

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 БАГАТОШАРОВОГО СОНЯЧНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу II рівня вищої освіти
групи ЕППм-22-1

Бойко Б.Ю.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Електронні прилади та пристрої
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Галат О.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис) (прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 171 Електроніка _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____

Освітня програма _____ Електронні прилади та пристрої _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Бойко Богдану Юрійовичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження багатошарового сонячного
фотоперетворювача

затверджена наказом по університету від 14.11.2023 р. № 1473Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14.12. 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи

3.1 Матеріали активних шарів: органічні напівпровідники, полімери;

3.2 Кількість активних шарів – 3...4;

3.3 Електричні параметри: U_{xx} на менше 0,7В; FF не нижче 0,8;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1. Провести аналіз сучасних технологій в області багатошарових сонячних
фотоперетворювачів та їх застосування.

4.2. Дослідити фізичні та електричні властивостей матеріалів, що використовуються у сонячних
фотоперетворювачах.

4.3. Розробка та оптимізація структур багат шарових сонячних фотоперетворювачів з метою підвищення їхньої ефективності та стійкості до впливу навколишнього середовища.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів	Примітка
1	Отримання завдання	15.11.2023	
2	Огляд інформаційних джерел	17.11 – 23.11	
3	Аналіз інформаційних джерел	24.11 – 27.11	
4	Розглядання методу, конструкції та форми СЕ	28.12 – 03.12	
5	Пояснювальна записка	05.12 – 07.12	
6	Підготовка презентації	08.12 – 10.12	
7	Рецензування, нормоконтроль	10.12. – 13.12	
8	Здача роботи на кафедрі	02.01.2024	

Дата видачі завдання 14 листопада 2023 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 51 сторінку, 32 рисунки, 2 додатки, 15 використаних джерел.

ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ЕФЕКТИВНІСТЬ, СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ, ПОТУЖНІСТЬ, ПЕДОТ-ПСС, ТАНДЕМНА СТРУКТУРА, БАГАТОШАРОВИЙ СОНЯЧНИЙ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧ

Об'єкт дослідження – сонячні батареї, характеристики, параметри.

Метод – аналітичний з використанням програмного середовища grvdm.

Актуальність розробки альтернативних видів енергії пов'язана з зменшенням запасів традиційних джерел енергії та необхідністю їх ефективної заміни.

У роботі проведено дослідження методів та засобів виробництва відновлюваних видів енергії (зокрема сонячної), розглянуті існуючі схеми та виконані розрахунки характеристик тандемної сонячної батареї.

Мета роботи – пошук та обґрунтування напрямків поліпшення характеристик тонкоплівкових багатошарових сонячних фотоперетворювачів, вибір структур та конструкцій багатошарового фотоперетворювача, дослідження характеристик фотоперетворювача.

ABSTRACT

The explanatory note contains 51 pages, 32 figures, 2 appendix, 15 used sources.

SOLAR PANEL, POWER, VOLT-AMPER CHARACTERISTICS, PEDOT:PSS, EFFICIENCY, TANDEM STRUCTURE, MULTILAYER SOLAR PHOTO CONVERTER

Object of research - solar panels, characteristics, parameters.

The method is analytical using the gpvdm software environment.

The urgency of developing alternative energy sources is related to the reduction of stocks of traditional energy sources and the need for their effective replacement.

The study of methods and means of production of renewable energy (solar), considered the existing schemes and performed calculations of the characteristics of tandem solar panels.

The purpose of the work is to find and substantiate directions for improving the characteristics of thin-film multilayer solar photoconverters, as well as to perform appropriate calculations to confirm the proposed solutions. Selection of structures and constructions of a multilayer photoconverter, research and calculation of photoconverter characteristics.

Objective - searching and finding linear characteristics of finely dispersed giant solar phototranslations, choosing structures and designs of large phototranslations, studying the characteristics of phototranslations.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	9
1 СУЧАСНІ СТРУКТУРИ БАГАТОШАРОВИХ СОНЯЧНИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ В.....	9
1.1 Огляд основних принципів роботи сонячних фотоперетворювачів.....	9
1.2 Основні виклики та проблеми в розробці багатошарових сонячних фотоперетворювачів.....	13
1.3 Сучасні дослідження та інновації в галузі багатошарових сонячних фотоперетворювачів.....	14
2 ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР.....	14
2.1 Вибір матеріалів для багатошарових сонячних фотоперетворювачів.....	17
2.2 Методи виготовлення багатошарових структур сонячних фотоперетворювачів.....	19
2.3 Експериментальні методи дослідження багатошарових сонячних фотоперетворювачів.....	22
2.4 Методи виготовлення багатошарового сонячного фотоперетворювача...	24
2.5 Вимірювання та характеристизація багатошарового сонячного фотоперетворювача.....	25
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОШАРОВОГО СОНЯЧНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	27
3.1 Вибір матеріалів	27
3.2 Моделювання та чисельні методи в дослідженні багатошарових сонячних фотоперетворювачів.....	29
3.3 Загальні напрямки новітніх досліджень.....	33
4 РОЗРАХУНКИ ТАНДЕМНОГО СОНЯЧНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	35
4.1 Параметри активного шару ПЕДОТ:ПСС.....	35
4.2 Розрахунки характеристик та параметрів фотоперетворювача.....	37

4.3 Аналіз результатів.....	47
-----------------------------	----

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

ДОДАТОК А

ДОДАТОК Б

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

AL - Активний шар (Active Layer);

CTL - Шар перенесення заряду (Charge Transport Layer);

CVD - хімічного відкладення з газової фази (chemical vapor deposition);

CE – сонячний елемент;

EH TL - Контактний шар (Electron and Hole Transport Layers):

PL - Шар захисту (Protective Layers)

PVD - відкладення з пари (physical vapor deposition).

ВСТУП

Сучасний світ стикається зі складними енергетичними викликами, пов'язаними з вичерпанням природних ресурсів та негативним впливом виробництва енергії на навколишнє середовище. У цьому контексті відновлювані джерела енергії, такі як сонячна енергія, набувають особливої ваги. Сонячні фотоперетворювачі є ключовим елементом сонячних електростанцій та мають великий потенціал для забезпечення стабільних та чистих джерел енергії.

Основні завдання роботи включають у себе:

- аналіз сучасних технологій в області багат шарових сонячних фотоперетворювачів та їх застосування;
- вивчення фізичних та електричних властивостей матеріалів, що використовуються у сонячних фотоперетворювачах;
- розробка та оптимізація структур багат шарових сонячних фотоперетворювачів з метою підвищення їхньої ефективності та стійкості до впливу навколишнього середовища;
- експериментальне дослідження розроблених сонячних фотоперетворювачів та порівняння їхніх характеристик з відомими зразками.

Дослідження багат шарових сонячних фотоперетворювачів має велике наукове значення, оскільки воно спрямоване на вдосконалення технологій виробництва сонячних елементів та забезпечення розвитку відновлюваної енергетики [1...4]. Практична значимість роботи полягає в можливості впровадження отриманих результатів у виробництво для створення більш ефективних та екологічно чистих сонячних фотоперетворювачів.

Робота складатиметься з чотирьох розділів. У першому розділі буде проведений аналіз літературних джерел та сучасних технологій у галузі сонячних фотоперетворювачів. Другий розділ присвячений дослідженню матеріалів, що використовуються у багат шарових сонячних фотоперетворювачах. У третьому

розділі розглядаються методи розробки та оптимізації структур сонячних фотоперетворювачів. У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень та їх порівняння з відомими зразками. На основі отриманих результатів буде зроблено висновки та надані рекомендації для подальших досліджень у даній області.

Мета роботи – пошук та обґрунтування напрямків поліпшення характеристик тонкоплівкових багатошарових сонячних фотоперетворювачів, вибір структур та конструкцій багатошарового фотоперетворювача, дослідження характеристик фотоперетворювача.

1 СУЧАСНІ СТРУКТУРИ БАГАТОШАРОВИХ СОНЯЧНИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1 Огляд основних принципів роботи сонячних фотоперетворювачів

Сонячні фотоперетворювачі використовуються для перетворення сонячної енергії в електричну енергію за допомогою фотоелектричного ефекту. Одним із основних видів сонячних фотоперетворювачів є багатошарові сонячні елементи, які складаються з декількох шарів різних напівпровідникових матеріалів. Кожен шар має свою унікальну роль у поглибленні та перенесенні фотонів, що допомагає підвищити коефіцієнт конверсії сонячної енергії в електричний струм.

Існує кілька типів багатошарових сонячних фотоперетворювачів, таких як тонкі плівкові сонячні елементи, органічно-неорганічні гібридні сонячні елементи та перовскітні сонячні елементи [2,3]. Кожен з цих типів має свої переваги та обмеження, що визначають їхню застосовність в різних умовах та сферах використання.



Рисунок 1.1 – Структура тонкого плівкового елемента

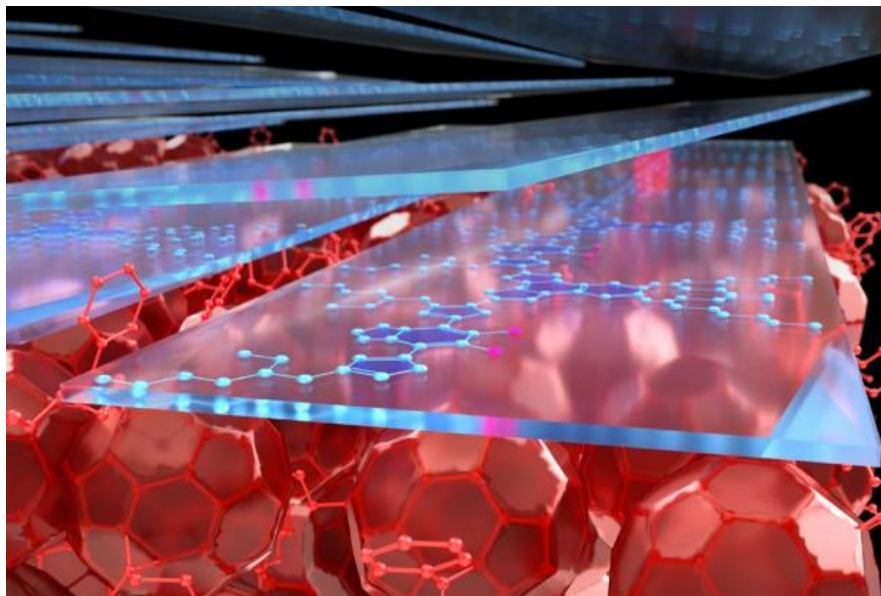


Рисунок 1.2 – Структура органічно-неорганічного гібридного сонячного елемента

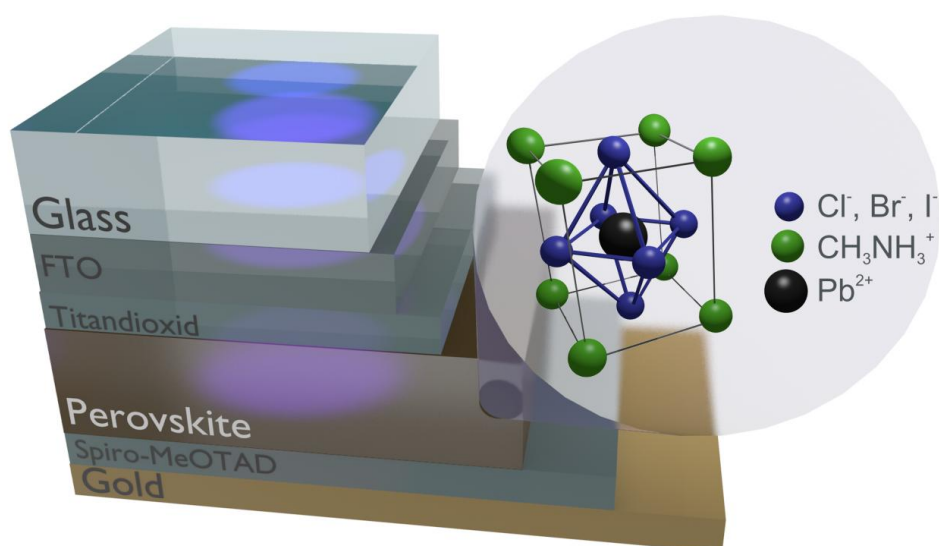


Рисунок 1.3 – Структура перовскітного сонячного елемента

Незважаючи на значний прогрес у сфері багатошарових сонячних фотоперетворювачів, існують деякі основні виклики та проблеми, що гальмують

їхній розвиток. До цих проблем можна віднести нестабільність ефективності під впливом зовнішніх факторів, високі витрати виробництва та складність у виготовленні великих площ сонячних елементів.

Останні роки були відзначені значними досягненнями в галузі багат шарових сонячних фотоперетворювачів. Дослідники активно працюють над розробкою нових матеріалів, методів виготовлення та оптимізації структур для покращення ефективності та стабільності роботи сонячних елементів.

Літературний огляд дозволяє зрозуміти поточний стан галузі багат шарових сонячних фотоперетворювачів, їхні основні переваги та обмеження. Сучасні технології та дослідження в цій області вказують на перспективи розвитку та можливості подальших вдосконалень. У наступних розділах роботи будуть розглянуті деталі розробки та експериментального дослідження багат шарових сонячних фотоперетворювачів для подальшого вдосконалення їхніх характеристик та розширення можливостей їх використання в сучасних енергетичних системах.

1.2 Основні виклики та проблеми в розробці багат шарових сонячних фотоперетворювачів

Багат шарові сонячні фотоперетворювачі є передовими технологіями, але їхній розвиток не обійшовся без викликів та проблем. У цьому підрозділі розглянемо основні виклики, які виникають при розробці та виготовленні багат шарових сонячних фотоперетворювачів, а також роздивимось можливі шляхи їх вирішення.

Однією з головних проблем є нестабільність ефективності багат шарових сонячних фотоперетворювачів під впливом зовнішніх факторів, таких як температура, вологість, освітленість тощо [3,4]. Нестабільність може виникнути через деградацію матеріалів або несприятливі умови експлуатації.

Виготовлення багат шарових сонячних фотоперетворювачів великих розмірів складне через високі вимоги до їхньої єдності та стабільності. Великі

площі вимагають додаткових заходів контролю якості, що підвищує складність та витрати виробництва.

Дослідження та вибір матеріалів для кожного шару багатошарової структури потребують глибокого матеріалознавства та аналізу їхніх властивостей. Підбір оптимальних матеріалів, які б дозволили досягти найвищої конверсійної ефективності, є складною задачею.

Незважаючи на ці виклики, багатошарові сонячні фотоперетворювачі залишаються перспективною галуззю досліджень. Нові методи синтезу матеріалів, вдосконалення технологій виготовлення та впровадження нанотехнологій можуть допомогти у подоланні цих викликів та забезпечити стабільний та ефективний розвиток багатошарових сонячних фотоперетворювачів у майбутньому [5].

1.3 Сучасні дослідження та інновації в галузі багатошарових сонячних фотоперетворювачів

У цьому підрозділі розглядаються сучасні тенденції та інновації, які здійснюються в галузі багатошарових сонячних фотоперетворювачів. Зокрема, розглядаються ключові напрями досліджень та вдосконалення технологій, які спрямовані на поліпшення ефективності, стабільності та масштабованості цих фотоперетворювачів.

Один із основних напрямків досліджень - це синтез та застосування нових напівпровідникових матеріалів для багатошарових сонячних фотоперетворювачів. Дослідження органічних, неорганічних та гібридних матеріалів дозволяють виходити за рамки традиційних перовскітних структур та розробляти нові матеріали з високою ефективністю та стабільністю роботи.

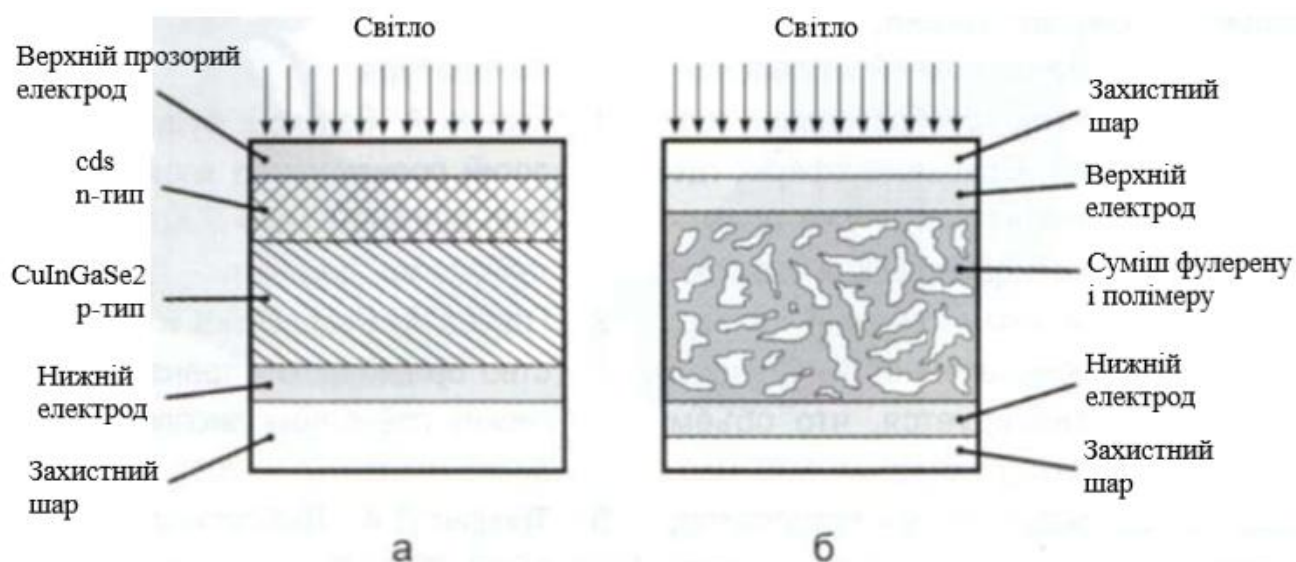


Рисунок 1.4 – Порівняння (а) – неорганічної і (б) органічної структури СЕ

Розробка нових методів виготовлення, таких як друковані технології, вакуумне відкладання та молекулярне паросублімаційне осадження, дозволяє покращити процеси виготовлення багатошарових сонячних фотоперетворювачів. Це може включати в себе оптимізацію шарів, поліпшення адгезії та зменшення втрат матеріалу під час виготовлення.

Нанотехнології відкривають нові можливості для розробки багатошарових сонячних фотоперетворювачів. Застосування наноматеріалів, таких як квантові точки та нанодроти, дозволяє підвищити ефективність абсорбції світла та зменшити рекомбінаційні втрати [5].

Дослідження структурних змін у багатошарових сонячних фотоперетворювачах та їхніх інтерфейсів грає важливу роль у зрозумінні процесів перенесення заряду та механізмів рекомбінації. Аналіз структури шарів та їх взаємодії дозволяє вдосконалити дизайн фотоперетворювачів [6...8].

Екологічні аспекти та використання відновлюваних ресурсів:

Звертання уваги на використання екологічно чистих та відновлюваних матеріалів у виготовленні багатошарових сонячних фотоперетворювачів відкриває нові можливості для створення екологічно безпечних джерел відновлюваної енергії.

Сучасні дослідження та інновації у галузі багатошарових сонячних фотоперетворювачів відкривають нові перспективи для створення більш ефективних, стабільних та екологічно безпечних сонячних елементів. Ці дослідження відіграють ключову роль у розвитку сучасних технологій відновлюваної енергії та сприяють впровадженню сонячних фотоперетворювачів у реальні енергетичні системи.

2 ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ СТРУКТУР

2.1 Вибір матеріалів для багатошарових сонячних фотоперетворювачів

Одним з ключових викликів у розробці багатошарових сонячних фотоперетворювачів є вибір оптимальних матеріалів для кожного шару структури, оскільки їх властивості напряму впливають на ефективність та стабільність сонячного елемента. У цьому підрозділі розглянемо різні типи напівпровідникових матеріалів, їхні переваги та обмеження, а також принципи їхнього вибору для багатошарових сонячних фотоперетворювачів.

Перовскітні сполуки, зокрема гібридні органічно-неорганічні перовскіти, такі як метиламонієвий плюмбат йодид ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), отримали значну увагу через їх високу абсорбцію світла та потенціал для високоенергетичних конверсійних ефективностей [6,7]. Вони мають відмінну оптичну та електронну провідність, що робить їх ідеальними кандидатами для верхнього (активного) шару багатошарових фотоперетворювачів.

Органічні полімери, такі як полі(3,4- етилендіоксітіофен): полі (стирен-сульфонат) (PEDOT:PSS), є популярними матеріалами для електродів у сонячних фотоперетворювачах. Вони мають високий індекс прозорості та хорошу провідність, що робить їх ідеальними для використання як прозорі аноди та катода [9..12].

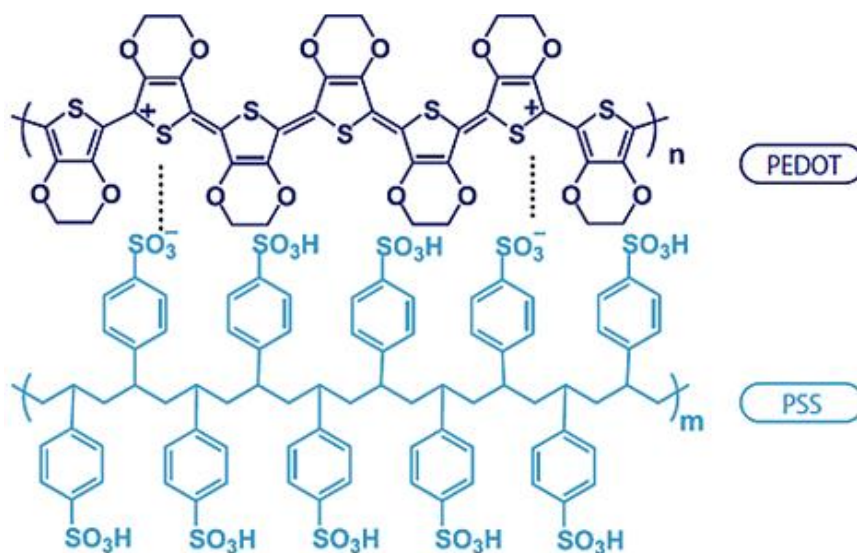


Рисунок 2.1 – Структура PEDOT-PSS

Тонкі плівки кремнію (a-Si, μ c-Si) є одними з найбільш поширених матеріалів для сонячних фотоперетворювачів, оскільки вони є стійкими до корозії та мають відносно високий коефіцієнт абсорбції світла. Вони використовуються як активний матеріал у нижніх шарах багатошарових структур.

Органічні перовскітні сполуки, такі як формамідиніумовий плюмбат йодид (FAPbI₃), є перспективними матеріалами для сонячних фотоперетворювачів через їх високий квантовий вихід із світла та можливість легкої модифікації для підвищення ефективності.

Вибір матеріалів для активних, прозорих та електродних шарів багатошарових сонячних фотоперетворювачів визначається їхніми оптичними та електронними властивостями. Наприклад, для активного шару вибираються матеріали з оптимальною шириною забороненої зони та великою подавленою рекомбінацією електронів та дірок. Прозорі аноди та катоди повинні мати високу провідність та прозорість для максимізації пропускання світла.

Вибір оптимальних матеріалів для багатошарових сонячних фотоперетворювачів є критичним етапом у розробці структур, які мають високу ефективність та стабільність. Наявність широкого спектру матеріалів та їх комбінацій дозволяє дослідникам підходити до розробки оптимальних

багатошарових сонячних фотоперетворювачів залежно від конкретних застосувань та умов використання [13...15].

2.2 Методи виготовлення багатошарових структур сонячних фотоперетворювачів

Детально розглянемо різні методи виготовлення багатошарових структур сонячних фотоперетворювачів, включаючи методи відкладання шарів, характеризуючи їхні переваги, недоліки та області застосування:

- вакуумне осадження (PVD - Physical Vapor Deposition). Цей метод полягає в осадженні тонких шарів матеріалу на поверхню субстрату за допомогою відпарювання матеріалу в вакуумі та його конденсації на поверхні субстрату. Вакуумне відкладання є одним з найпоширеніших методів для виготовлення тонких плівок напівпровідникових матеріалів через його високу точність та контроль нанесення матеріалу.

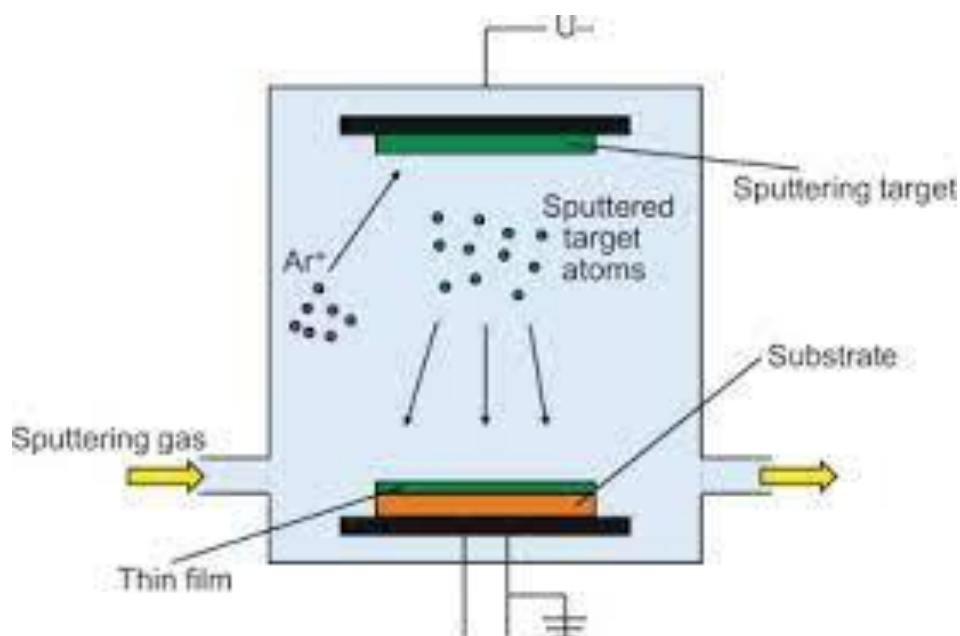


Рисунок 2.2 – Вакуумне осадження

- хімічне осадження з газової фази (CVD - Chemical Vapor Deposition).

У цьому методі газ з реагентів розкладається на поверхні субстрату, утворюючи тонкий плівковий шар. Цей метод використовує реакції між газами та поверхнею субстрату для створення плівок з високою чистотою та стабільністю. CVD може бути застосований для виробництва різних типів матеріалів, включаючи аморфний кремній, аморфні та кристалічні перовскітні сполуки тощо.

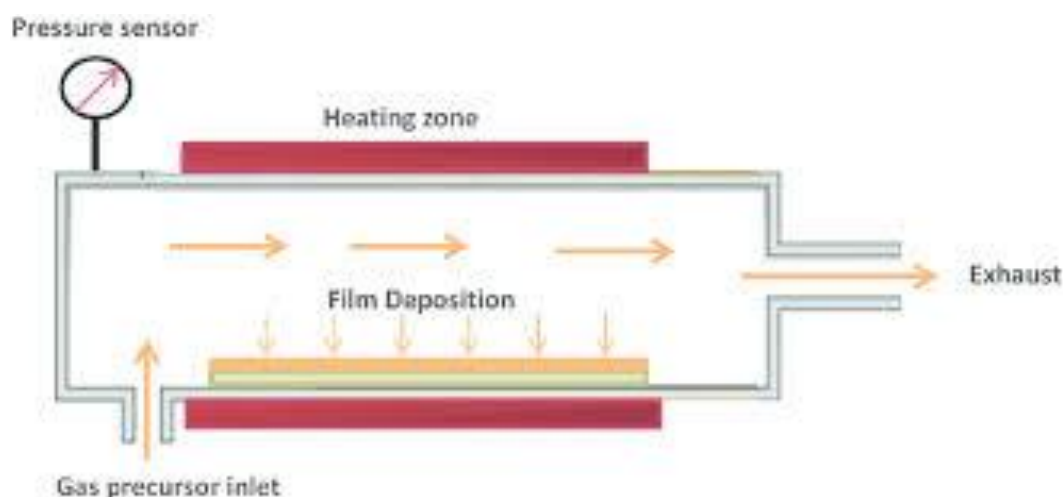


Рисунок 2.3 – Хімічне осадження з газової фази

- метод спреї-піролізу (Spray Pyrolysis).

У цьому методі розчин матеріалу розпилюється на поверхню субстрату, яка знаходиться на підігріві, де розчин випаровується, залишаючи плівку на поверхні. Цей метод дозволяє виготовляти плівки високої якості при низьких витратах та може бути застосований для різних матеріалів.

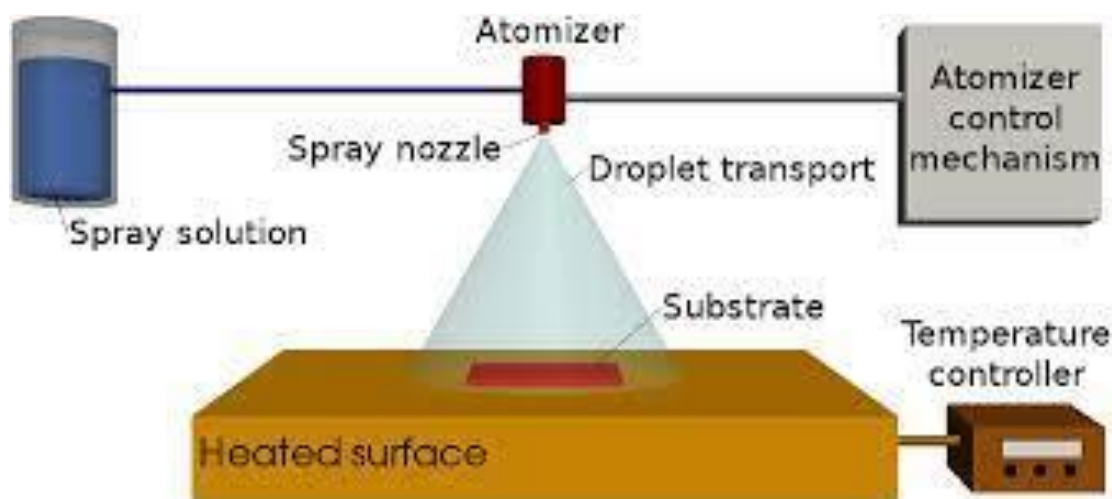


Рисунок 2.4 – Спрей-пероліз

- метод сол-гель (Sol-Gel Method).

Цей метод використовує взаємодію реакційних розчинів для утворення геліподібної структури, яка потім перетворюється у тверду плівку. Сол-гель метод дозволяє отримати тонкі плівки з великою поверхневою областю та може бути використаний для різних матеріалів, включаючи перовскітні сполуки.

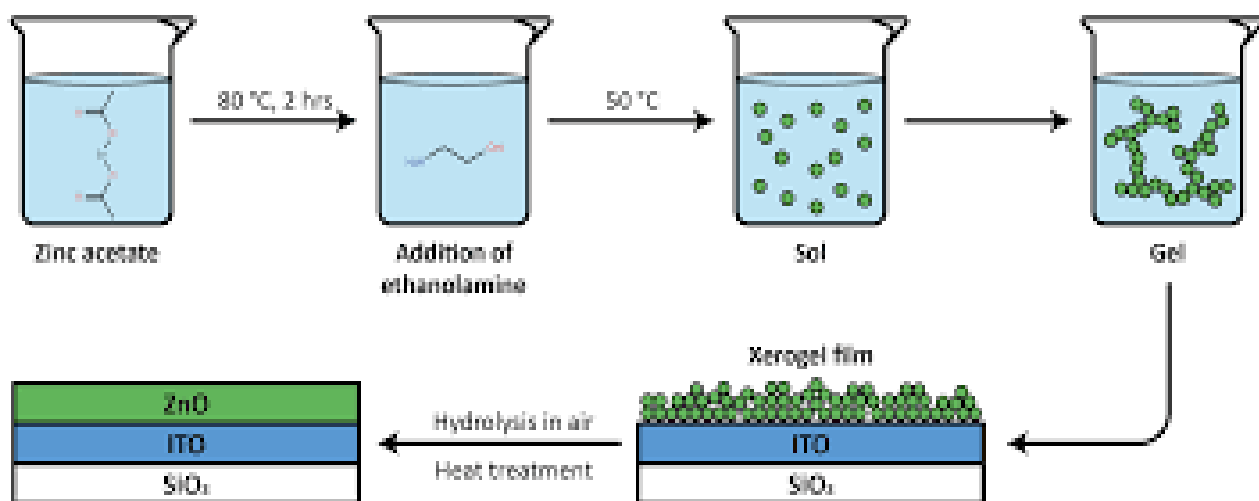


Рисунок 2.5 - Метод сол-гель

- лазерний осадження (PLD - Pulsed Laser Deposition).

У цьому методі використовується лазер для відпаровування матеріалу з мішені, який потім конденсується на поверхні субстрату, утворюючи плівку. PLD може бути використаний для дослідження різних матеріалів та отримання високоякісних плівок з великою чистотою та однорідністю.

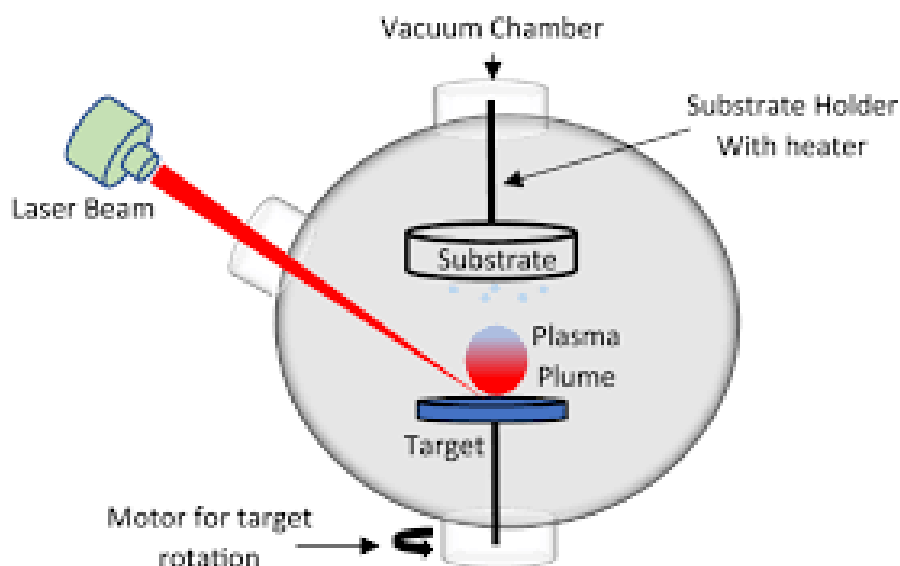


Рисунок 2.6 – Лазерне відкладання

Різні методи виготовлення багатошарових сонячних фотоперетворювачів мають свої переваги та обмеження. Вибір конкретного методу залежить від матеріалу, який використовується, а також від конкретних вимог до якості та витрат виробництва. Наявність різних методів виготовлення дозволяє розробникам вибирати оптимальний підхід для створення багатошарових сонячних фотоперетворювачів з високою ефективністю та стабільністю.

2.3 Експериментальні методи дослідження багатошарових сонячних фотоперетворювачів

Розглянемо різні експериментальні методи дослідження багатошарових сонячних фотоперетворювачів, які дозволяють вивчати їхні фізичні, електронні та оптичні властивості. Ці методи включають в себе спектроскопічні, електронні та

мікроскопічні техніки, що допомагають зрозуміти процеси, які відбуваються у багатошарових сонячних фотоперетворювачах.

Фотоелектрична спектроскопія використовується для вивчення енергетичних рівнів та оптичних властивостей матеріалів [7]. Цей метод дозволяє аналізувати абсорбційні та емісійні спектри багатошарових структур та визначати їхні енергетичні бар'єри, заборонені зони та інші важливі параметри.

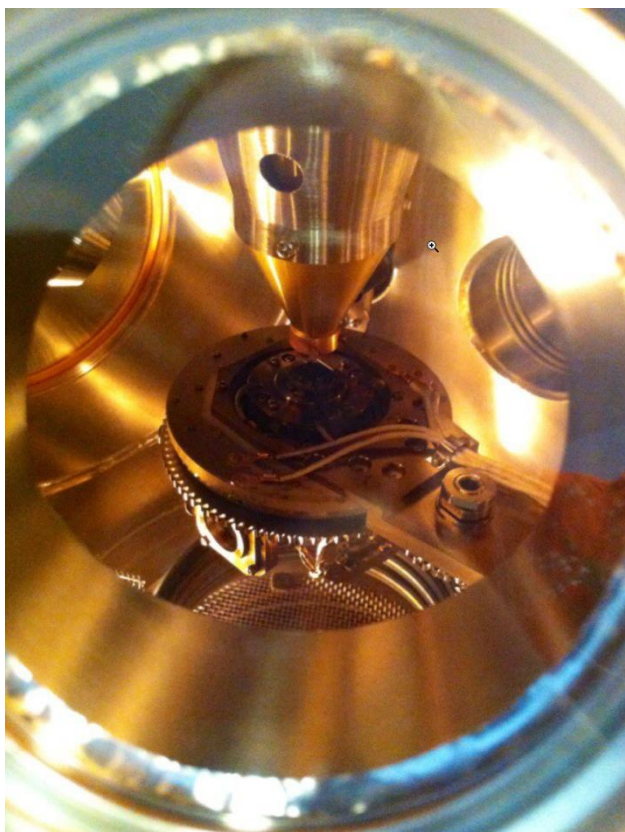


Рисунок 2.7 – Установка рентгенівської фотоелектронної спектроскопії

Електронна мікроскопія (SEM - Scanning Electron Microscopy).

SEM використовується для отримання високороздільних зображень поверхні та внутрішньої структури матеріалів. Цей метод дозволяє вивчати морфологію та розмір частинок, що складають багатошарові фотоперетворювачі, а також виявляти можливі дефекти та неоднорідності в структурі.

Профілометрія поверхні.

Цей метод дозволяє вимірювати мікро- та нанорельєф поверхні багатошарових сонячних фотоперетворювачів. Зміри профілю поверхні є важливими для визначення якості та рівномірності нанесення шарів, а також для контролю товщини плівок.

Електронна спектроскопія з високою роздільною здатністю (XPS - X-ray Photoelectron Spectroscopy).

XPS використовується для вивчення хімічного складу поверхні матеріалів та дослідження взаємодії між різними шарами. Цей метод дозволяє визначити ступінь окислення, хімічний стан елементів та інші характеристики поверхні.

Темнова лічильна електронна мікроскопія (TEM - Transmission Electron Microscopy).

TEM використовується для отримання високороздільних зображень внутрішньої структури матеріалів на наномасштабі. Цей метод дозволяє досліджувати структуру індивідуальних шарів та взаємодію між ними на атомному рівні.

Розглянуті експериментальні методи дослідження, грають ключову роль у вивченні фізичних та хімічних властивостей багатошарових сонячних фотоперетворювачів. Ці методи дозволяють вченим та інженерам отримувати детальні дані про структуру та властивості матеріалів, що є важливим для подальшого вдосконалення та оптимізації дизайну сонячних фотоперетворювачів.

2.4 Методи виготовлення багатошарового сонячного фотоперетворювача

Підготовка матеріалів для виготовлення різних шарів фотоперетворювача може включати в себе синтез органічних полімерів, вирощування кристалів перовскіту, обробку напівпровідникових матеріалів та інші процеси для отримання високоякісних матеріалів для використання у фотоперетворювачі.

Нанесення різних шарів матеріалів на підкладку фотоперетворювача може включати в себе методи відкладення з пари (physical vapor deposition, PVD), хімічного відкладення з газової фази (chemical vapor deposition, CVD), спреєвого

нанесення (spray coating), розпилову депозицію (sputtering) та інші техніки нанесення шарів.

Термічна обробка та синтез шарів включають в себе процеси термічної обробки, які використовуються для покращення кристалічної структури матеріалів та оптимізації їхніх фізичних та електричних властивостей. Це може включати в себе процеси кристалізації, відпалювання, аморфізації та інші термічні методи синтезу.

Формування електродів та завершальна обробка.

В якості завершального етапу формуються електроди на поверхні фотоперетворювача та завершається обробка структури для забезпечення ефективного виведення електричних сигналів. Це може включати в себе відкладення тонких металевих плівок, створення прозорих електродів, а також застосування антирефлексійних покриттів.

Ці методи є ключовими для успішного створення функціонального та ефективного фотоперетворювача та можуть бути використані для подальших досліджень і розвитку сонячних енергетичних технологій.

2.5 Вимірювання та характеристика багатошарового сонячного фотоперетворювача

Вимірювання спектральної відповіді. Застосовуються методи вимірювання спектральної відповіді фотоперетворювача. Зазвичай використовуються спектрофотометри для визначення того, які довжини хвиль світла ефективно абсорбуються фотоперетворювачем. Це важливо для визначення максимальної ефективності конверсії світла в електричний струм.

Вимірювання електричних характеристик. Методи вимірювання електричних характеристик фотоперетворювача, таких як вольт-амперна характеристика (I-V крива), яка показує відношення струму та напруги при різних внутрішніх опорах. Ці вимірювання допомагають визначити ефективність фотоперетворювача та його внутрішній опір.

Визначення квантової ефективності. Ця величина вказує, яка частина фотонів, падаючих на фотоперетворювач, перетворюється в носії заряду. Визначення квантової ефективності є важливим для розуміння продуктивності фотоперетворювача на рівні одного фотона.

Вимірювання стабільності та довговічності фотоперетворювача під впливом різних зовнішніх факторів, таких як світло, температура, вологість та інші. Ці вимірювання служать для визначення того, як довго фотоперетворювач може залишатися функціональним та ефективним у реальних умовах експлуатації.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОШАРОВОГО СОНЯЧНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1 Вибір матеріалів

Включаючи в себе вибір матеріалів, методи виготовлення, вимірювання та аналіз результатів, цей розділ розглядає конкретні кроки, які здійснюються для перевірки та валідації теоретичних моделей та симуляцій.

Властивості матеріалів для багатошарового сонячного фотоперетворювача. Оптичні властивості включають коефіцієнт поглиблення світла, індекс рефракції та спектральну відповідь матеріалу. Матеріали з великим коефіцієнтом поглиблення світла ефективно абсорбують фотони при різних довжинах хвиль спектра світла. Індекс рефракції впливає на розсіювання та відбиття світла на межі різних шарів у фотоперетворювачі.

Електронні властивості включають подвійну ширину забороненої зони (bandgap), що вказує на кількість енергії, необхідної для збудження електронів та дірок, та рухливість носіїв заряду. Матеріали з великою bandgap можуть бути використані для одержання високої напруги в багатошарових фотоперетворювачах, тоді як велика рухливість носіїв заряду сприяє ефективному транспорту заряду в матеріалі [8].

Механічні властивості, такі як міцність, гнучкість та стійкість до деформацій, мають важливе значення, оскільки фотоперетворювачі можуть бути виготовлені у вигляді тонких плівок або гнучких матеріалів для застосування у флексібільних пристроях.

Хімічні стабільність та стійкість до окисдування чи корозії також є важливими параметрами, особливо для матеріалів, які можуть бути піддані впливу навколишнього середовища чи високих температур.

Враховуючи всі ці властивості, проводиться оптимізація для вибору матеріалів для кожного шару багатошарового сонячного фотоперетворювача.

Розглядаються можливі компроміси між різними властивостями та визначаються оптимальні матеріали для досягнення високої ефективності та стабільності фотоперетворювача.

Вибір матеріалів для різних шарів багатшарового сонячного фотоперетворювача включає наступні шари [9]:

Активний шар (Active Layer). AL відповідає за абсорбцію світла і генерацію електронно-діркових пар. Для цього шару вибирають матеріали з великою коефіцієнтом поглиблення світла та відповідною шириною забороненої зони (bandgap), яка відповідає за абсорбцію світла в потрібному діапазоні довжин хвиль. Полімери, перовскітові структури, аморфні силікони - це приклади матеріалів, які можуть бути використані для активного шару в залежності від вимог до спектральної віддачі.

Шар перенесення заряду (Charge Transport Layer). CTL відповідає за перенесення електронів та дірок від активного шару до відповідних контактів. Матеріали для цього шару повинні мати високу рухливість носіїв заряду та хорошу адгезію до активного шару. Органічні напівпровідники та певні неорганічні матеріали, наприклад, TiO_2 (титановий діоксид) або ZnO (цинковий оксид), можуть бути використані для створення шару перенесення заряду.

Контактні шари (Electron and Hole Transport Layers). EHTL відповідають за збір електронів та дірок та їхню подальшу подачу до зовнішніх електродів. Матеріали для цих шарів повинні володіти високою електропровідністю та ефективністю інжекції носіїв заряду. Типові матеріали включають LiF (літійовий фторид) для електронних контактів та PEDOT:PSS (полі(3,4-етилендіоксітіофен)/полі(4-стиренсульфонат)) для діркових контактів у органічних фотоперетворювачах.

Шари захисту (Protective Layers) використовуються для захисту внутрішніх шарів фотоперетворювача від впливу атмосферних газів, вологості або інших негативних факторів. Для цих шарів можуть використовуватися органічні полімери або нанокompозитні матеріали.

Розгляд можливих комбінацій матеріалів для багат шарового сонячного фотоперетворювача.

На основі проведених досліджень визначаються оптимальні комбінації матеріалів для кожного шару фотоперетворювача. Ці комбінації враховують вимоги до оптичних та електричних властивостей кожного шару, а також забезпечують ефективну взаємодію між шарами. Після аналізу та моделювання різних комбінацій матеріалів вибираються оптимальні комбінації для кожного шару фотоперетворювача і вони використовуються для подальшого застосування у них.

3.2 Моделювання та чисельні методи в дослідженні багат шарових сонячних фотоперетворювачів

3.2.1 Розгляд моделей.

Розглянемо моделі та чисельні методи, які використовуються для теоретичного дослідження багат шарових сонячних фотоперетворювачів. Моделювання є важливою складовою досліджень у розробці нових матеріалів та оптимізації конструкцій сонячних елементів.

3.2.2 Моделі електронного перенесення.

Моделі електронного перенесення в багат шарових сонячних фотоперетворювачах дозволяють розуміти рух зарядів у внутрішніх шарах структури. Ці моделі базуються на рівняннях Пуассона та рівняннях переносу заряду, які допомагають визначити електронний струм та ефективність фотоперетворення.

Модель Пуассона-Нернста-Планка описує рух електронів та дірок у внутрішніх шарах фотоперетворювачах, враховуючи електричні та іонні градієнти. Рівняння Пуассона описують електричне поле у внутрішніх шарах, рівняння Нернста-Планка враховують рух електронів та дірок через інтерфейси та внутрішні шари, враховуючи концентраційні та температурні градієнти.

Модель динамічного збудження електронів враховує вплив світла на фотоперетворювачі та дозволяє моделювати динаміку збудження та рекомбінації електронів під впливом світла. Це важливо для вивчення ефективності абсорбції світла та конверсії фотонів у електричний струм.

Модель рекомбінації та тунелювання описує процеси рекомбінації, коли електрони та дірки знову зустрічаються і утворюють заряджені пари. Вона також враховує процеси тунелювання, коли заряджені частинки можуть проникнути через бар'єри між шарами. Це допомагає зрозуміти втрати заряду та ефективність фотоперетворювача.

Модель руху носіїв заряду в електричному полі описує рух електронів та дірок в електричному полі, що виникає внаслідок різниці потенціалів у внутрішніх шарах фотоперетворювача. Це важливо для розуміння процесів збудження, рекомбінації та перенесення заряду в системі.

Моделі електронного перенесення в багатошарових сонячних фотоперетворювачах грають ключову роль у розумінні фізичних процесів та допомагають оптимізувати конструкції фотоперетворювачів для досягнення найвищої ефективності. Ці моделі дозволяють вченим прогнозувати та аналізувати різні аспекти роботи фотоперетворювачів, що сприяє подальшому вдосконаленню та розвитку сонячних технологій.

3.2.3 Моделі оптичного відбиття та поглиблення.

Моделювання оптичних властивостей багатошарових сонячних фотоперетворювачів дозволяє оптимізувати дизайн для максимізації поглиблення світла в структурі та мінімізації втрат через відбиття. Це важливо для підвищення абсорбції світла та покращення ефективності фотоперетворення.

Моделі оптичного відбиття дозволяють визначити кількість світла, яке відбивається від поверхні фотоперетворювача. Це важливо для мінімізації втрат світла та максимізації абсорбції фотонів. Моделі враховують властивості поверхні, індекс рефракції матеріалів та кут падіння світла.

Моделі оптичного поглиблення вивчають, як світло проникає вглиб матеріалу фотоперетворювача і абсорбується в ньому. Це важливо для розуміння,

як ефективно світло перетворюється в електричний струм. Моделі враховують оптичні властивості матеріалів та глибину проникнення світла.

Моделі абсорбції та спектроскопії допомагають вивчати спектральні властивості абсорбції світла в різних шарах фотоперетворювача. Це дозволяє визначити, які ділянки спектра світла найефективніше абсорбуються та в яких шарах.

Моделі внутрішнього відбиття досліджують, як світло може утримуватися в структурі фотоперетворювача завдяки внутрішньому відбиттю в міжфазних інтерфейсах та шарах. Це може підвищити тривалість взаємодії світла з матеріалом та покращити ефективність фотоперетворення.

3.2.4 Моделі рекомбінації та дефектів.

Моделі рекомбінації та дослідження дефектів у багат шарових сонячних фотоперетворювачах дозволяють вивчати механізми втрати заряду та визначати шляхи їхнього уникнення. Це важливо для підвищення ефективності та стабільності фотоперетворювачів.

Моделі рекомбінації визначають шляхи, по яких носії заряду можуть рекомбінувати, тобто повертатися до нейтрального стану, втрачаючи свою енергію у вигляді фотону. Це може відбуватися через різні механізми, такі як рекомбінація внутрішніх рівнів, поверхнева рекомбінація та рекомбінація на дефектах.

Моделі дефектів вивчають вплив дефектів у матеріалі на процеси перенесення та рекомбінації носіїв заряду. Дефекти можуть бути різних типів, включаючи вакансії, міжшарові дефекти, дефекти в оксидних шарах тощо. Моделюючи взаємодію носіїв заряду з цими дефектами, можна розуміти, як ці дефекти впливають на ефективність фотоперетворювача.

Моделі рекомбінації на межі зерен вивчають вплив межі між кристалічними зернами на рекомбінацію носіїв заряду. Це важливо для матеріалів, які мають полікристалічну структуру. Рекомбінація на межі зерен може стати суттєвим фактором втрати заряду у фотоперетворювачах.

Моделі впливу радіації вивчають, як радіаційні ураження можуть створити дефекти у матеріалі та впливати на його ефективність. Це важливо для розуміння стійкості фотоперетворювачів до впливу навколишнього середовища та довгострокової стабільності їхньої роботи.

3.2.5 Чисельні методи та симуляції.

Чисельні методи, такі як метод скінчених елементів (FEM) та метод Монте-Карло, використовуються для чисельного розв'язання складних рівнянь, які описують фізичні процеси у багат шарових сонячних фотоперетворювачах. Ці методи дозволяють проводити великі та деталізовані симуляції, які допомагають визначити оптимальні параметри структури для досягнення найвищої ефективності.

Метод скінчених елементів використовується для чисельного розв'язання рівнянь, що описують фізичні процеси у багат шарових сонячних фотоперетворювачах. Він дозволяє моделювати рух носіїв заряду, рекомбінацію, абсорбцію світла та інші явища у різних шарах структури.

Метод Монте-Карло використовується для моделювання випадкових процесів, таких як розсіювання та рекомбінація носіїв заряду. Цей метод дозволяє вивчати вплив стохастичних явищ на роботу фотоперетворювачів та робити прогнози їхньої ефективності.

Різні методи оптимізації, такі як генетичні алгоритми, імітаційне огородження та алгоритми з врахуванням обмежень, використовуються для підбору оптимальних параметрів конструкції фотоперетворювача. Ці методи дозволяють знайти найбільш ефективні рішення за заданими критеріями оптимізації.

Методи розрахунку втрат враховують різноманітні механізми, такі як рекомбінація та відбиття, які призводять до втрати носіїв заряду. Ці методи дозволяють визначити вплив різних факторів на загальну ефективність фотоперетворювача.

3.3 Загальні напрямки новітніх досліджень

Існує декілька основних напрямків розвитку покращення характеристик багатошарових СЕ:

- "Використання Перовскітів для Покращення Ефективності."

Дослідження з використанням перовскітів у структурах багатошарових сонячних фотоперетворювачів, таких як $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, для збільшення фотогенерації струму та підвищення квантового виходу.

- "Наноструктури для Підвищення Поглинання Світла".

Дослідження з використанням наноструктур для покращення поглинання світла у різних шарах фотоперетворювача для підвищення фотостабільності та ефективності пристрою.

- "Молекулярне Самозбудження для Покращення Кінетики".

Дослідження з використанням молекулярного самозбудження для створення ефективних контактів між шарами фотоперетворювача для підвищення швидкості збору фотоненесення.

- "Інтеграція Фотоперетворювачів у Гнучкі Пристрої".

Дослідження, яке досліджує можливості інтеграції багатошарових фотоперетворювачів у гнучкі пристрої для створення нових енергоефективних технологій.

- "Роль Дефектів у Ефективності Фотоперетворювачів."

Дослідження, що вивчає вплив та роль дефектів у структурах фотоперетворювачів на їхню ефективність та стабільність.

"Наноструктури для підвищення поглинання світла" є важливою галуззю досліджень у сфері фотовольтаїки, оскільки вони дозволяють поліпшити поглинання та ефективність сонячних фотоперетворювачів. Використання наноструктур дозволяє ефективніше ухоплювати фотони, збільшуючи площу поглинання світла та покращуючи квантовий вихід.

Основні аспекти досліджень у цій області включають:

- структурні зміни: Дослідження нових структур, які мають оптимальні розміри та форми для максимального поглинання світла. Це можуть бути нанодроти, нанокристали, нанотрубки або інші наноструктури з властивостями, що підвищують поглинання світла у різних діапазонах довжин хвиль;
- ефективність поглинання: Дослідження оптимальних матеріалів для наноструктур, які мають високу ефективність поглинання світла від інфрачервоного до видимого та ультрафіолетового спектрів;
- покращення квантового виходу: Дослідження ефектів, які дозволяють збільшити кількість електрон-діркових пар, утворених за одну одиницю поглинутого фотону, що підвищує квантовий вихід;
- управління оптичними властивостями: Дослідження та управління оптичними властивостями наноструктур для досягнення певних спектральних характеристик, підвищення поглинання світла та мінімізації втрат;
- інтеграція в сонячні панелі: Вивчення методів інтеграції наноструктур у сонячні панелі для підвищення ефективності фотоперетворювачів без значного збільшення їхньої товщини чи масштабу виробництва.

Ці напрямки досліджень є ключовими для подальшого покращення ефективності та продуктивності сонячних фотоперетворювачів, сприяючи розвитку більш ефективних та стабільних сонячних енергетичних систем.

4 РОЗРАХУНКИ ТАНДЕМНОГО СОНЯЧНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА

4.1 Параметри активного шару ПЕДОТ:ПСС

Полі-3,4-етилендіоксітіофен-полістирол сульфонат, хімічна структура якого представлена на рис. 2.1, являє собою полімерний електроліт, що складається з позитивно зарядженого полімеру (ПЕДОТ) і негативно зарядженої поверхнево-активної речовини - аніонного сурфактанта – полістиренсульфонові кислоти (ПСС), яка допомагає диспергувати і стабілізувати ПЕДОТ у воді та інших розчинниках [10]. ПЕДОТ:ПСС є найбільш успішним полімерним матеріалом при практичному застосуванні. ПЕДОТ:ПСС – це зазвичай від 1,3 до 3 % розчин у воді що не містить інших добавок. Він має дуже обмежене розтікання та адгезію. Для досягнення кращої електричної провідності ПЕДОТ:ПСС необхідно додати до нього 5 % органічного розчинника, такого як диметилсульфоксид (ДМСО). Це справедливо для будь-якого ПЕДОТ:ПСС.

ПЕДОТ належить до класу заміщених політіофенів і є прикладом хорошого електрохромного матеріалу. Електропровідність окислених політіофенів відома майже 40 років. Витоки цієї провідності обумовлені наявністю радикальних станів, які утворюються при окисненні тіофенових одиниць [11,12]. Ці редуковані стани делокалізуються в полімерному ланцюзі, і в присутності окиснювача ці радикалізовані стани можуть бути стабілізовані. У ПЕДОТ:ПСС, власне ПЕДОТ окиснюється під час реакції полімеризації з полістиролсульфонатом. При цьому утворюється емульсія, коли присутній ПСС стабілізує радикальні стани ПЕДОТ. Хоча ПЕДОТ сам по собі провідний, ПСС, присутній у суміші, є ізолюючим. Отже, кількість ПСС та мікроструктура плівки мають істотний вплив на електричні властивості ПЕДОТ:ПСС. У водній суспензії ПЕДОТ:ПСС утворює міцелеву структуру, в якій гідрофобне ядро ПЕДОТ оточене оболонкою гідрофільної ПСС. Під час осадження ця структура зберігається, утворюючи локалізовані ділянки провідного ПЕДОТ, які оточені ізоляційними ділянками

ПСС. Саме ця структура серцевинної оболонки призводить до низьких значень електропровідності, які можуть виникнути для стандартних рецептур ПЕДОТ:ПСС. Оскільки робота виходу є характеристикою поверхні матеріалу, то робота виходу суміші ПЕДОТ:ПСС визначатиметься відсотком кожного компонента на поверхні плівки. ПСС має значно більшу роботу виходу, ніж ПЕДОТ, тому присутність ПСС на поверхні призведе до більшої роботи виходу. Це означає, що для рецептур з більш високими відсотками ПСС робота виходу буде вищою, ніж для тих, що мають менші відсотки. Окрім того, обробка плівки ПЕДОТ:ПСС може призвести до зміни величини роботи виходу. ПЕДОТ:ПСС утворює структуру основної оболонки, в результаті чого ПЕДОТ оточується ПСС. У цьому випадку в роботі виходу буде домінувати ПСС. Якщо плівку обробити таким чином, що компоненти будуть більш однорідно дисперговані, робота виходу стане меншою оскільки поверхня стане багатшою за рахунок ПЕДОТ. [13, 14] Матеріали на основі ПЕДОТ мають ширину забороненої зони меншу, ніж у незаміщеного політіофену та алкіл заміщених політіофенів завдяки наявності електронно- 416 донорних атомів кисню по сусідству з тіофеновим кільцем. Як було показано в, ширина забороненої зони ПЕДОТ складає приблизно від 1,6 до 1,7 еВ, що помітно менше, ніж у незаміщеного політіофену, що призводить до зсуву максимуму основної смуги поглинання в червону область спектру.

Шорсткість поверхні плівки ПЕДОТ:ПСС, як правило, менше 5 нм (залежність від технології осадження). У діапазоні видимого світла тонка плівка ПЕДОТ:ПСС майже прозора. Наприклад, шар товщиною 100 нм може демонструвати коефіцієнт пропускання (Т) вище 90 % при 550 нм. ПЕДОТ:ПСС притаманний широкий діапазон електропровідності від 10^{-2} См/см до 10^{-3} См/см, що залежать від умов синтезу, добавок або пост-обробки. Плівки ПЕДОТ:ПСС мають високе значення роботи виходу від 5,0еВ до 5,2 еВ. Висока провідність і висока робота виходу можуть часто викликати спонтанне перенесення заряду з високою швидкістю, що забезпечує ПЕДОТ:ПСС каталітичні властивості. Окрім того ПЕДОТ:ПСС має гарну фото- і електричну стабільність на повітрі. Перенесення заряду в провідному полімері ПЕДОТ відбувається по системі

спряжених зв'язків за рахунок електронно-обмінних реакцій між сусідніми редокс-місцями (між фрагментами полімеру, на яких делокалізуються електрон або дірка) і супроводжується рухом аніонів-допантів вздовж полімерного ланцюга.

4.2 Розрахунки характеристик та параметрів фотоперетворювача

На рисунках 4.2-4.3 зображено розрахунок структури та матеріалів активної частини фотоперетворювача в програмному забезпеченні OghmaNano.

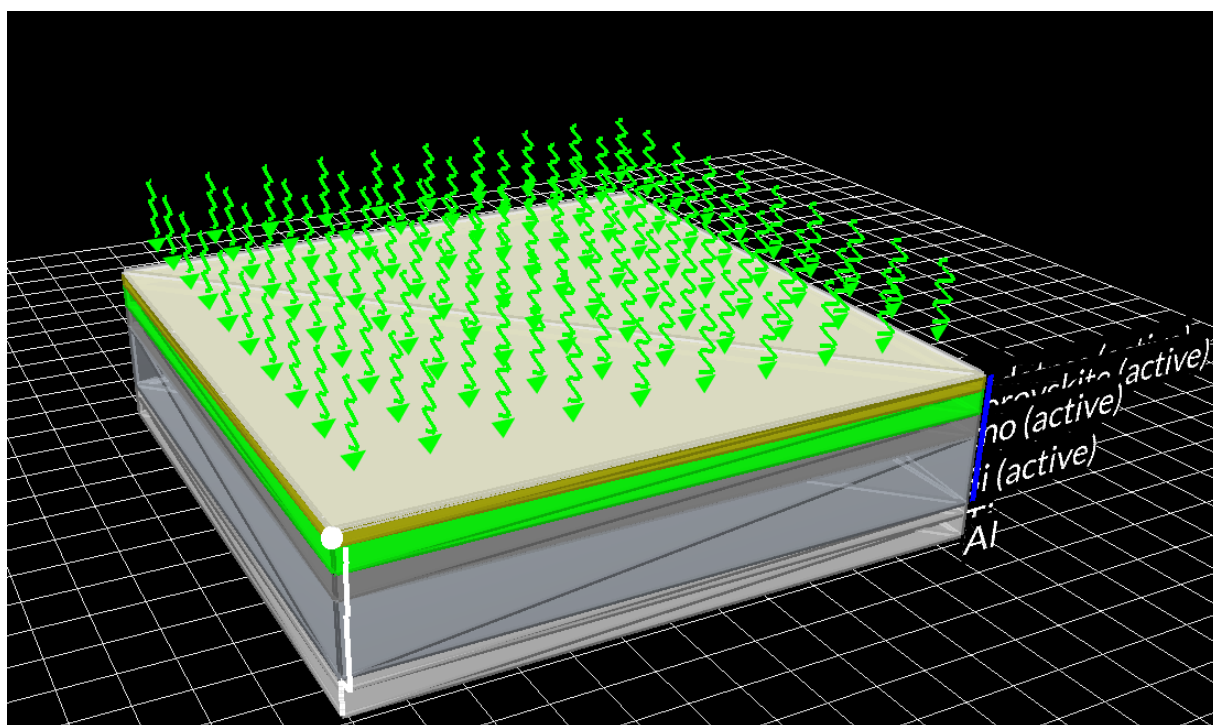
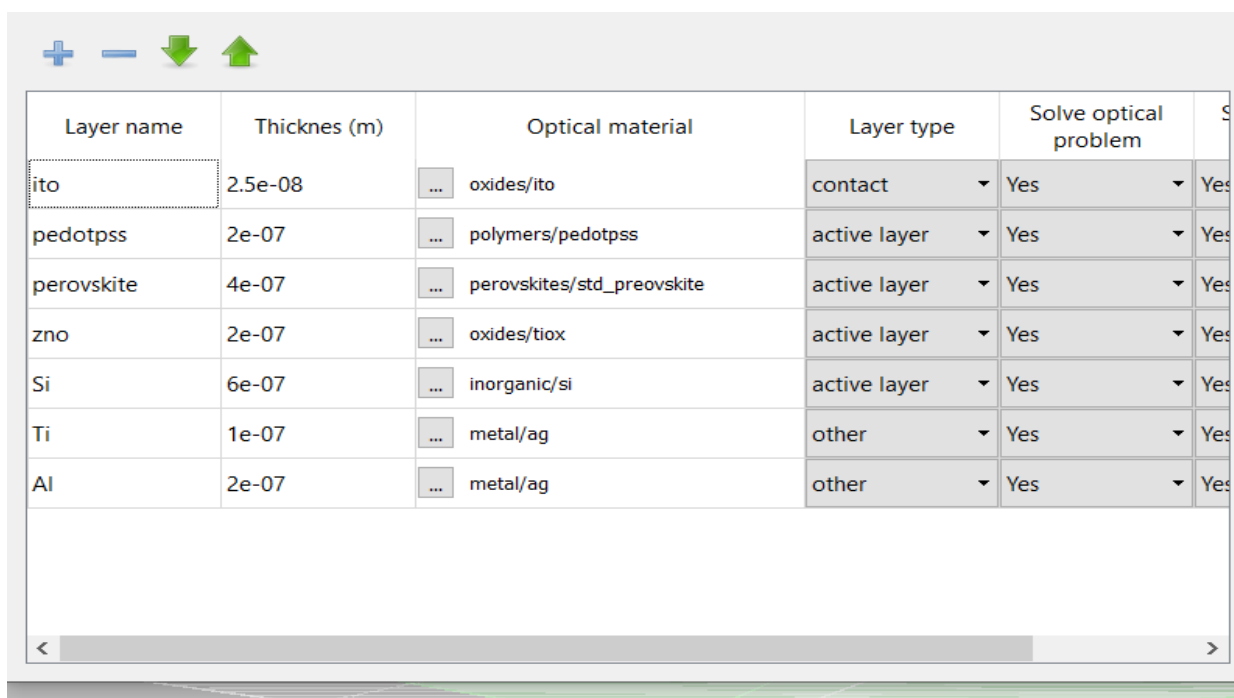


Рисунок 4.2 - Структура активної частини фотоперетворювача



Layer name	Thicknes (m)	Optical material	Layer type	Solve optical problem	S
ito	2.5e-08	oxides/ito	contact	Yes	Yes
pedotpss	2e-07	polymers/pedotpss	active layer	Yes	Yes
perovskite	4e-07	perovskites/std_preovskite	active layer	Yes	Yes
zno	2e-07	oxides/tiox	active layer	Yes	Yes
Si	6e-07	inorganic/si	active layer	Yes	Yes
Ti	1e-07	metal/ag	other	Yes	Yes
Al	2e-07	metal/ag	other	Yes	Yes

Рисунок 4.3 - Структура та матеріал активних шарів

На рисунках 4.4-4.5 зображено структуру та матеріали верхнього та нижнього контактів, електрофізичні параметри 1-го активного шару.

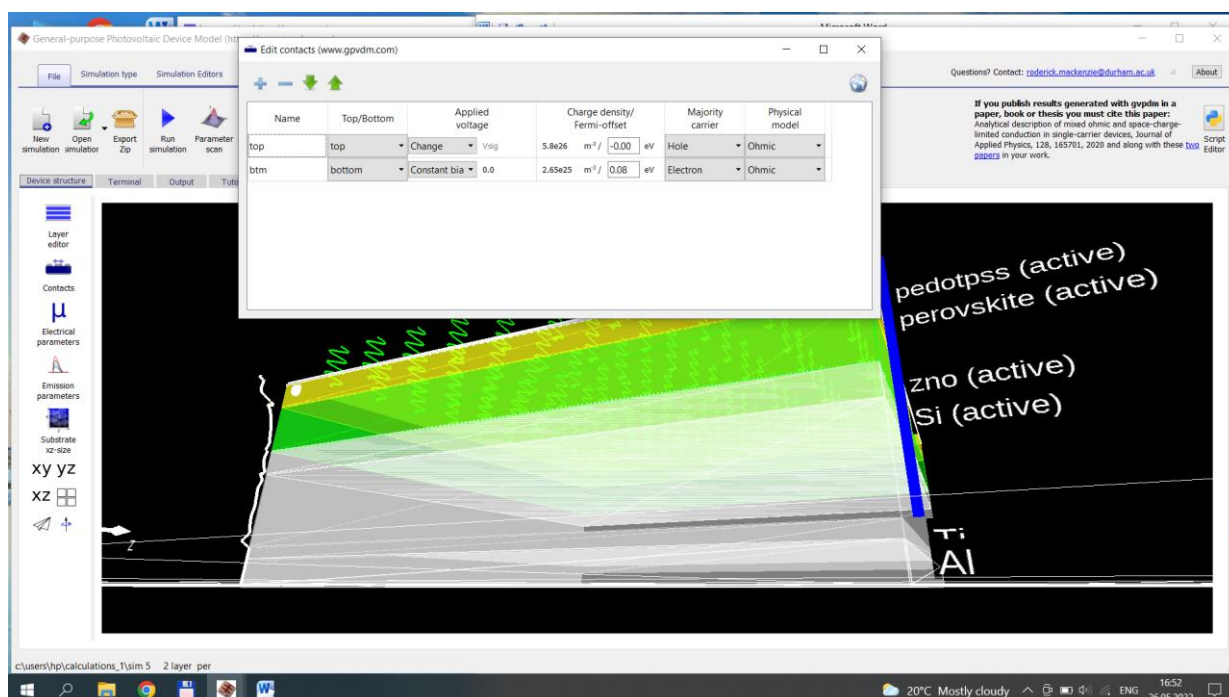


Рисунок 4.4 - Структура та матеріали контактів (верхнього та нижнього)

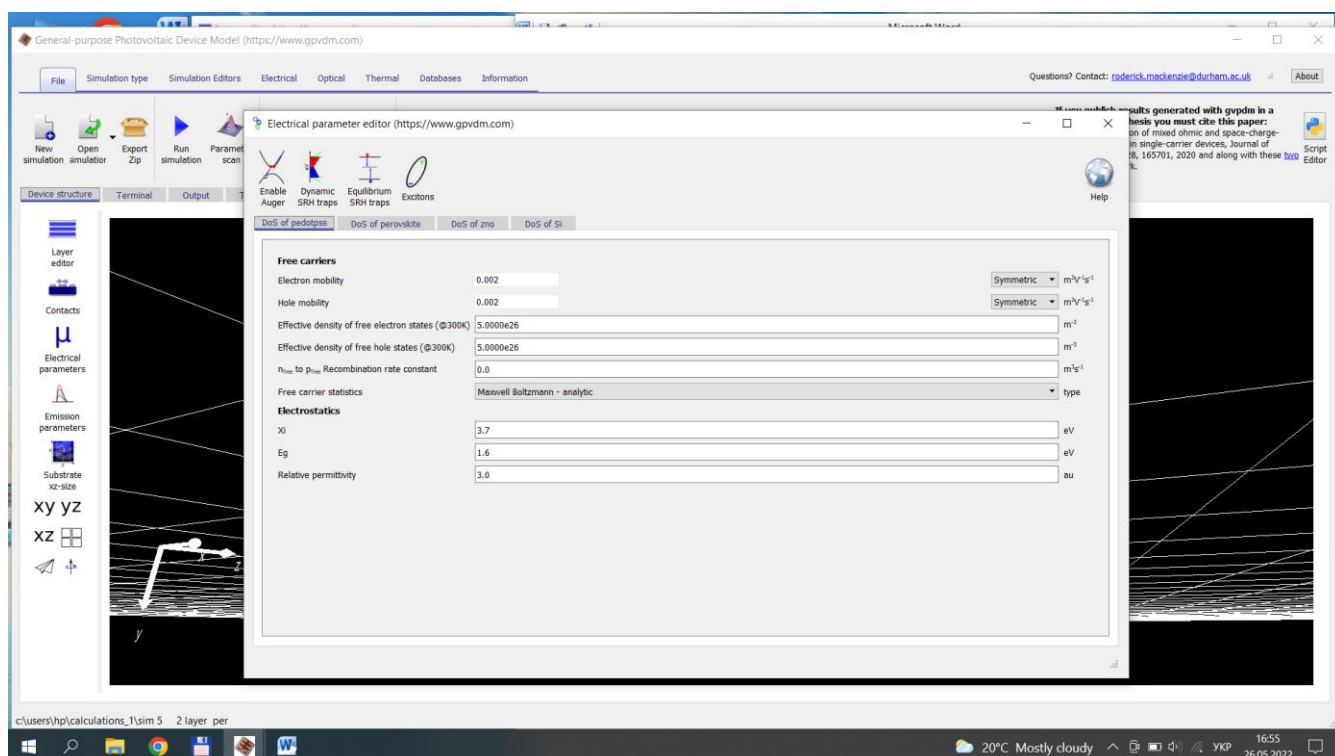


Рисунок 4.5 - Електрофізичні параметри 1-го активного шару

На рисунках 4.6, 4.7, 4.8 наведені електрофізичні параметри 2-го, 3-го, та 4-го активних шарів.

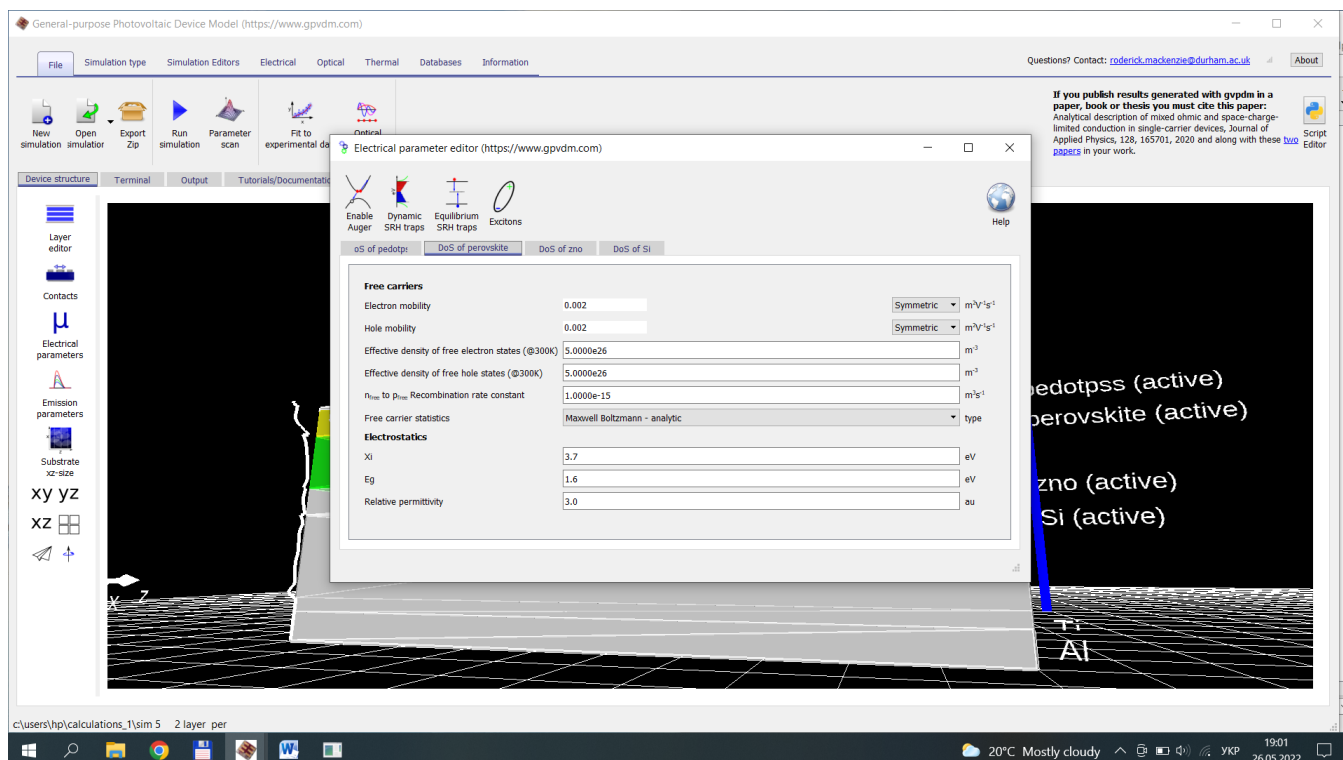


Рисунок 4.6 - Електрофізичні параметри 2-го активного шару

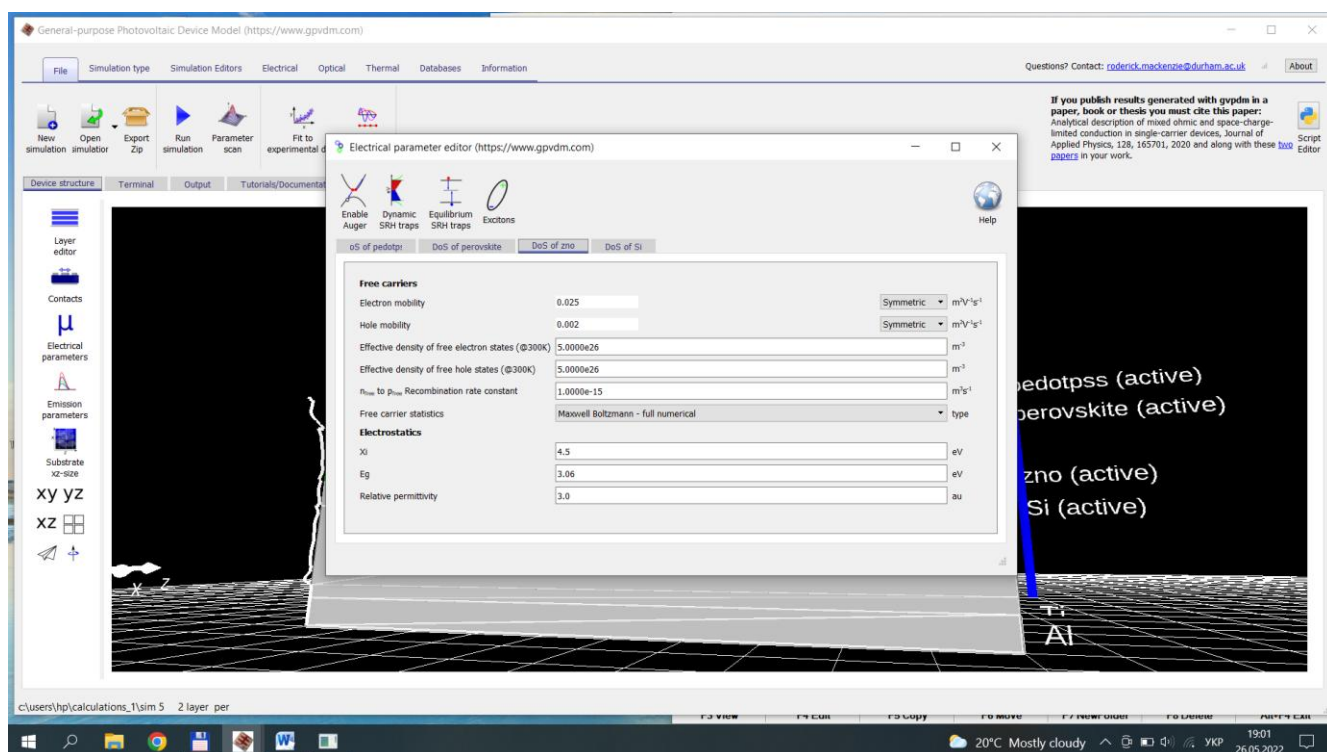


Рисунок 4.7 - Електрофізичні параметри 3-го активного шару

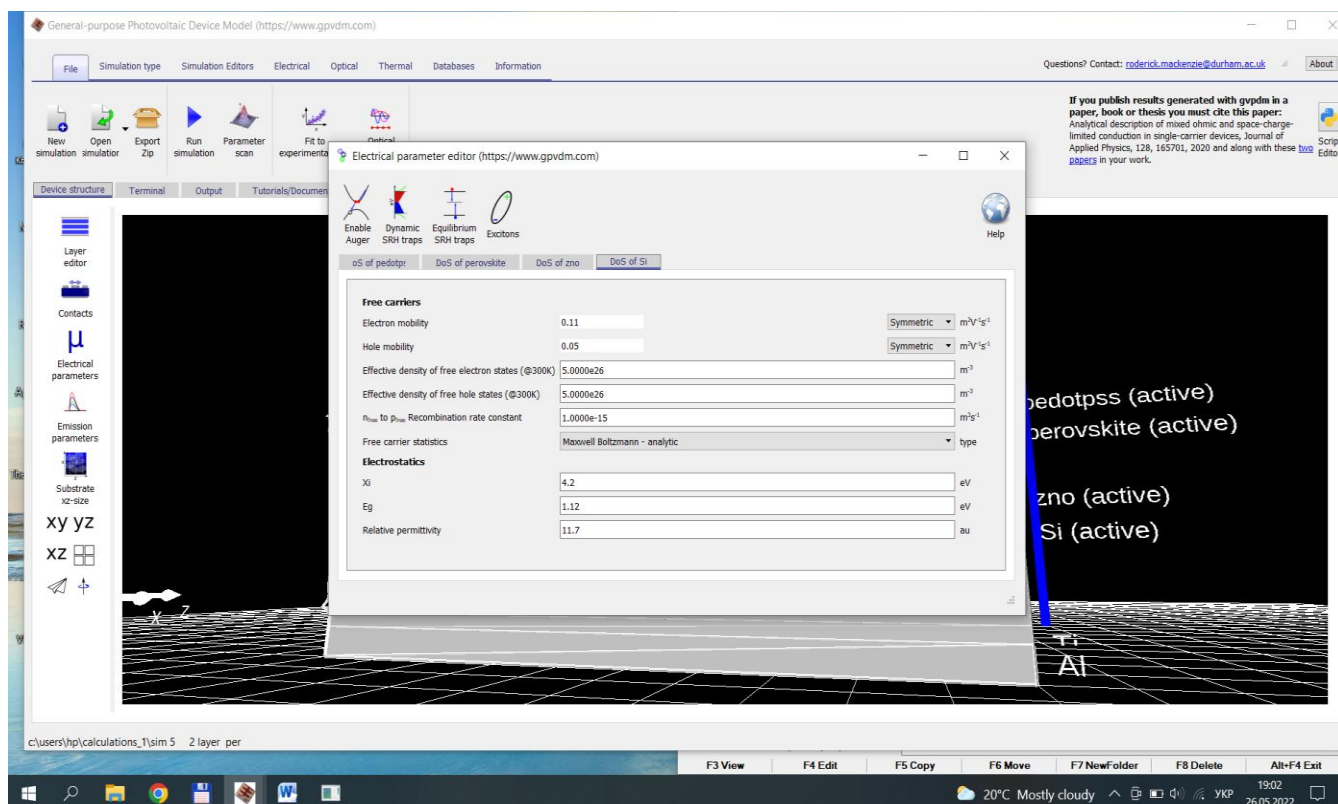


Рисунок 4.8- Електрофізичні параметри 4-го активного шару

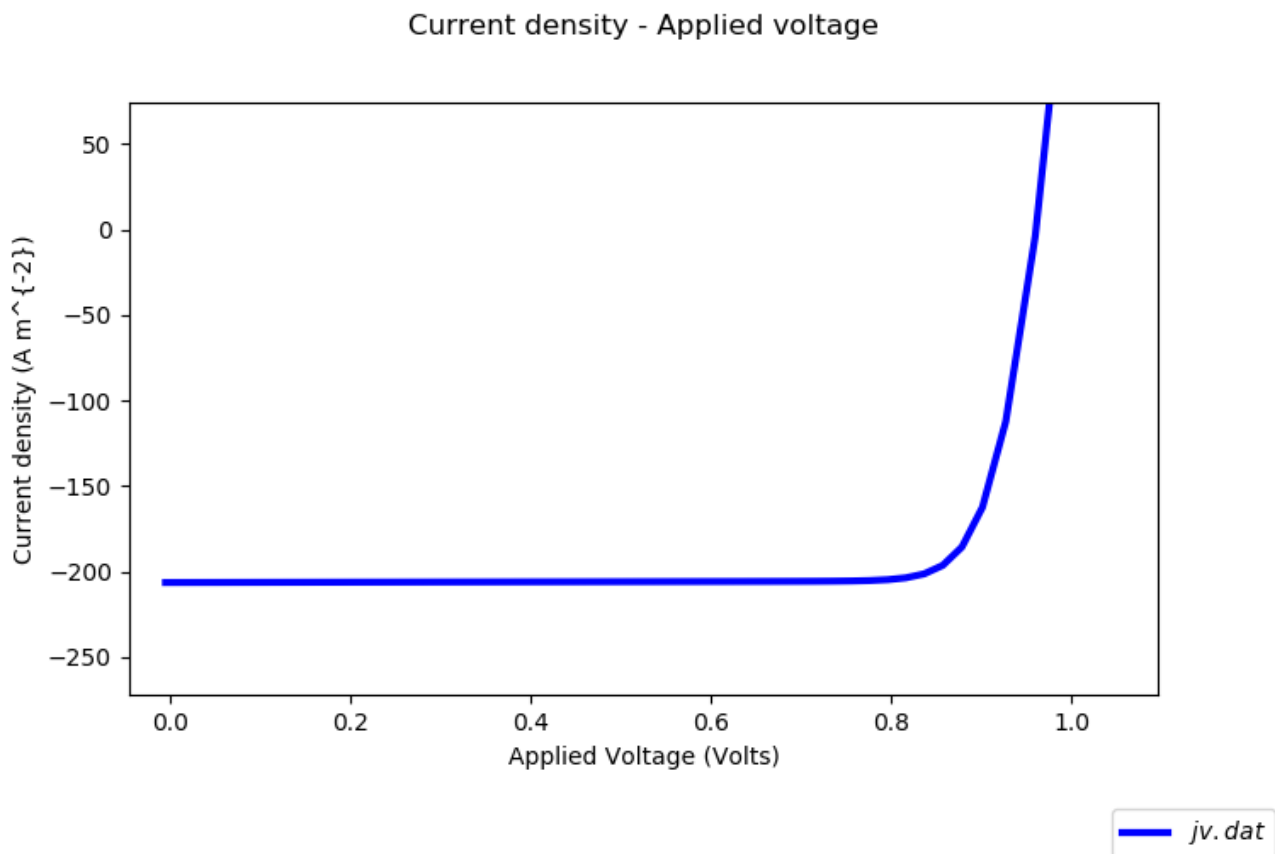


Рисунок 4.9 - Вольтамперна характеристика фотоперетворювача з активними шаром 200 400 200 600 нм

На рисунках 4.10-4.11 наведені вихідні параметри розрахунків:

$V_{oc}(\text{холостого ходу}) = 0,908256 \text{ В}$

Максимальна потужність $P = 93,07105 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$

Ємність пристрою $C = 1,138405 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$

Напруга максимальної потужності $V = 8,064979 \cdot 10^{-1} \text{ В}$

ККД = 9.3%

Вільні дірки при $V_{oc} = 1,003494 \cdot 10^{21}$

Вільні електрони при $V_{oc} = 9,706970 \cdot 10^{20}$

Рухливість електронів $\mu(\text{при } P_{\max}) = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

Рухливість дірок $\mu(\text{при } P_{\max}) = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

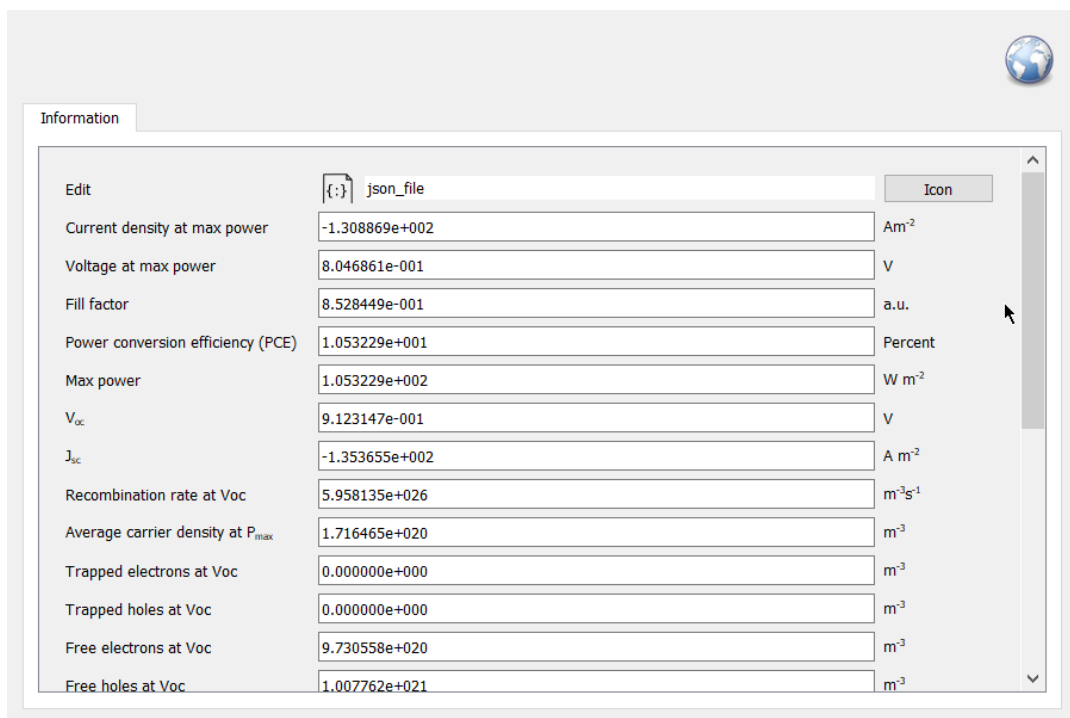
Information		
Edit	{:} json_file	Icor
Current density at max power	-1.154015e+002	Am^{-2}
Voltage at max power	8.064979e-001	V
Fill factor	8.541761e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	9.307105e+000	Percent
Max power	9.307105e+001	W m^{-2}
V_{oc}	9.082564e-001	V
J_{sc}	-1.199661e+002	A m^{-2}
Recombination rate at V_{oc}	5.134857e+026	$\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$
Average carrier density at P_{max}	1.679249e+020	m^{-3}
Trapped electrons at V_{oc}	0.000000e+000	m^{-3}
Trapped holes at V_{oc}	0.000000e+000	m^{-3}
Free electrons at V_{oc}	9.706970e+020	m^{-3}
Free holes at V_{oc}	1.003494e+021	m^{-3}

Рисунок 4.10 - Вихідні параметри фотоперетворювача ч. 1

Information		
Free electrons at V_{oc}	9.706970e+020	m^{-3}
Free holes at V_{oc}	1.003494e+021	m^{-3}
V_{bi}	1.527898e+000	V
Total carriers $(n+p)/2$ at V_{oc}	9.870957e+020	m^{-3}
Average mobility as J_{sc}	1.600000e-003	$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Average mobility at P_{max}	1.600000e-003	$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Average mobility at V_{oc}	1.600000e-003	$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Electron mobility at P_{max}	1.600000e-003	$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Hole mobility at P_{max}	1.600000e-003	$\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Recombination time constant at V_{oc}	1.586052e-006	s
Recombination time constant	1.011699e-005	s
Θ_{SRH} - free P_{max}	2.711283e-005	au
Θ_{SRH} - free-trap P_{max}	2.425045e-005	au
Device capacitance	1.138405e-010	F

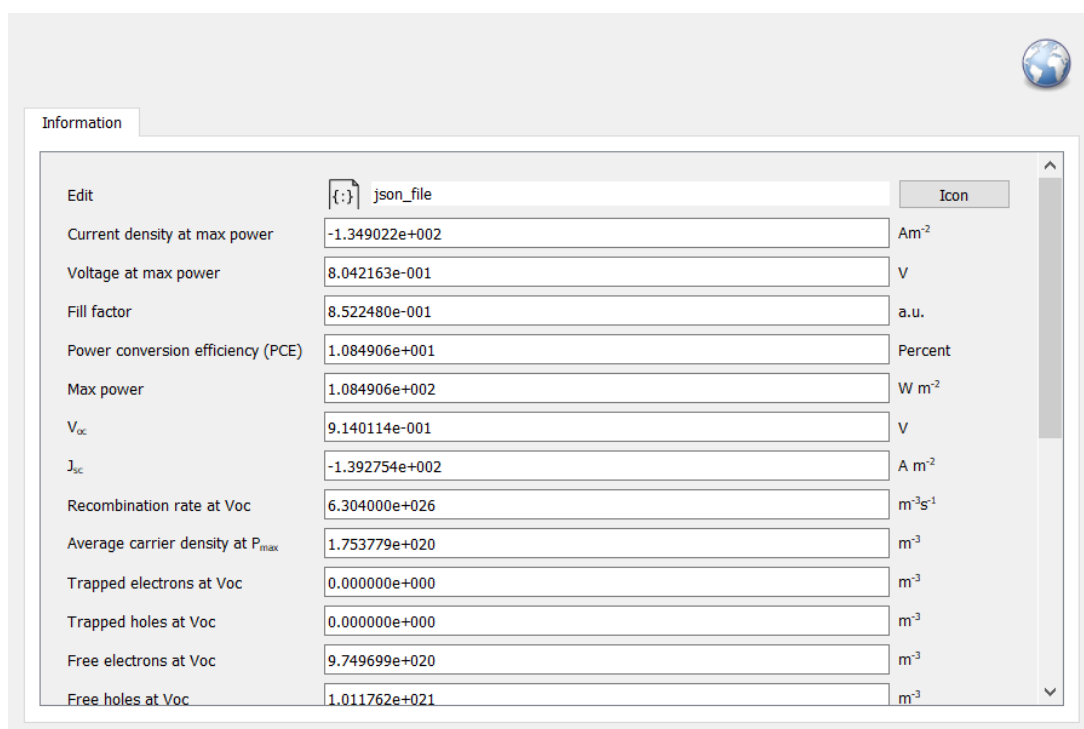
Рисунок 4.11 - Вихідні параметри фотоперетворювача ч. 2

Зменшимо товщину Perovskite на 10% та розрахуємо вихідні параметри:



Parameter	Value	Unit
Edit	{:} json_file	Icon
Current density at max power	-1.308869e+002	A m ⁻²
Voltage at max power	8.046861e-001	V
Fill factor	8.528449e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	1.053229e+001	Percent
Max power	1.053229e+002	W m ⁻²
V _{oc}	9.123147e-001	V
J _{sc}	-1.353655e+002	A m ⁻²
Recombination rate at Voc	5.958135e+026	m ⁻³ s ⁻¹
Average carrier density at P _{max}	1.716465e+020	m ⁻³
Trapped electrons at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Trapped holes at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Free electrons at Voc	9.730558e+020	m ⁻³
Free holes at Voc	1.007762e+021	m ⁻³

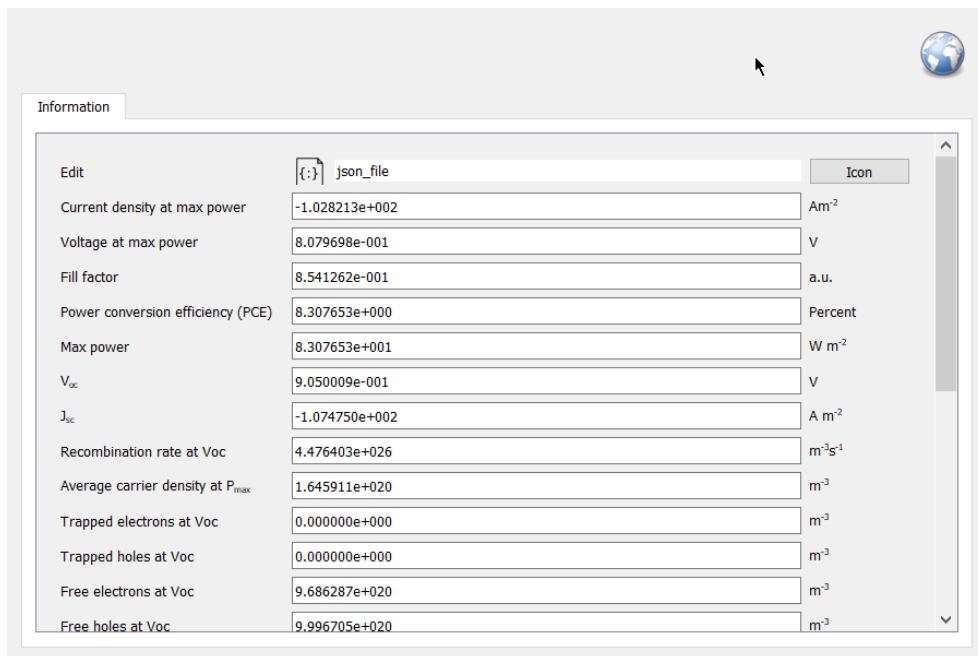
Рисунок 4.12 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Perovskite 360nm



Parameter	Value	Unit
Edit	{:} json_file	Icon
Current density at max power	-1.349022e+002	A m ⁻²
Voltage at max power	8.042163e-001	V
Fill factor	8.522480e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	1.084906e+001	Percent
Max power	1.084906e+002	W m ⁻²
V _{oc}	9.140114e-001	V
J _{sc}	-1.392754e+002	A m ⁻²
Recombination rate at Voc	6.304000e+026	m ⁻³ s ⁻¹
Average carrier density at P _{max}	1.753779e+020	m ⁻³
Trapped electrons at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Trapped holes at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Free electrons at Voc	9.749699e+020	m ⁻³
Free holes at Voc	1.011762e+021	m ⁻³

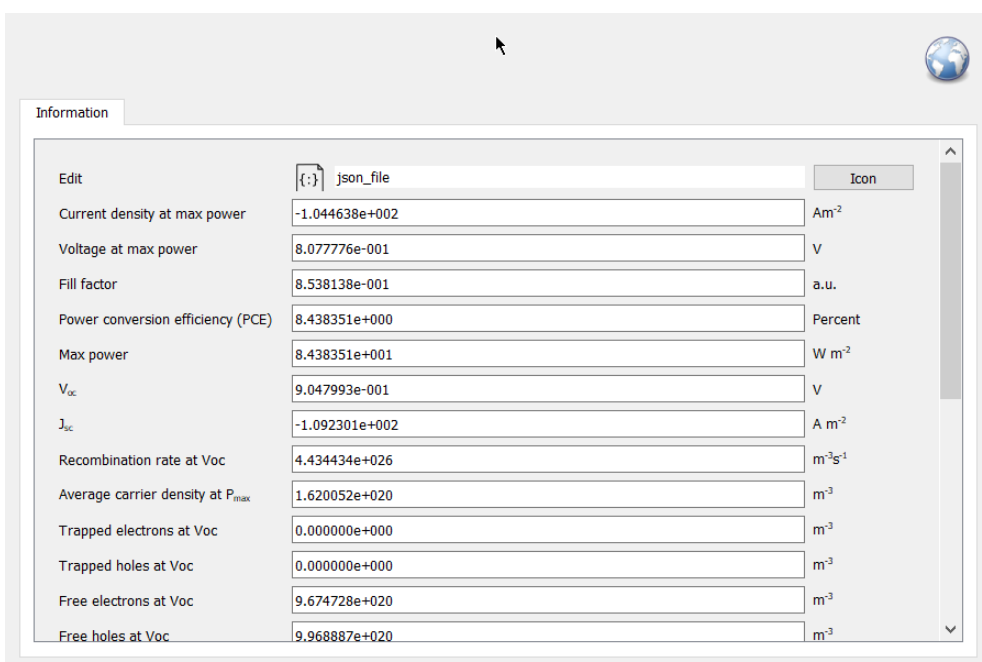
Рисунок 4.13 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Perovskite 320nm

При зменшенні шару Perovskite незначно збільшились параметри максимальної потужності, ємності та напруги холостого ходу. Збільшимо товщину шару на 10%:



Edit	json_file	Icon
Current density at max power	-1.028213e+002	A m ⁻²
Voltage at max power	8.079698e-001	V
Fill factor	8.541262e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	8.307653e+000	Percent
Max power	8.307653e+001	W m ⁻²
V _{oc}	9.050009e-001	V
J _{sc}	-1.074750e+002	A m ⁻²
Recombination rate at Voc	4.476403e+026	m ⁻³ s ⁻¹
Average carrier density at P _{max}	1.645911e+020	m ⁻³
Trapped electrons at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Trapped holes at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Free electrons at Voc	9.686287e+020	m ⁻³
Free holes at Voc	9.996705e+020	m ⁻³

Рисунок 4.14 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Perovskite 440nm

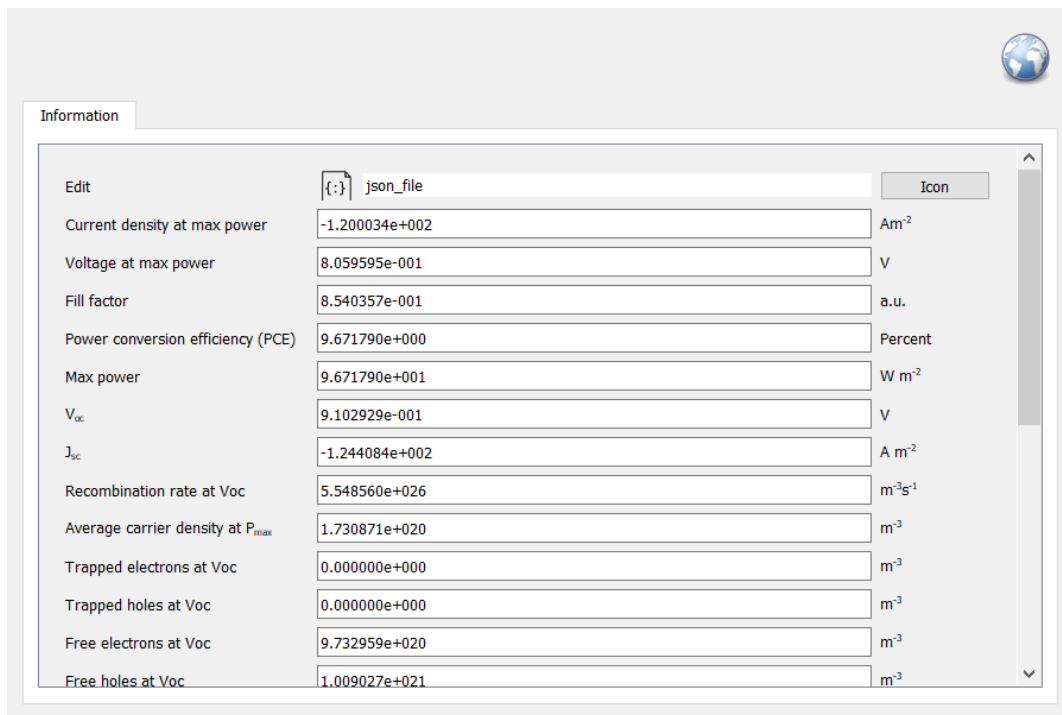


Edit	json_file	Icon
Current density at max power	-1.044638e+002	A m ⁻²
Voltage at max power	8.077776e-001	V
Fill factor	8.538138e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	8.438351e+000	Percent
Max power	8.438351e+001	W m ⁻²
V _{oc}	9.047993e-001	V
J _{sc}	-1.092301e+002	A m ⁻²
Recombination rate at Voc	4.434434e+026	m ⁻³ s ⁻¹
Average carrier density at P _{max}	1.620052e+020	m ⁻³
Trapped electrons at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Trapped holes at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Free electrons at Voc	9.674728e+020	m ⁻³
Free holes at Voc	9.968887e+020	m ⁻³

Рисунок 4.15 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Perovskite 480nm

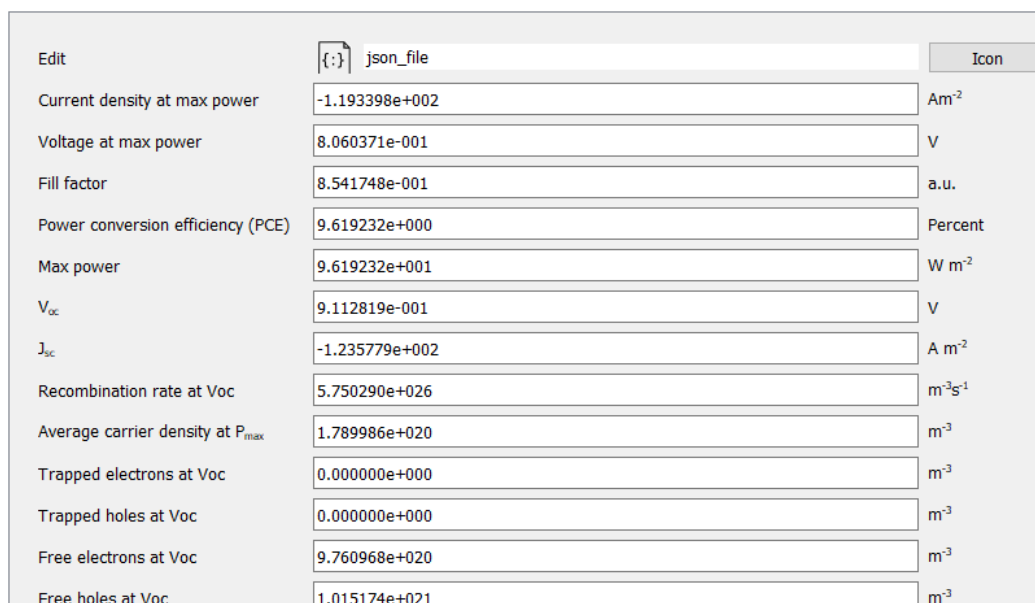
При збільшенні шару Perovskite зменшуються параметри максимальної потужності, ємності та напруги холостого ходу.

Зменшимо товщину шару Si на 10%:



Edit	json_file	Icon
Current density at max power	-1.200034e+002	Am ⁻²
Voltage at max power	8.059595e-001	V
Fill factor	8.540357e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	9.671790e+000	Percent
Max power	9.671790e+001	W m ⁻²
V _{oc}	9.102929e-001	V
J _{sc}	-1.244084e+002	A m ⁻²
Recombination rate at Voc	5.548560e+026	m ⁻³ s ⁻¹
Average carrier density at P _{max}	1.730871e+020	m ⁻³
Trapped electrons at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Trapped holes at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Free electrons at Voc	9.732959e+020	m ⁻³
Free holes at Voc	1.009027e+021	m ⁻³

Рисунок 4.16 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Si 540nm



Edit	json_file	Icon
Current density at max power	-1.193398e+002	Am ⁻²
Voltage at max power	8.060371e-001	V
Fill factor	8.541748e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	9.619232e+000	Percent
Max power	9.619232e+001	W m ⁻²
V _{oc}	9.112819e-001	V
J _{sc}	-1.235779e+002	A m ⁻²
Recombination rate at Voc	5.750290e+026	m ⁻³ s ⁻¹
Average carrier density at P _{max}	1.789986e+020	m ⁻³
Trapped electrons at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Trapped holes at Voc	0.000000e+000	m ⁻³
Free electrons at Voc	9.760968e+020	m ⁻³
Free holes at Voc	1.015174e+021	m ⁻³

Рисунок 4.17 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Si 480nm

При зменшенні шару Si збільшується максимальної потужності, ємності та зменшується напруги холостого ходу, та напруга при максимальній потужності. Збільшимо товщину шару на 10%:

Edit	 json_file	Icon
Current density at max power	-1.141852e+002	A m^{-2}
Voltage at max power	8.066402e-001	V
Fill factor	8.539023e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	9.210636e+000	Percent
Max power	9.210636e+001	W m^{-2}
V_{oc}	9.070664e-001	V
J_{sc}	-1.189165e+002	A m^{-2}
Recombination rate at V_{oc}	4.893204e+026	$\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$
Average carrier density at P_{max}	1.636217e+020	m^{-3}
Trapped electrons at V_{oc}	0.000000e+000	m^{-3}
Trapped holes at V_{oc}	0.000000e+000	m^{-3}
Free electrons at V_{oc}	9.686662e+020	m^{-3}
Free holes at V_{oc}	9.988749e+020	m^{-3}

Рисунок 4.18 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Si 660nm

Edit	 json_file	Icon
Current density at max power	-1.096063e+002	A m^{-2}
Voltage at max power	8.071760e-001	V
Fill factor	8.535175e-001	a.u.
Power conversion efficiency (PCE)	8.847156e+000	Percent
Max power	8.847156e+001	W m^{-2}
V_{oc}	9.052943e-001	V
J_{sc}	-1.144989e+002	A m^{-2}
Recombination rate at V_{oc}	4.534638e+026	$\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$
Average carrier density at P_{max}	1.598372e+020	m^{-3}
Trapped electrons at V_{oc}	0.000000e+000	m^{-3}
Trapped holes at V_{oc}	0.000000e+000	m^{-3}
Free electrons at V_{oc}	9.667213e+020	m^{-3}
Free holes at V_{oc}	9.946367e+020	m^{-3}

Рисунок 4.19 - Вихідні параметри фотоперетворювача при Si 720nm

При збільшенні шару Si спостерігається падіння всіх основних вихідних характеристик.

4.3 Аналіз результатів

Побудуємо таблиці залежності вихідної потужності від товщини шару, та побудуємо графіки за отриманими даними:

Perovskite			Si	
nm	W·m ²		nm	W·m ²
320	108,49		480	96,19
360	105,32		540	96,71
400	93,07		600	93,07
440	83,07		660	92,1
480	81,38		720	88,47

Рисунок 4.20 – Залежність потужності від товщини шару

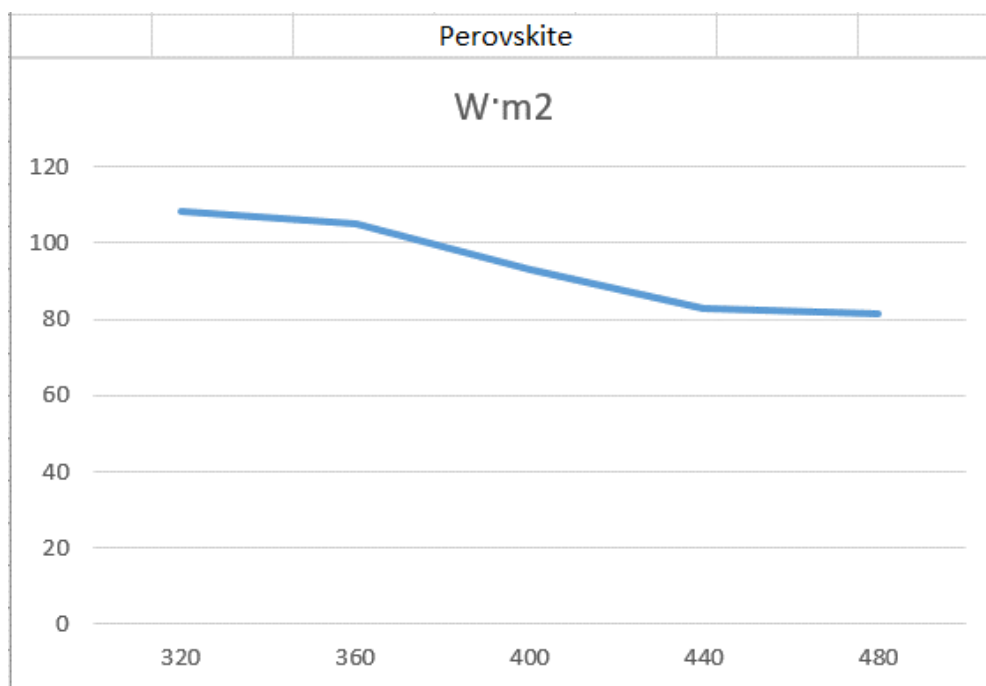


Рисунок 4.21 – Графік залежності для Perovskite

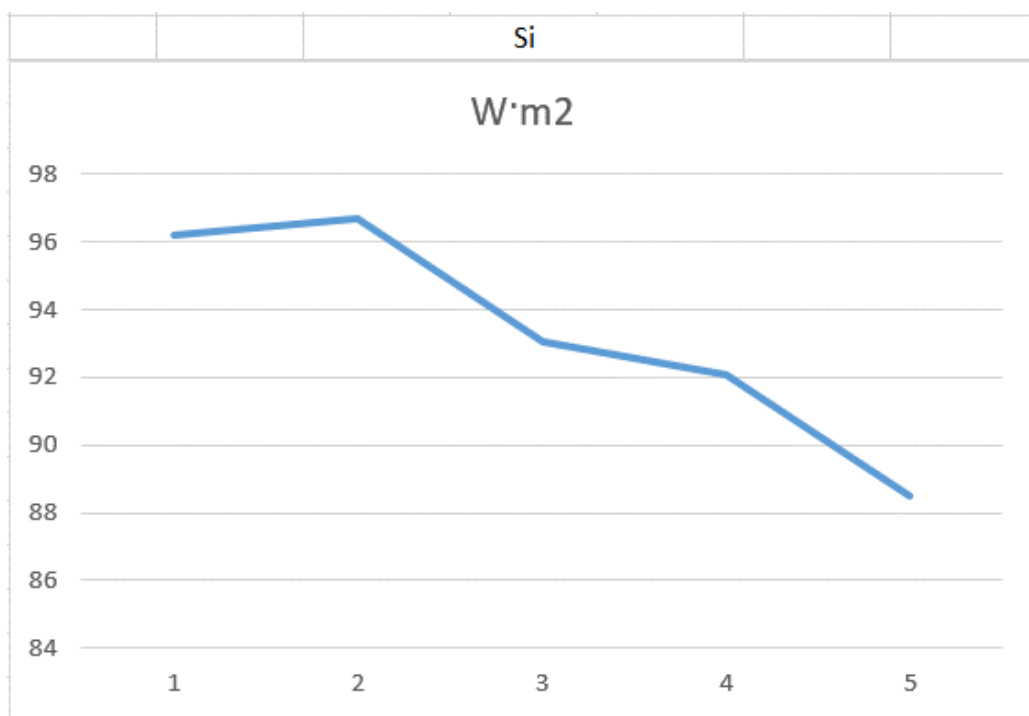


Рисунок 4.22 – Графік залежності для Si

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розглянуто принцип роботи тандемних сонячних фотоперетворювачів, способи підвищення ККД, та їх основні властивості, характеристики і матеріали.

Застосування ПЕДОТ:ПСС в тандемних СЕ: ПЕДОТ:ПСС є найбільш успішним полімерним матеріалом при практичному застосуванні. ПЕДОТ:ПСС – 1,3 – 3 % розчин у воді що не містить інших добавок. Він має дуже обмежене розтікання та адгезію. Для досягнення кращої електричної провідності ПЕДОТ:ПСС необхідно додати до нього 5 % органічного розчинника, такого як диметилсульфоксид (ДМСО). Це справедливо для будь-якого ПЕДОТ:ПСС.

Висока провідність і висока робота виходу можуть часто викликати спонтанне перенесення заряду з високою швидкістю, що забезпечує ПЕДОТ:ПСС каталітичні властивості. Окрім того ПЕДОТ:ПСС має гарну фото- і електричну стабільність на повітрі. Перенесення заряду в провідному полімері ПЕДОТ відбувається по системі спряжених зв'язків за рахунок електронно-обмінних реакцій між сусідніми редокс-місцями і супроводжується рухом аніонів-допантів вздовж полімерного ланцюга.

Отже застосування ПЕДОТ:ПСС в тандемних сонячних фотоперетворювачах дозволяє отримати високий ККД, та хороші інші характеристики за різних умов.

Виконані розрахунки свідчать про досить високу ефективність тандемних сонячних фотоперетворювачів, проте технологія та структура шарів потребують подальшого вивчення та вдосконалювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Yasmina Dkhissi, Wei Li «Perovskite Tandem Solar Cells» //URL:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.201602761> (16 May 2017)
2. Tomas Leijtens, Kevin A. Bush, Rohit Prasanna & Michael D. McGehee «Opportunities and challenges for tandem solar cells using metal halide perovskite semiconductors» // URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.201904102> (09 July 2018)
3. Marko Jošt, Lukas Kegelmann, Lars Korte, Steve Albrecht «Monolithic Perovskite Tandem Solar Cells: A Review of the Present Status and Advanced Characterization Methods Toward Efficiency» // URL: <https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1686155> (04 May 2020)
4. Maximilian T. Höranther and Henry J. Snaith Predicting and optimising the energy yield of perovskite-on-silicon tandem solar cells under real world conditions
5. Пащенко О.Г., Галат О. Б., Бабиченко О.Ю. Напівпровідникові квантові генератори з наноструктурами. Навч. посібник / Харків: ХНУРЕ, 2019. – 236с.
6. Jung Woo Leem 1, Minkyu Choi, Jae Su Yu «Multifunctional microstructured polymer films for boosting solar power generation of silicon-based photovoltaic modules» // URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25622310/>
7. Gang Yeol Yoo, Jae-Seung Jeong, Soyoung Lee, Youngki Lee, Hee Chang Yoon, Van Ben Chu, Gi Soon Park, Yun Jeong Hwang, Woong Kim, Byoung Koun Min, Young Rag Do «Multiple-Color-Generating Cu(In,Ga)(S,Se)₂ Thin-Film Solar Cells via Dichroic Film Incorporation for Power-Generating Window Applications.» //URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28406026/>
8. Galat A. B. Simulation of an Optimal Design for (P)-a-Si:H/(N)-c-Si Photovoltaic Converters Using the Analytical Model // Telecommunications and Radio Engineering. 2015., No. 13 Vol. 74. P. 1215-1223.

9. Білюк А. А., Семчук О. Ю., Гаврилюк О. О. Фізико-хімічні властивості та застосування провідного органічного полімеру полі-3,4 етилендіоксітіюфен-полістирол сульфонату // Поверхня. 2015., вип. 11 Т. 26. С. 414-435.

10. Sun K., Zhang S., Li P., et al. Review on application of PEDOTs and PEDOT:PSS in energy conversion and storage devices // Journal of Materials Science Materials in Electronics.– 2015.– V. 26, No 7.– P. 1-25.

11. Huang L. M., Chen C. H., Wen T. C. Development and characterization of flexible electrochromic devices based on polyaniline and poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrene sulfonic acid) // Electrochimica Acta .– 2006 .– V. 51, No 26.– P. 5858-5863.

12. Sharma, N.; Gupta, S.K.; Negi, C.M. Influence of Active Layer Thickness on Photovoltaic Performance of PTB7:PC70BM Bulk Heterojunction Solar Cell. Superlattices Microstruct. 2019, 135, 106278.

13. Галат О. Б., Бойко Б. Ю., Слюсаренко О. А. ПОГЛИНАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТОНКОПЛІВКОВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ // ХХІ Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», 17-18 травня 2022 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна. С. 29

14. Бойко Б.Ю. АКТИВНИЙ ШАР ТАНДЕМНОГО СОНЯЧНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА // ХХVІІ Міжнародний молодіжний форум «Радіoeлектроніка та молодь у ХХІ столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 1. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – С.41-42.

15. Бойко Б.Ю. МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОГО ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВИХ ОРГАНІЧНИХ ШАРІВ // 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. 106-107.