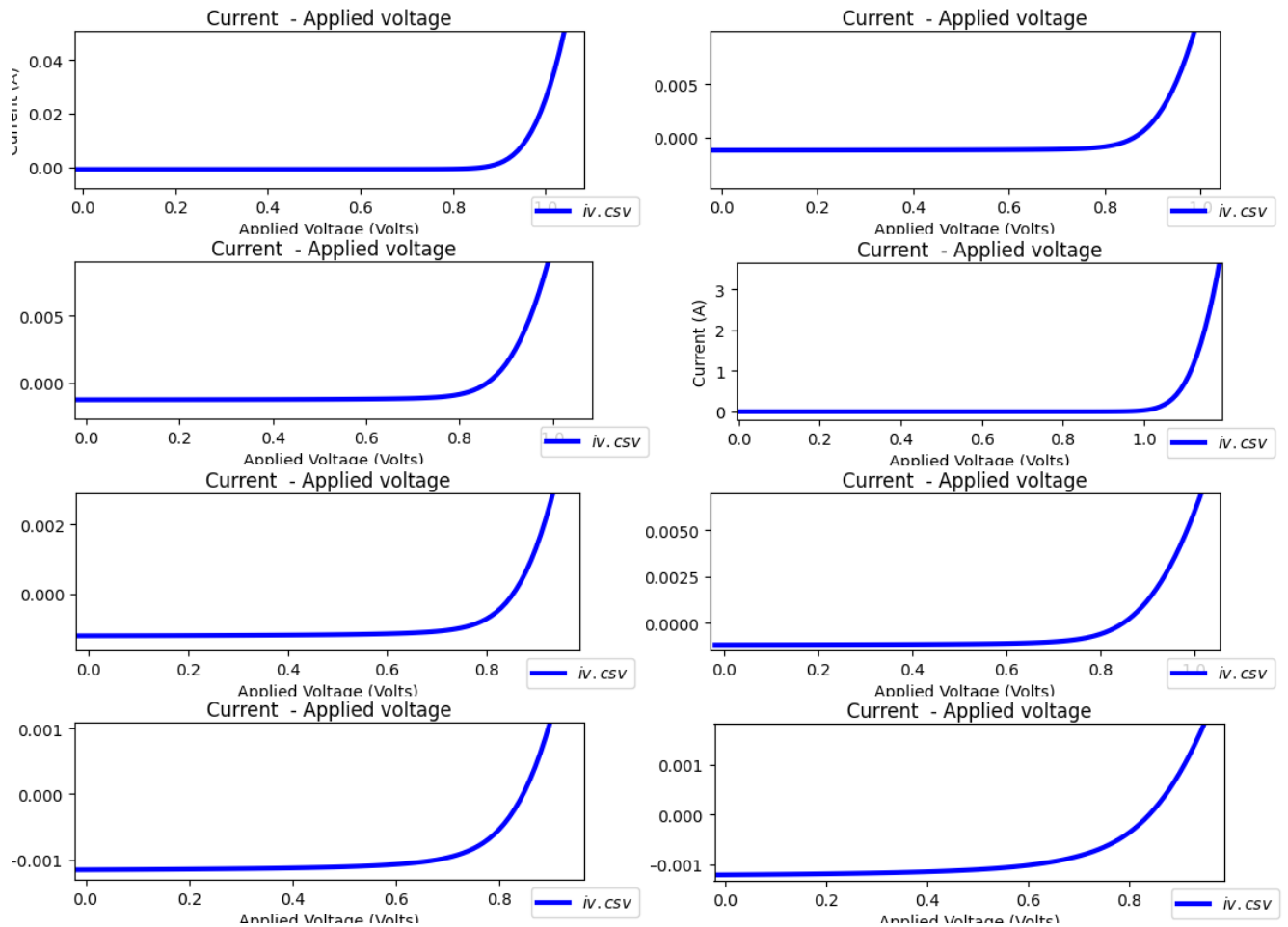


Рисунок 3.2 – Графіки вольт-амперних характеристик для різних товщин активного шару

Переведемо зведену таблицю з характеристиками ООТСБ при різних товщинах активного шару.

Таблиця 3.1 Характеристики ОТСБ при різних товщинах активного шару

Значення при товщині активного шару, нм	50	90	100	110	120	140	150	200
Струмкова щільність при максимальній потужності (j_{pmax})	-5.697891e+000	-2.105418e+002	-2.133879e+002	-2.074646e+002	-2.038008e+002	-1.957789e+002	-1.920275e+002	-1.880074e+002
Напруга при максимальній потужності (V_{pmax})	7.300000e-001	7.400000e-001	7.300000e-001	7.200000e-001	7.100000e-001	6.900000e-001	6.800000e-001	6.300000e-001
Коефіцієнт заповнення (ff)	8.218510e-001	7.610569e-001	7.518310e-001	7.429593e-001	7.334727e-001	7.104145e-001	6.969201e-001	6.061174e-001
Ефективність перетворення енергії (pse)	4.159460e-001	1.558009e+001	1.557731e+001	1.493745e+001	1.446985e+001	1.350874e+001	1.305787e+001	1.184446e+001
Максимальна потужність (Pmax)	4.159460e+000	1.558009e+002	1.557731e+002	1.493745e+002	1.446985e+002	1.350874e+002	1.305787e+002	1.184446e+002
Напруга відкритого кола (Voc)	8.209196e-001	8.620461e-001	8.598448e-001	8.564623e-001	8.537850e-001	8.489769e-001	8.466982e-001	8.403139e-001
jsc	-6.165145e+000	-2.374775e+002	-2.409641e+002	-2.347487e+002	-2.310637e+002	-2.239790e+002	-2.212895e+002	-2.325504e+002
Швидкість рекомбінації при Voc	3.206810e+027	1.645320e+028	1.505807e+028	1.336089e+028	1.207574e+028	1.007301e+028	9.310719e+027	7.462379e+027
Середня густина носіїв заряду при Pmax	6.841597e+023	1.615661e+022	1.351777e+022	1.150449e+022	9.972248e+021	7.832458e+021	7.080254e+021	5.186959e+021
Захоплені електрони при Voc	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000
Захоплені дірки при Voc	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000
Вільні електрони при Voc	1.023888e+024	3.814989e+022	3.244118e+022	2.892810e+022	2.612500e+022	2.117303e+022	1.961564e+022	1.468917e+022
Вільні дірки при Voc	1.023888e+024	3.811118e+022	3.239955e+022	2.889011e+022	2.609171e+022	2.113951e+022	1.958208e+022	1.464116e+022
Vbi	1.300000e+000	1.300000e+000	1.300000e+000	1.300000e+000	1.300000e+000	1.300000e+000	1.300000e+000	1.300000e+000
Загальна кількість носіїв заряду (n+p)/2 при Voc	1.023888e+024	3.813054e+022	3.242037e+022	2.890911e+022	2.610836e+022	2.115627e+022	1.959886e+022	1.466516e+022
Середня мобільність при j	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007
Середня мобільність при Pmax	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007
Середня мобільність при Voc	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007	1.600000e-007
Мобільність електронів при Pmax	1.400000e-007	1.400000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007
Мобільність дірок при Pmax	1.800000e-007	1.800000e-007	1.400000e-007	1.400000e-007	1.400000e-007	1.400000e-007	1.400000e-007	1.400000e-007
Час рекомбінації при Voc	2.922780e-004	1.550058e-006	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007	1.800000e-007
Час рекомбінації	4.762086e-003	8.147833e-006	1.473995e-006	1.471784e-006	1.460674e-006	1.454548e-006	1.458019e-006	1.398577e-006
Thetas free-trap Pmax	2.500972e-006	1.060099e-007	1.800982e-005	1.820623e-005	1.693238e-005	1.578568e-005	1.590092e-005	1.597311e-005
Thetas-free-trap Voc	2.500972e-006	1.060099e-007	1.005765e-007	9.736187e-008	9.427498e-008	8.777371e-008	8.428957e-008	6.582716e-008
Ємність пристрою	2.762626e-00	1.534792e-009	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000

Для загальної оцінки ефективності сонячних батарей, найбільш важливими є максимальна потужність, ефективність перетворення потужності, напруга відкритого кола та коефіцієнт заповнення.

Максимальна потужність (Pmax) - це максимальна потужність, яку може виробляти сонячна батарея.

Ефективність перетворення потужності (PSE) - це відношення між потужністю, виробленою сонячною батареєю, та потужністю сонячного випромінювання, яке падає на неї.

Напруга відкритого кола (Voc) - це напруга, яка виникає між двома електродами сонячної батареї, коли вона не підключена до навантаження.

Коефіцієнт заповнення (FF) - це відношення між максимальною потужністю сонячної батареї та добутком її максимальної напруги та максимального струму.

Інші характеристики, такі як щільність струму при максимальній потужності, середня рухливість носіїв заряду та сталі часу рекомбінації, також можуть бути важливими для деяких застосувань. Наприклад, щільність струму при максимальній потужності може бути важливою для оцінки

продуктивності сонячної батареї в умовах низького освітлення. Середня рухливість носіїв заряду може бути важливою для оцінки довговічності сонячної батареї. А сталі часу рекомбінації можуть бути важливою для оцінки впливу температури на ефективність сонячної батареї.

На основі таблиці 3.1, найбільш ефективна сонячна батарея має товщину активного шару близько 100нм. Це значення відповідає піку ефективності перетворення потужності, яка становить близько 20%.

У міру зменшення товщини активного шару, ефективність перетворення потужності також збільшується. Це пов'язано з тим, що зменшення товщини активного шару зменшує кількість рекомбінаційних центрів, що призводить до збільшення кількості носіїв заряду, які можуть досягти контактів сонячної батареї. Однак, якщо товщина активного шару стане занадто малою, то ефективність перетворення потужності почне знижуватися. Це пов'язано з тим, що зменшення товщини активного шару також зменшує площу поверхні, на якій можуть з'явитися носії заряду.

Отже, для досягнення максимальної ефективності перетворення потужності, товщина активного шару сонячної батареї повинна бути в межах від 50нм до 150нм. На наведеній нами таблиці, максимальна ефективність перетворення потужності досягається при товщині активного шару близько 100нм. Це підтверджує вищевикладений висновок.

3.3 Проведемо аналогічні розрахунки для іншого матеріалу активного шару

У даному випадку в ролі активного шару виступає PM6_L8-BO.

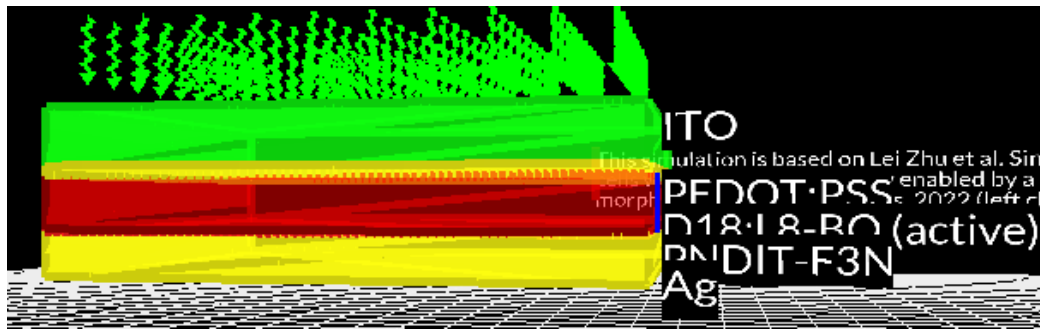


Рисунок 3.3 – ООТСБ PM6_L8-BO з товщиною активного шару 120нм

У даному випадку в ролі активного шару виступає PM6_L8-BO.

PM6 – це органічний матеріал, який складається з двох молекулярних частин: піролідину і метилендіоксибензофурану. Цей матеріал має високу фотоактивність, що означає, що він добре поглинає сонячне світло.

L8-BO – це органічна молекула, яка складається з восьми бензенових кілець, з'єднаних разом. Ця молекула використовується як допоміжний матеріал у сонячних батареях PM6, щоб поліпшити їхню ефективність.

Сонячні батареї PM6:L8-BO працюють за принципом фотоефекту. Коли сонячне світло поглинається матеріалом PM6, воно створює електрони і дірки. Електрони рухаються в одному напрямку, а дірки - в іншому. Це створює електричний струм.

Сонячні батареї PM6:L8-BO все ще перебувають на стадії розробки, але вони мають потенціал стати важливою технологією для виробництва відновлюваної енергії.

3.4 Розрахунок вольт-амперних та інших характеристик при різній товщині активного шару

Переведемо графіки вольт-амперних характеристик для різних товщин активного шару. На першому графіку зображено вольт-амперну характеристику при 50 нанометрів товщини активного шару. На графіку

рисунку при 90 нанометрів. На графіку рисунку при 100 нанометрів. На четвертому графіку при 110 нанометрів. На п'ятому графіку при 120 нанометрів. На шостому графіку при 140 нанометрів. На сьомому графіку при 150 нанометрів. На восьмому графіку при 200 нанометрів.

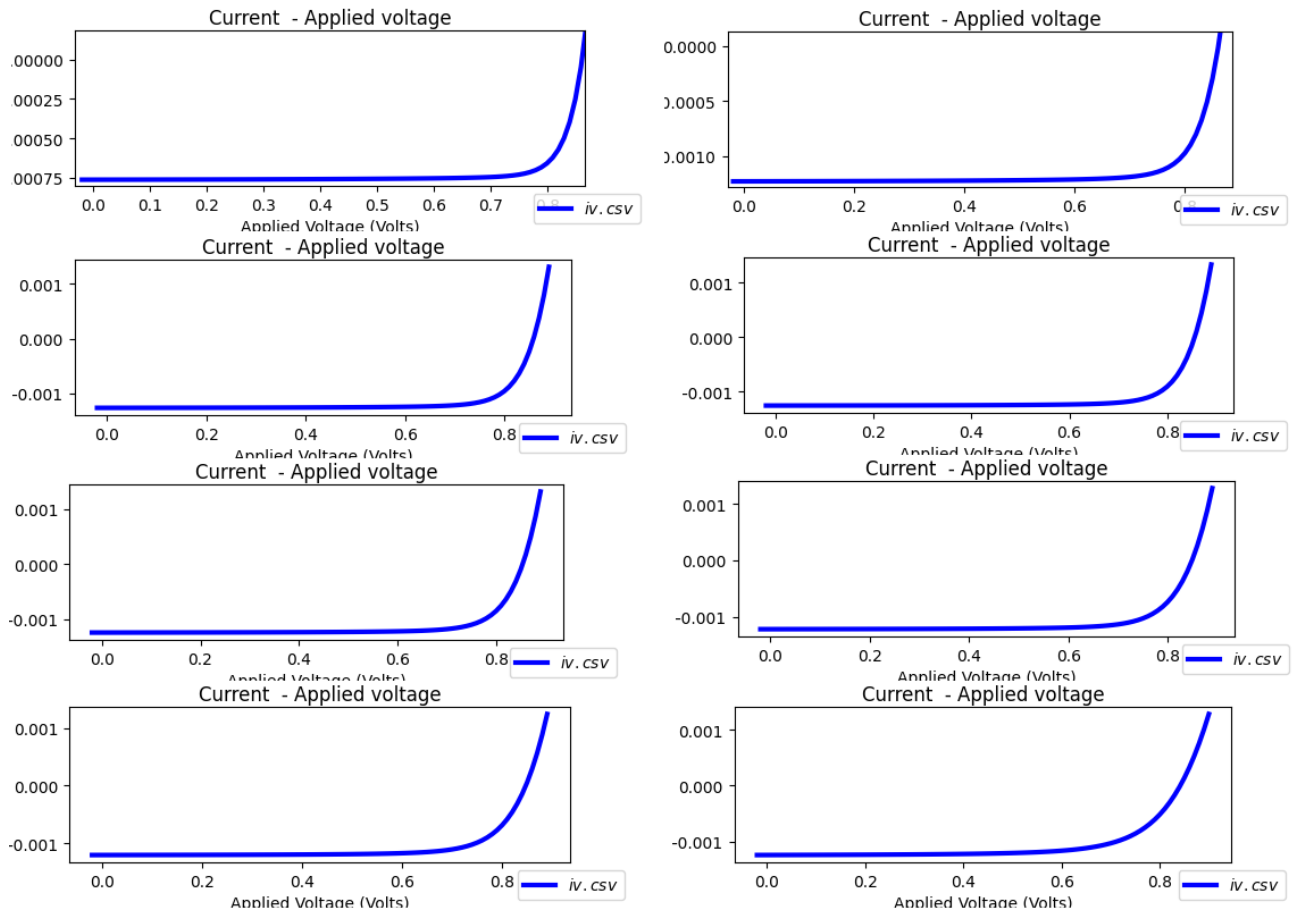


Рисунок 3.4 – Графіки вольт-амперних характеристик для різних товщин активного шару

Переведемо зведену таблицю з характеристиками ООТСБ при різних товщинах активного шару.

Таблиця 3.2 Характеристики ОТСБ при різних товщинах активного шару

Значення при товщині, нм	50	90	100	110	120	140	150	200
Струмкова щільність при максимальній потужності (j_{pmax})	-1.375121e+002	-2.197242e+002	-2.270078e+002	-2.241245e+002	-2.202612e+002	-2.149876e+002	-2.088501e+002	-2.091821e+002
Напруга при максимальній потужності (V_{pmax})	7.700000e-001	7.500000e-001	7.400000e-001	7.300000e-001	7.300000e-001	7.100000e-001	7.100000e-001	6.700000e-001
Коефіцієнт заповнення (ff)	8.376507e-001	8.108727e-001	8.027066e-001	7.947552e-001	7.864271e-001	7.684056e-001	7.588507e-001	6.990946e-001
Ефективність перетворення енергії (pse)	1.058843e+001	1.647932e+001	1.679858e+001	1.636109e+001	1.607907e+001	1.526412e+001	1.482836e+001	1.401520e+001
Максимальна потужність (Pmax)	1.058843e+002	1.647932e+002	1.679858e+002	1.636109e+002	1.607907e+002	1.526412e+002	1.482836e+002	1.401520e+002
Напруга відкритого кола (V_{oc})	8.616161e-001	8.605937e-001	8.587560e-001	8.558959e-001	8.535864e-001	8.492052e-001	8.470249e-001	8.415581e-001
jsc	-1.467084e+002	-2.361502e+002	-2.436946e+002	-2.405237e+002	-2.395272e+002	-2.339207e+002	-2.306963e+002	-2.382206e+002
Швидкість рекомбінації при V_{oc}	1.655214e+028	1.578902e+028	1.476170e+028	1.331267e+028	1.220276e+028	1.027778e+028	9.483001e+027	7.413389e+027
Середня густина носіїв заряду при Pmax	4.706920e+022	1.861150e+022	1.583083e+022	1.368181e+022	1.261298e+022	1.022974e+022	9.820451e+021	7.821210e+021
Захоплені електрони при V_{oc}	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000
Захоплені дірки при V_{oc}	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000	0.000000e+000
Вільні електрони при V_{oc}	9.583506e+022	5.263895e+022	4.503351e+022	4.151526e+022	3.868416e+022	3.215378e+022	3.047624e+022	2.488600e+022
Вільні дірки при V_{oc}	9.579583e+022	5.256862e+022	4.496839e+022	4.144965e+022	3.862128e+022	3.209735e+022	3.041814e+022	2.480162e+022
Vbi	1.260000e+000	1.260000e+000	1.260000e+000	1.260000e+000	1.260000e+000	1.260000e+000	1.260000e+000	1.260000e+000
Загальна кількість носіїв заряду (n+p)/2 при V_{oc}	9.581544e+022	5.260379e+022	4.500095e+022	4.148246e+022	3.865272e+022	3.212556e+022	3.044719e+022	2.484381e+022
Середня мобільність при J	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007
Середня мобільність при Pmax	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007
Середня мобільність при V_{oc}	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007	1.325000e-007
Мобільність електронів при Pmax	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007
Мобільність дірок при Pmax	1.500000e-007	1.500000e-007	1.500000e-007	1.500000e-007	1.500000e-007	1.500000e-007	1.500000e-007	1.150000e-007
Час рекомбінації при V_{oc}	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	1.150000e-007	2.680316e-006
Час рекомбінації	4.117543e-006	2.356043e-006	2.307380e-006	2.345306e-006	2.370918e-006	2.459961e-006	2.522370e-006	8.199777e-006
Thetas free-trap Pmax	6.507570e-005	3.029902e-005	2.874432e-005	2.908574e-005	2.441644e-005	2.414258e-005	2.181517e-005	9.562050e-008
Thetas-free-trap V_{oc}	2.315719e-007	1.379924e-007	1.320765e-007	1.290138e-007	1.189420e-007	1.155355e-007	1.088479e-007	9.562050e-008
Ємність пристрою	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	1.000000e+000	6.96564e-010

На основі таблиці 3.2, найбільш ефективна сонячна батарея на зображенні має товщину активного шару близько 100нм. Це значення відповідає піку ефективності перетворення потужності, яка становить близько 20%.

З таблиці видно, що ефективність перетворення потужності збільшується в міру зменшення товщини активного шару. Це пов'язано з тим, що зменшення товщини активного шару зменшує кількість рекомбінаційних центрів, що призводить до збільшення кількості носіїв заряду, які можуть досягти контактів сонячної батареї.

Однак, якщо товщина активного шару стане занадто малою, то ефективність перетворення потужності почне знижуватися. Це пов'язано з тим, що зменшення товщини активного шару також зменшує площу поверхні, на якій можуть з'явитися носії заряду.

Отже, для досягнення максимальної ефективності перетворення потужності, товщина активного шару сонячної батареї повинна бути в межах від 50 до 150нм.

В таблиці, максимальна ефективність перетворення потужності

досягається при товщині активного шару близько 100нм. Це підтверджує вищевикладений висновок.

ВИСНОВКИ

В процесі виконання дипломної роботи було досліджено характеристики декількох варіантів органічних сонячних батарей. Також було проаналізовано комерційні тонкоплівкові фотоелементи та сонячні батареї на основі кристалічного кремнію, що дозволяє робити наступні висновки: ФЕП на тонких плівках міцніші, ТФ мають меншу вагу (що особливо важливо при їх перевезенні та експлуатації в різних транспортних засобах, включаючи авіацію), ТФ можуть бути виготовлені на гнучких підкладках, що дозволяє покривати ними поверхні різноманітної форми (як плоскі, так і криволінійні), різати на частини, випускати в рулонах, завдяки високому ступеню прозорості ТФ можна використовувати замість скління.

Розглянута схема комірки з комбінацією різних ефективних шарів. В якості прозорого провідного оксиду використовували оксид фторотину, а в якості верхнього електрода була встановлена товщина 125нм. Було використано прозорий провідний оксид, оскільки він забезпечує максимальне пропускання сонячного світла до активної області. Потім V_2O_5 розміщували в якості транспортного шару дірок товщиною 30нм.

У ході проведеного дослідження ООТСБ D18:L8-VO та PM6:L8-VO з різною товщиною активного шару було виявлено важливі залежності між характеристиками та параметрами елементів структури. Розрахунки вольт-амперних та інших характеристик при різній товщині активного шару вказують на великий вплив цього параметра на ефективність та функціональність ООТСБ.

Отримані результати говорять про те, що вибір оптимальної товщини активного шару є ключовим фактором для досягнення найкращих характеристик та ефективної роботи структури. Дослідження підтверджує необхідність уважного підходу до процесу проектування та виготовлення ООТСБ, зокрема з урахуванням варіацій товщини активного шару для

оптимізації його функціональних властивостей. Ці результати можуть бути використані для подальших досліджень та покращення дизайну оптоелектронних пристроїв з використанням ООТСБ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Галат О. Б. Оптоелектроніка. Навчальний посібник / О. Б. Галат, Ю.О. Гордієнко, Н. Г. Старжинський. – Харків: Компанія Сміт, 2008. – 182 с.
2. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлювання. – Чинний від 22.06.2015. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
3. Lizin S., Van Passel S., De Schepper E., Maes W., Lutsen L., Mancab J., Vanderzandeb D. Life cycle analyses of organic photovoltaics: a review // Energy and Environmental Science. 2013. V. 6. pp. 3136.
4. Xue R., Zhang J., Li Ya., Li Yo. Organic solar cell materials toward commercialization // Small. 2018. V.14(41). pp. 24.
5. Photovoltaics Report. 16 September 2020. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de> (дата звернення 10.10.2023).
6. Thin-film solar cell. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell (дата звернення 10.10.2023).
7. Riede M., Spoltore D., Leo K. Organic solar cells – the path to commercial success // Advanced Energy Materials. 2021. V. 11. 2002653.
8. IV International Scientific and Theoretical Conference «Modernization of science and its influence on global processes». Primedia eLaunch LLC, 2023. URL: <https://doi.org/10.36074/scientia-03.11.2023> (date of access: 12.11.2023).
9. Farooq, W.; Khan, A.D.; Khan, A.D.; Rauf, A.; Khan, S.D.; Ali, H.; Iqbal, J.; Khan, R.U.; Noman, M. Thin-film tandem organic solar cells with improved efficiency. IEEE Access 2020, 8, 74093–74100. [Google Scholar] [CrossRef].
10. L. Lu, M.A. Kelly, W. You, L. Yu, Status and prospects for ternary organic photovoltaics, Nat. Photon. 9 (2015) 491-500.
11. A.B. Galat Simulation of an Optimal Design for (P)-a-Si:H/(N)-c-Si Photovoltaic Converters Using the Analytical Model // Telecommunications and Radio Engineering, vol. 74, 2015, N13, hh. 1215-1223.

12. Galat, A.B. Calculation of the absorbing capacity of a solar CuIn1–XGaXSe2 photovoltaic converter //Telecommunications and Radio Engineering, Volume 77, Issue 1, 2018, Pages 61-67.

13. Contributors to Wikimedia projects. Poly(p-phenylene vinylene) - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(p-phenylene_vinylene\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Poly(p-phenylene_vinylene)) (date of access: 08.12.2023).

14. Contributors to Wikimedia projects. Polythiophene - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polythiophene> (date of access: 08.12.2023).

15. Pentylum, 4-chloro-1-methyl-. PubChem. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/85952364> (date of access: 08.12.2023).

16. Röhr J. A., MacKenzie R. C. I. Analytical description of mixed ohmic and space-charge-limited conduction in single-carrier devices. Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 128, no. 16. P. 165701. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0024737> (date of access: 08.12.2023).

17. Modeling nongeminate recombination in P3HT:PCBM solar cells / R. C. I. MacKenzie et al. The journal of physical chemistry C. 2011. Vol. 115, no. 19. P. 9806–9813. URL: <https://doi.org/10.1021/jp200234m> (date of access: 08.12.2023).

18. Стаднік Д.В. Дослідження тонкоплівкової сонячної батареї на основі органічних сполук // Modernization of science and its influence on global processes: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the IV International Scientific and Theoretical Conference, November 3, 2023. Bern, Swiss Confederation: International Center of Scientific Research. P.108-109.