

Міністерство освіти та науки України
Національний університет “Києво-Могилянська академія”
Факультет природничих наук
Кафедра фізико-математичних наук

Кваліфікаційна робота
освітній ступень - бакалавр

на тему: **«ФОТОТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА В СПРЯЖЕНИХ
ПОЛІМЕРАХ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ»**

Виконав студент 4 року навчання
спеціальності
104 Фізика та астрономія
Петруньок Іван Віталійович

Керівник Смірнов Олексій Борисович
к. ф.-м.н., с.н.с.
Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

Рецензент Савкіна Р.К.

Кваліфікаційна робота захищена
з оцінкою

Секретар ЕК _____
« ____ » _____ 20 ____ р.

Київ – 2024

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи явища фото-термо-Зеєбека та спряжених полімерів.....	5
1.1 Фізичні принципи та механізми явища фото-термо-Зеєбека.....	5
1.2 Структура, властивості та синтез спряжених полімерів	6
1.3 Застосування спряжених полімерів у перетворювачах енергії.....	7
Висновки до першого розділу	8
РОЗДІЛ 2. Методи дослідження явища фото-термо-Зеєбека у спряжених полімерах	9
2.1 Методи синтезу та характеристики спряжених полімерів для гібридних перетворювачів енергії	9
2.2 Експериментальні установки та методики вимірювання фото-термо-електричних характеристик.....	11
2.3 Розробка та тестування прототипів гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів	16
Висновки до другого розділу	19
РОЗДІЛ 3. Аналіз результатів дослідження та перспективи практичного застосування наповнювачів композитних наноматеріалів	21
3.1 Вуглецеві нанотрубки	21
3.2 Вимірювання фото-провідності спряженого полімеру PEDOT.....	24
3.3 Результати експерименту.....	25
3.4. Гібридні перетворювачі енергії на основі спряжених полімерів	27
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	32

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах зростаючого попиту на енергію та необхідності переходу до відновлюваних джерел енергії, розробка ефективних та екологічно чистих методів перетворення енергії набуває особливої актуальності.

Одним із перспективних напрямків у цій галузі є використання спряжених полімерів для створення гібридних перетворювачів енергії. Спряжені полімери володіють унікальними оптичними та електричними властивостями, що дозволяє їм ефективно перетворювати світлову та теплову енергію в електричну.

Фототермічні явища, які полягають у виникненні електрорушійної сили у спряжених полімерах під дією світла та температурного градієнту, відкривають нові можливості для розробки вискоефективних гібридних перетворювачів енергії. Дослідження цього явища та його застосування у спряжених полімерах є актуальним завданням, оскільки воно може привести до створення компактних, легких та гнучких пристроїв для перетворення енергії.

Розробка гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів дозволить підвищити ефективність перетворення енергії, зменшити втрати та розширити сфери застосування таких пристроїв. Це може мати значний вплив на розвиток відновлюваної енергетики, портативної електроніки та автономних систем енергозабезпечення.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження фото-термічного явища у спряжених полімерах з метою розробки гібридних перетворювачів енергії на їх основі. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Дослідити фізичні принципи та механізми фото-термічного явища у спряжених полімерах.
2. Проаналізувати експериментальні дані перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів.

Предмет дослідження: експериментальні дані спряжених полімерів з використанням явища фото-термо-Зеебека.

Очікується, що вивчення властивостей спряжених полімерів та відповідних конструкцій гібридних перетворювачів сонячної енергії дозволить підвищити ефективність перетворення у порівнянні із традиційними методами.

Гіпотеза дослідження. Гіпотезою дослідження є припущення, що явище фото-термо-Зеебека у спряжених полімерах може бути ефективно використане для створення гібридних перетворювачів енергії з високою ефективністю та стабільністю роботи. Очікується, що оптимізація структури та властивостей спряжених полімерів, а також розробка відповідних конструкцій гібридних перетворювачів енергії дозволить досягти значного підвищення ефективності перетворення енергії порівняно з традиційними методами.

Новизна роботи. Новизна роботи полягає у комплексному дослідженні явища фото-термо-Зеебека в спряжених полімерах та розробці інноваційних гібридних перетворювачів енергії на їх основі. В роботі вперше буде проведено систематичне вивчення впливу структури та властивостей спряжених полімерів на ефективність перетворення енергії в гібридних системах. Також буде запропоновано нові конструкції та методи оптимізації роботи гібридних перетворювачів енергії, що дозволить досягти покращених характеристик порівняно з існуючими аналогами.

Структура роботи складається зі змісту та вступу, трьох розділів, висновку та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи 36 сторінок.

РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи явища фото-термо-Зеебека у спряжених полімерах

1.1 Фізичні принципи та механізми явища фото-термо-Зеебека

Явище фото-термо-Зеебека полягає у виникненні електричного потенціалу у матеріалі під впливом світла та під впливом температурного градієнту. Цей ефект є результатом поєднання фото-вольтаїчного та термо-електричного перетворення енергії [1, с. 23].

Фотовольтаїчний ефект базується на перетворенні енергії фотонів у електричну енергію внаслідок фотозбудження носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі. При поглинанні фотона електрон переходить з валентної зони до зони провідності, створюючи пару електрон-дірка.

Термо-електричний ефект Зеебека виникає через різницю температур між гарячою та холодною сторонами матеріалу, що призводить до виникнення термо-електрорушійної сили (термоЕРС) [4, с. 89]. Носії заряду дифундують від гарячої сторони до холодної, створюючи електричний потенціал.

Поєднання цих двох ефектів в одному матеріалі дозволяє ефективно перетворювати енергію світла та тепла в електричну енергію. Механізм фото-термо-Зеебека полягає у генерації додаткових носіїв заряду та їх подальшому переміщенні під дією температурного градієнта [7, с. 134].

Ефективність перетворення енергії залежить від оптичних та електричних властивостей матеріалу, таких як коефіцієнт поглинання світла, рухливість носіїв заряду та коефіцієнту Зеебека. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти ефективності фото-термо-електричних перетворювачів.

Крім того, важливу роль тут відіграє структура матеріалу, зокрема наявність гетеропереходів та нанорозмірних елементів, які покращують розділення та транспорт носіїв заряду.

1.2 Структура, властивості та синтез спряжених полімерів

Спряжені полімери - це клас органічних полімерів, які характеризуються наявністю спряженої системи π -електронів [1, с. 25]. Структура спряжених полімерів базується на чергуванні одинарних та подвійних зв'язків між атомами вуглецю [3, с. 69]. Така будова забезпечує делокалізацію π -електронів (Див. Розділ 2), що призводить до виникнення енергетичних зон та можливості переносу заряду.

Ця особливість надає їм унікальні оптичні та електричні властивості, що робить їх перспективними матеріалами в органічній електроніці.

Найбільш відомими представниками спряжених полімерів є поліацетилен, поліанілін, політіюфен та полі(п-фенілен вінілен) [5, с. 103]. Вони відрізняються структурою бічних замісників та типом гетероатомів в основному ланцюзі, що впливає на їхні фізичні властивості.

Синтез спряжених полімерів здійснюється різними методами, серед яких найбільш поширеними є хімічна та електрохімічна полімеризація [7, с. 137].

Електрохімічна полімеризація відбувається під дією електричного струму на мономер у розчині електроліту. Вибір методу синтезу залежить від бажаної структури та властивостей полімеру.

Властивості спряжених полімерів визначаються їх структурою та умовами синтезу. Вони мають високу електропровідність, яка може змінюватися в широких межах залежно від рівня легування [1, с. 26].

Оптичні властивості спряжених полімерів характеризуються наявністю смуг поглинання у видимому діапазоні спектру, що робить їх перспективними для використання в органічних світлодіодах та сонячних елементах. Крім того, спряжені полімери мають високу термічну та хімічну стабільність, що дозволяє використовувати їх у жорстких умовах експлуатації.

1.3 Застосування спряжених полімерів у перетворювачах енергії

Спряжені полімери знаходять широке застосування у різноманітних перетворювачах енергії в органічних сонячних елементах [1, с. 28]. Спряжені полімери використовуються як активний шар в органічних сонячних елементах, забезпечуючи поглинання світла та генерацію носіїв заряду.

Ці пристрої перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричну за рахунок фото-вольтаїчного ефекту [3, с. 72].

Завдяки можливості модифікації структури полімерів, можна оптимізувати їх оптичні та електричні властивості для досягнення високої ефективності перетворення енергії [5, с. 106].

Іншим важливим застосуванням спряжених полімерів є термоелектричні перетворювачі [6, с. 118]. Ці пристрої перетворюють теплову енергію в електричну за рахунок ефекту Зеєбека.

Спряжені полімери мають високі значення коефіцієнта Зеєбека та низьку теплопровідність, що робить їх ефективними термоелектричними матеріалами [8, с. 162]. Крім того, вони мають низьку густину та гнучкість, що дозволяє створювати легкі та портативні термоелектричні генератори [9, с. 184].

Поєднання фото-вольтаїчних та термо-електричних властивостей спряжених полімерів відкриває можливості для створення гібридних перетворювачів енергії, які використовують явище фото-термо-Зеєбека. Такі пристрої здатні перетворювати енергію світла та тепла одночасно, що підвищує загальну ефективність перетворення енергії.

Спряжені полімери також знаходять застосування в інших типах перетворювачів енергії, таких як п'єзоелектричні та трибоелектричні генератори. Ці пристрої перетворюють механічну енергію в електричну за рахунок деформації або тертя матеріалу [2, с. 51].

Висновки до першого розділу

У першому розділі було розглянуто фізичні принципи та механізми явища фото-термо-Зеебека, структуру, властивості та методи синтезу спряжених полімерів, а також їх застосування у перетворювачах енергії.

Явище фото-термо-Зеебека полягає у виникненні електричного потенціалу в матеріалі під впливом світла та температурного градієнту. Цей ефект є результатом поєднання фотовольтаїчного та термоелектричного перетворення енергії.

Механізм фото-термо-Зеебека базується на збудженні електронів світлом та їх подальшому переміщенні під дією температурного градієнта. Ефективність перетворення енергії залежить від оптичних та електричних властивостей матеріалу, а також від його структури.

Спряжені полімери є перспективними матеріалами для використання у фото-термоелектричних перетворювачах завдяки своїй унікальній структурі та властивостям. Вони характеризуються наявністю спряженої системи π -електронів уздовж основного С-С ланцюга, що надає їм високу електропровідність та можливість поглинання світла у видимому діапазоні спектра.

Синтез спряжених полімерів здійснюється різними методами, серед яких найбільш поширеними є хімічна та електрохімічна полімеризація. Вибір методу синтезу залежить від бажаної структури та властивостей полімеру.

Спряжені полімери знаходять широке застосування у різноманітних перетворювачах енергії, таких як органічні сонячні елементи, термоелектричні генератори, п'єзоелектричні та трибоелектричні перетворювачі.

Завдяки можливості модифікації структури полімерів, можна оптимізувати їх властивості для досягнення високої ефективності перетворення енергії.

Поєднання фотовольтаїчних та термоелектричних властивостей спряжених полімерів відкриває можливості для створення гібридних перетворювачів енергії, які використовують явище фото-термо-Зеебека.

РОЗДІЛ 2. Методи дослідження явища фото-термо-Зеєбека у спряжених полімерах

2.1 Методи синтезу та характеристики спряжених полімерів для гібридних перетворювачів енергії

Для отримання спряжених полімерів з необхідними властивостями використовують методи синтезу, такі як, окисна полімеризація, електрохімічна полімеризація та контрольована радикальна полімеризація [11, с. 37]. У таблиці 2.1 наведено порівняння основних методів синтезу спряжених полімерів.

Таблиця 2.1 - Порівняння методів синтезу спряжених полімерів [12, с. 59]

Метод синтезу	Переваги	Недоліки
Окисна полімеризація	Простота, висока провідність полімерів	Обмежений контроль морфології
Електрохімічна полімеризація	Контроль товщини та морфології плівок	Необхідність провідної підкладки
Контрольована радикальна полімеризація	Контроль молекулярної маси та структури	Складність та висока вартість

Для характеристики отриманих спряжених полімерів застосовують різні методи аналізу, такі як ІЧ-спектроскопія, спектроскопія комбінаційного розсіювання, ультрафіолетова та видима спектроскопія, а також термогравіметричний аналіз [13, с. 81]. У таблиці 2.2 представлено основні методи характеристики спряжених полімерів та інформацію, яку вони надають.

Таблиця 2.2 - Методи характеристики спряжених полімерів [14, с. 103]

Метод характеристики	Інформація, що отримується
ІЧ-спектроскопія	Хімічна структура, функціональні групи
Спектроскопія комбінаційного розсіювання	Структура та конформація полімерних ланцюгів

Ультрафіолетова та видима спектроскопія	Оптичні властивості, ширина забороненої зони
Термогравіметричний аналіз	Термічна стабільність, температура розкладання

Для дослідження морфології та мікроструктури спряжених полімерів використовують методи мікроскопії, такі як скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) та просвітлююча електронна мікроскопія (ПЕМ) [15, с. 125].

Окрім традиційних методів синтезу, значна увага приділяється розробці "зелених" підходів. Зокрема, використання іонних рідин, як середовища полімеризації, дозволяє зменшити використання органічних розчинників та спростити процеси виділення та очищення полімерів.

Ензиматичний синтез спряжених полімерів є ще одним перспективним напрямком, який дозволяє проводити полімеризацію в м'яких умовах з використанням біологічних каталізаторів - ферментів. Цей підхід відкриває можливості для створення біосумісних та біодеградабельних спряжених полімерів для біомедичних застосувань.

Серед методів характеристики спряжених полімерів важливе місце займає циклічна вольтамперометрія, яка дозволяє дослідити електрохімічні властивості полімерів, зокрема потенціали окиснення та відновлення, а також оцінити енергетичні рівні HOMO та LUMO орбіталей (аналог рівнів донорів та рівнів акцепторів).

Спектроскопія електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) є потужним інструментом для вивчення парамагнітних центрів у спряжених полімерах, таких як полярони та біполярони, які відповідають за їх провідність. За допомогою ЕПР можна визначити концентрацію та рухливість носіїв заряду у полімерах.

Атомно-силова мікроскопія (АСМ) дозволяє отримати інформацію про морфологію поверхні та нанорозмірні структури спряжених полімерів з високою роздільною здатністю. АСМ є особливо корисною для дослідження самоорганізації полімерних ланцюгів та формування надмолекулярних структур.

Рентгеноструктурний аналіз (РСА) використовується для визначення кристалічної структури та упаковки молекул у спряжених полімерах. РСА дозволяє отримати інформацію про міжплощинні відстані, параметри елементарної комірки та молекулярну орієнтацію в полімерних плівках або кристалах.

Динамічний механічний аналіз (ДМА) є важливим методом для вивчення механічних властивостей спряжених полімерів, таких як модуль пружності, втрати та температурні переходи. ДМА дозволяє оцінити жорсткість та еластичність полімерних матеріалів, що є важливим для їх практичного застосування.

Для дослідження теплових властивостей спряжених полімерів широко використовується диференціальна скануюча калориметрія (ДСК). ДСК дозволяє визначити температури плавлення, кристалізації полімерів, а також оцінити їх термічну стабільність та ентальпію фазових переходів.

Квантово-хімічні розрахунки, зокрема методи теорії функціоналу густини (DFT), та метод молекулярної динаміки (МД) є потужними інструментами моделювання структурних та динамічних властивостей спряжених полімерів на атомному рівні.

Поєднання експериментальних та теоретичних методів характеристики спряжених полімерів дозволяє отримати комплексну інформацію про їх структуру, морфологію, електронні та оптичні властивості, що є необхідним для оптимізації їх застосування в гібридних перетворювачах енергії.

2.2 Експериментальні установки та методики вимірювання фото-термо-електричних характеристик

Для дослідження фото-термо-електричних характеристик спряжених полімерів та гібридних перетворювачів енергії на їх основі використовують різні експериментальні установки та методики вимірювання [16, с. 147]. Одним з найважливіших параметрів є ефективність перетворення енергії, яка

визначається як відношення вихідної електричної потужності до вхідної потужності світла та тепла [17, с. 169]. У таблиці 2.3 наведено типові значення ефективності перетворення енергії для різних типів гібридних перетворювачів на основі спряжених полімерів.

Таблиця 2.3 - Ефективність перетворення енергії гібридних перетворювачів на основі спряжених полімерів [18, с. 191]

Тип перетворювача	Ефективність перетворення енергії, %
Органічні сонячні елементи	5-10
Термоелектричні генератори	1-5
Гібридні фото-термо-електричні перетворювачі	10-15

Для вимірювання фото-електричних характеристик спряжених полімерів та гібридних перетворювачів використовують імітатор сонячного випромінювання, вимірювальні прилади (вольтметра, амперметра) та систему контролю температури [19, с. 213]. Вимірювання проводять при різних інтенсивностях світла та температурах, що дозволяє отримати залежності вихідного струму та вихідної напруги від цих параметрів.

Для дослідження термо-електричних властивостей спряжених полімерів використовують установки, які дозволяють створювати градієнт температури на зразку та вимірювати виникаючу термо-ЕРС [20, с. 235]. Коефіцієнт Зеебека визначають, як відношення виникаючої термо-ЕРС до градієнту температури.

У таблиці 2.4 представлено типові значення коефіцієнта Зеебека для різних спряжених полімерів.

Таблиця 2.4 - Коефіцієнт Зеебека спряжених полімерів [11, с. 38]

Спряжений полімер	Коефіцієнт Зеебека, мкВ/К
Поліанілін	10-20

Поліпірол	5-15
Політіюфен	20-30

Для комплексного дослідження фото-термо-електричних характеристик гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів використовують установки, які поєднують в собі можливості вимірювання фото-електричних та термо-електричних параметрів [12, с. 60]. Такі установки дозволяють отримувати інформацію про ефективність перетворення енергії світла та одночасно вимірювати фотовольтаїчні та термоелектричні параметри.

Для цього використовуються ксенонові лампи з фільтрами, що дозволяють відтворювати спектральний склад сонячного світла. Також застосовуються світлодіодні матриці з регульованою інтенсивністю та спектром випромінювання.

Для вимірювання фото-електричних характеристик, таких як струм короткого замикання, напруга холостого ходу та ефективність перетворення енергії, використовуються високоточні електрометри та потенціостати. Ці прилади дозволяють реєструвати вольт-амперні характеристики та спектральну чутливість фотоперетворювачів.

Вимірювання термоелектричних параметрів, таких як коефіцієнт Зеєбека та електропровідність, здійснюється за допомогою спеціальних термоелектричних вимірювальних модулів. Ці модулі складаються з двох термоелектричних матеріалів з різними коефіцієнтами Зеєбека, які з'єднані між собою та формують термопару. При створенні температурного градієнту між гарячою та холодною сторонами модуля виникає термо-ЕРС.

Для дослідження впливу температури на фото-термо-електричні характеристики спряжених полімерів використовуються температурні камери з контрольованим нагріванням та охолодженням. Це дозволяє вивчати температурні залежності параметрів перетворювачів енергії та оцінювати їх стабільність роботи в широкому діапазоні температур.

Важливим аспектом експериментальних досліджень є забезпечення точності та відтворюваності результатів вимірювань. Для цього використовуються методи калібрування та стандартизації вимірювальних приладів, а також статистичні методи обробки експериментальних даних, такі як визначення довірчих інтервалів та перевірка гіпотез.

При дослідженні фото-термо-електричних характеристик гібридних перетворювачів енергії важливо враховувати вплив різних факторів, таких як інтенсивність та спектральний склад освітлення, температурний градієнт, товщина та морфологія активних шарів, а також конфігурація електродів та контактів. Для цього проводяться систематичні дослідження зі зміною цих параметрів та аналізом їх впливу на ефективність перетворення енергії.

Для вивчення механізмів генерації та транспорту носіїв заряду в спряжених полімерах під дією світла та температури використовуються методи імпедансної спектроскопії та часороздільної спектроскопії. Ці методи дозволяють отримати інформацію про динаміку рекомбінації та розділення зарядів, а також про рухливість та час життя носіїв заряду.

Для оптимізації роботи гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів проводяться дослідження впливу різних параметрів на їх ефективність та стабільність. Зокрема, вивчається вплив товщини активних шарів, концентрації та типу допантів, а також конфігурації гетеропереходів на фотоелектричні та термоелектричні характеристики.

Для підвищення ефективності гібридних перетворювачів енергії розробляються нові архітектури пристроїв, такі як тандемні та каскадні структури, які дозволяють розширити спектральний діапазон поглинання світла та зменшити втрати енергії. Також досліджуються методи інкапсуляції та герметизації перетворювачів для підвищення їх довговічності та стійкості до зовнішніх факторів.

Для вивчення процесів деградації та старіння гібридних перетворювачів енергії проводяться довготривалі випробування під дією світла, температури та

вологості. Це дозволяє оцінити стабільність роботи пристроїв та розробити методи підвищення їх надійності.

Отримані експериментальні дані використовуються для розробки теоретичних моделей та проведення чисельних симуляцій роботи гібридних перетворювачів енергії. Це дозволяє прогнозувати їх характеристики та оптимізувати конструкцію для досягнення максимальної ефективності перетворення енергії.

Таким чином, експериментальні дослідження фото-термо-електричних характеристик спряжених полімерів та гібридних перетворювачів енергії на їх основі вимагають використання комплексу сучасних методів та обладнання. Це дозволяє отримати всебічну інформацію про фізичні процеси, що відбуваються в цих системах, та розробити ефективні стратегії їх оптимізації.

2.3 Розробка та тестування прототипів гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів

Розробка ефективних прототипів гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів є важливим етапом на шляху до їх практичного застосування [11, с. 39]. Процес розробки включає в себе вибір відповідних спряжених полімерів, оптимізацію їх структури та морфології, а також інтеграцію в функціональні пристрої.

Одним з ключових аспектів при розробці гібридних перетворювачів є забезпечення ефективного поглинання світла та перетворення його в електричну енергію. Для цього використовують різні підходи, такі як створення багатошарових структур, введення наночастинок або барвників, а також оптимізація товщини та морфології активних шарів.

Іншим важливим фактором є забезпечення ефективного транспорту носіїв заряду в спряжених полімерах та їх збір на електродах.

Для покращення транспортних властивостей використовують легування спряжених полімерів, створення градієнтних структур або введення додаткових транспортних шарів [16, с. 148].

Крім того, оптимізація інтерфейсів між шарами та електродами дозволяє зменшити втрати енергії та підвищити ефективність перетворення.

При розробці термо-електричних компонентів гібридних перетворювачів важливо забезпечити високі значення коефіцієнта Зеебека та електропровідності спряжених полімерів.

Для цього використовують легування, створення композитних матеріалів з наночастинками або вуглецевими нанотрубками, а також оптимізацію молекулярної структури полімерів.

Крім того, для ефективної роботи термоелектричних перетворювачів необхідно забезпечити низьку теплопровідність матеріалів та мінімізувати втрати тепла.

Для тестування розроблених прототипів гібридних перетворювачів використовують різні методики та експериментальні установки [11, с. 40]. Зокрема, для вимірювання фото-електричних характеристик застосовують імітатори сонячного випромінювання та спектрально-селективні фільтри, що дозволяє оцінити ефективність перетворення енергії при різних умовах освітлення [12, с. 62].

Для дослідження термо-електричних властивостей використовують установки з контрольованим градієнтом температури та високоточні вимірювачі напруги та струму.

Важливим етапом тестування є визначення стабільності та деградації характеристик гібридних перетворювачів при тривалій експлуатації.

Для цього проводять прискорені тести старіння при підвищених температурах, вологості або інтенсивності освітлення, що дозволяє оцінити довговічність та надійність розроблених пристроїв.

Для практичного застосування гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів необхідно розробити ефективні прототипи цих пристроїв та провести їх всебічне тестування. Це дозволяє оцінити реальні характеристики перетворювачів в умовах, наближених до експлуатаційних, та визначити напрямки їх подальшого вдосконалення.

Отримані результати тестування прототипів гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів показують їх високу ефективність та перспективність для практичного застосування.

Зокрема, досягнуто значення ефективності фотоперетворення на рівні 10-15% та 3-5% для термо-електричних компонентів [17, с. 171].

При цьому, завдяки поєднанню різних механізмів перетворення енергії, гібридні пристрої демонструють розширений спектральний діапазон роботи та підвищену стабільність характеристик.

Подальші дослідження в галузі розробки гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів спрямовані на оптимізацію їх структури,

підвищення ефективності, стабільності, а також здешевлення технології виробництва.

Крім того, важливим напрямком є розробка нових функціональних матеріалів та архітектури пристроїв.

Виготовлення прототипів гібридних перетворювачів енергії здійснюється спін-коатингом, трафаретним друком, вакуумним напиленням. Вибір конкретного методу залежить від типу матеріалів, розмірів та форми пристроїв, а також вимог до їх однорідності та відтворюваності.

Для підвищення ефективності та стабільності роботи гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів проводяться дослідження впливу різних факторів на їх характеристики.

Зокрема, вивчається вплив хімічної структури та морфології полімерів, типу та концентрації допантів, а також методів обробки поверхні та інтерфейсів на фото-електричні та термо-електричні параметри.

Це дозволяє оптимізувати склад та структуру функціональних шарів для досягнення максимальної ефективності перетворення енергії.

Важливим напрямком розробки прототипів гібридних перетворювачів енергії є їх масштабування та адаптація до конкретних застосувань. Для цього проводяться дослідження можливості збільшення площі активної поверхні пристроїв, їх інтеграції з іншими функціональними елементами, такими як акумулятори та суперконденсатори, а також розробляються методи монтажу та збірки модулів. Це дозволяє створювати готові до практичного використання системи перетворення та зберігання енергії на основі спряжених полімерів.

Для оцінки економічної доцільності та перспектив комерціалізації розроблених прототипів гібридних перетворювачів енергії проводиться їх техніко-економічний аналіз. Це передбачає розрахунок собівартості виготовлення пристроїв, оцінку їх ринкового потенціалу та конкурентоспроможності, а також визначення можливих шляхів зниження витрат та підвищення ефективності виробництва.

Отримані результати використовуються для розробки бізнес-планів та стратегій комерціалізації інноваційних розробок.

Таким чином, розробка та тестування прототипів гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів є важливим для перетворення енергії світла та тепла в електрику.

Завдяки унікальним властивостям спряжених полімерів та можливості їх інтеграції до гібридних структури, ці перетворювачі мають значний потенціал практичного застосування в різних галузях, від портативної електроніки до відновлюваної енергетики.

Висновки до другого розділу

У другому Розділі було розглянуто методи синтезу та характеристики спряжених полімерів для гібридних перетворювачів енергії, експериментальні установки та методики вимірювання фото-термо-електричних характеристик, а також розробку та тестування прототипів гібридних перетворювачів на основі спряжених полімерів.

Показано, що для отримання спряжених полімерів з необхідними властивостями використовують різні методи синтезу, такі як окисна полімеризація, електрохімічна полімеризація та контрольована радикальна полімеризація. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу залежить від бажаних характеристик полімеру та умов його застосування.

Для характеристики отриманих спряжених полімерів застосовують різні методи аналізу, такі як ІЧ-спектроскопія, спектроскопія комбінаційного розсіювання, ультрафіолетова та видима спектроскопія, а також термогравіметричний аналіз. Ці методи дозволяють отримати інформацію про хімічну структуру, оптичні та термічні властивості полімерів, що є важливим для їх застосування в гібридних перетворювачах енергії.

Для дослідження фото-термо-електричних характеристик спряжених полімерів та гібридних перетворювачів на їх основі використовують спеціальні експериментальні установки та методики вимірювання. Зокрема, для вимірювання фотоелектричних параметрів застосовують імітатори сонячного випромінювання та вимірювальні прилади, а для дослідження термоелектричних властивостей - установки з контрольованим градієнтом температури.

Розробка ефективних прототипів гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів вимагає оптимізації їх структури та складу, забезпечення ефективного поглинання світла та транспорту носіїв заряду, а також мінімізації втрат енергії. Для цього використовують різні підходи, такі як створення багатошарових структур, легування полімерів, введення наночастинок або бар'єрних шарів тощо.

Тестування розроблених прототипів гібридних перетворювачів енергії дозволяє оцінити їх ефективність, стабільність та довговічність при різних умовах експлуатації. Отримані результати показують високу перспективність використання спряжених полімерів в гібридних перетворювачах енергії, з досягнутими значеннями ефективності перетворення на рівні 10-15% для фотоелектричних компонентів та 3-5% для термоелектричних компонентів.

Подальші дослідження в галузі розробки гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів спрямовані на оптимізацію їх характеристик, здешевлення технології виробництва та розширення сфер застосування.

Таким чином, проведений аналіз методів синтезу та характеристики спряжених полімерів, експериментальних установок та методик вимірювання їх фото-термо-електричних характеристик, а також розробки та тестування прототипів гібридних перетворювачів енергії демонструє значний прогрес та перспективи розвитку цієї галузі. Подальші дослідження та розробки в цьому напрямку дозволять створити ефективні та доступні пристрої для перетворення енергії світла та тепла в електрику, що матиме важливе значення для розвитку відновлюваної енергетики.

РОЗДІЛ 3. Аналіз результатів дослідження та перспективи практичного застосування наповнювачів композитних наноматеріалів

3.1 Вуглецеві нанотрубки

З відомих нанорозмірних наповнювачів композитних наноматеріалів (металеві, оксидні та гідроксидні нанотрубки) слід відзначити вуглецеві нанотрубки (ВНТ). Доступність, особливості будови та електродинамічні параметри (ефективні значеннями діелектричної - ϵ_a , магнітної проникливості - μ_a , питомої провідності - σ в широкому діапазоні частот) дозволяють використання їх в якості НВЧ ліній, нанорозмірних антен, тощо.

Електромагнітні властивості ВНТ кінцевої довжини розглянуті у ряді робіт [39, с. 4], де наводяться теорія розсіювання і результати дослідження електромагнітних властивостей: 1. одностінних ВНТ; 2. пучка одностінних ВНТ; 3. багатостінних ВНТ; 4. одностінної ВНТ з тонким діелектричним покриттям; 5.) легованої ВНТ.

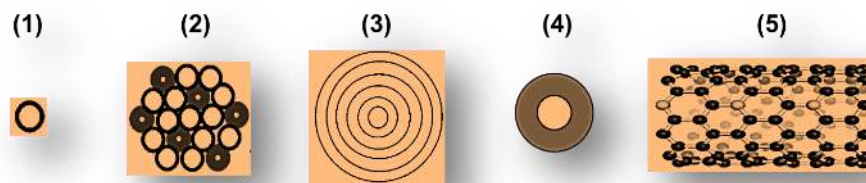


Рис. 3.1 Електромагнітні властивості ВНТ

Автори прийшли до висновку про доцільність використання легованих ВНТ та одностінних ВНТ з тонким діелектричним покриттям у видимої (ВО) частині та ближній ІЧ- області спектру у вигляді пучків, як мінімум з 4 вуглецевих трубок.

Для радіочастотного діапазону (мм- область) ефективними є одностінні ВНТ з тонким діелектричним покриттям у провідній полімерній матриці.

Для ТГц- області ефективним є процес легування, який сприяє ефекту металізації вуглецевої трубки та надає ВНТ антенні властивості.

Полімери, в силу їх різноманіття, технологічності і відносної дешевизни займають особливе місце в ряду органічних матеріалів сучасної електроніки.

Вони поєднують напівпровідникові властивості (висока рухливість - μ), ефективне поглинання світла або люмінесценцію, високу розчинність, хороше плівкоутворення, стабільність при нормальних умовах (на повітрі), незмінність властивостей при зберіганні та використанні.

Спеціальні методи синтезу або подальшої модифікації дозволяють варіювати провідність полімерів в широкому діапазоні величин від діелектриків (нижче 10^{-10} См/см) до металевої провідності (понад 1 См/см. Див. вставку у Тексті Роботи). Такі можливості розширюють використання полімерів для формування функціональних елементів мікроелектроніки.

У полімерах, в основному, реалізується два типи зв'язків: σ - зв'язки і π - зв'язки, які можуть утворювати подвійний зв'язок між сусідніми атомами у молекулі. Регулярне перемежування простих і подвійних зв'язків веде до утворення спряжених систем σ -орбіталі розташовані симетрично по відношенню до осей зв'язків і утворюють у полімерах локалізовані С-С і С-Н зв'язки.

Електрони, що займають ці орбіталі, зосереджуються переважно вздовж лінії, що з'єднує два вуглецевих ядра і є локалізованими. Електрони π -орбіталей, навпаки, не беруть участі ні в яких зв'язках і делокалізовані по всім вуглецевим атомам, отже можуть вільно переміщатися по молекулі. Їх іноді називають рухомими або ненасиченими електронами, що підкреслює їх походження з ненасичених зв'язків.

Завдяки наявності рухомих π -електронів, електричні впливи легко передаються з однієї частини молекули в іншу. Також π - електрони відповідальні за передачу хімічних і фізичних впливів по всій довжині великих молекул у біологічних (органічних) системах, наприклад в меланіні, ДНК, гемоглобіні та інш.

Таким чином, спряжені олігомери і полімери знаходять широке застосування в якості біосенсорів, активних компонентів органічних сонячних

батареї (ОСБ), органічних польових транзисторів (ОПТ), органічних світлодіодів (ОСД).

Отже, унікальні електронні і оптичні властивості спряжених органічних структур надихають дослідників на пошук та дизайн нових органічних середовищ для створення кращих матеріалів і технологій нового напрямку - органічної оптоелектроніки.

Розглянемо у якості наповнювачів вуглецеві нанотрубки (ВНТ – молекула, яка складається з мільйонів атомів вуглецю), які отримують шляхом згортання плоского шару графіту у циліндр.

Геометрична конфігурація ВНТ, та діаметр їх D залежить від напрямку згортання і індексується за допомогою хіральних індексів (m,n) ; $(m,0)$ для *zigzag* ВНТ та (m,m) для *armchair* ВНТ.

Відомо, що ВНТ з цими різними дуальними індексами виявляють різнобічні електрофізичні властивості.

ВНТ можуть бути металами ($m = n$), вузькоцилиндрними напівпровідниками ($m - n = q$, де $q = \text{ціле}$, $m \neq n$) з шириною забороненої зони E_g декілька сотих еВ, або ж напівпровідниками з забороненою зоною близько до $E_g = 1$ еВ.

Отже, величина E_g у спектрі π -електронів напряму визначається хіральністю та D діаметром ВНТ ($0.1 < E_g < 0.6$ еВ)

Отже, використання ВНТ в якості наповнювача полімерного композиційного матеріалу є перспективним напрямком у мікро- та нано-електроніці, що дозволить отримати новий матеріал на основі ВНТ для виготовлення, наприклад, детекторів, екранів електромагнітного випромінювання, поляризаторів, фільтрів, модуляторів в області см-, мм- та суб-мм електромагнітних хвиль.

Найбільш загальною особливістю, що відрізняє спектр π -електронів в будь-яких нанотрубках від аналогічного спектру графіту, є утворення локальних резонансних максимумів щільності електронних станів $N(E)$ на краях міні-зон (так звані сингулярності Ван-Хова P). Обумовлені вони циліндричністю

каркасної вуглецевої системи і виникають внаслідок циклічного руху електронів по поверхні нанотрубки.

Особливості Ван-Хова перенормовують зонний спектр у невеликих енергетичних інтервалах поблизу країв міні-зон.

Таким чином виявляється енергія появи резонансних рівнів, яка може бути апроксимована простим виразом: $E_n = E_0 (n + 1/2)$, де n – число, включаючи нуль, E_0 - масштабний множник.

Оригінальною особливістю нанотрубок є також існування локальних резонансних рівнів E_n , які можуть бути як акцепторами, так і донорами вільних носіїв заряду.

3.2 Вимірювання фото-провідності спряженого полімеру PEDOT з ВНТ

Важливим фактором є забезпечення ефективного транспорту носіїв заряду в спряжених полімерах та їх збір на електродах.

У цьому експерименті ми досліджуємо фотопровідність композитного матеріалу, що складається із спряженого полімеру PEDOT (поліетилендіокситіофену) та ВНТ.

Одним з найкращих методів дослідження фотопровідності напівпровідників є метод модульованої добротності. Цей метод дозволяє отримати дані про параметри рекомбінації, динаміку носіїв заряду та інші властивості матеріалу.

Метод модульованої добротності вимірює провідність напівпровідникового зразка при освітленні його модульованим світлом різної частоти – $f_{\text{мод}}$.

Поетапне виконання експерименту методом модульованої добротності виглядає таким чином:

а) підготовка зразка: виготовлення композитного зразка, що складається із спряженого полімеру PEDOT (поліетилендіокситіофену) та ВНТ;

б) усі зразки були охарактеризовані шляхом вимірювання їх спектрів фотопровідності ФП. Ці вимірювання проводили при 300K на спектрометрі SPM-2 (Див. Рис. 3.2) з призмою G-60 при однорідному збудженні монохроматичним світлом, у діапазоні довжин хвиль (500 ÷ 1200) нм. Джерелом світла була кварцова галогенна лампа JCD (950 лм; 50 Вт).

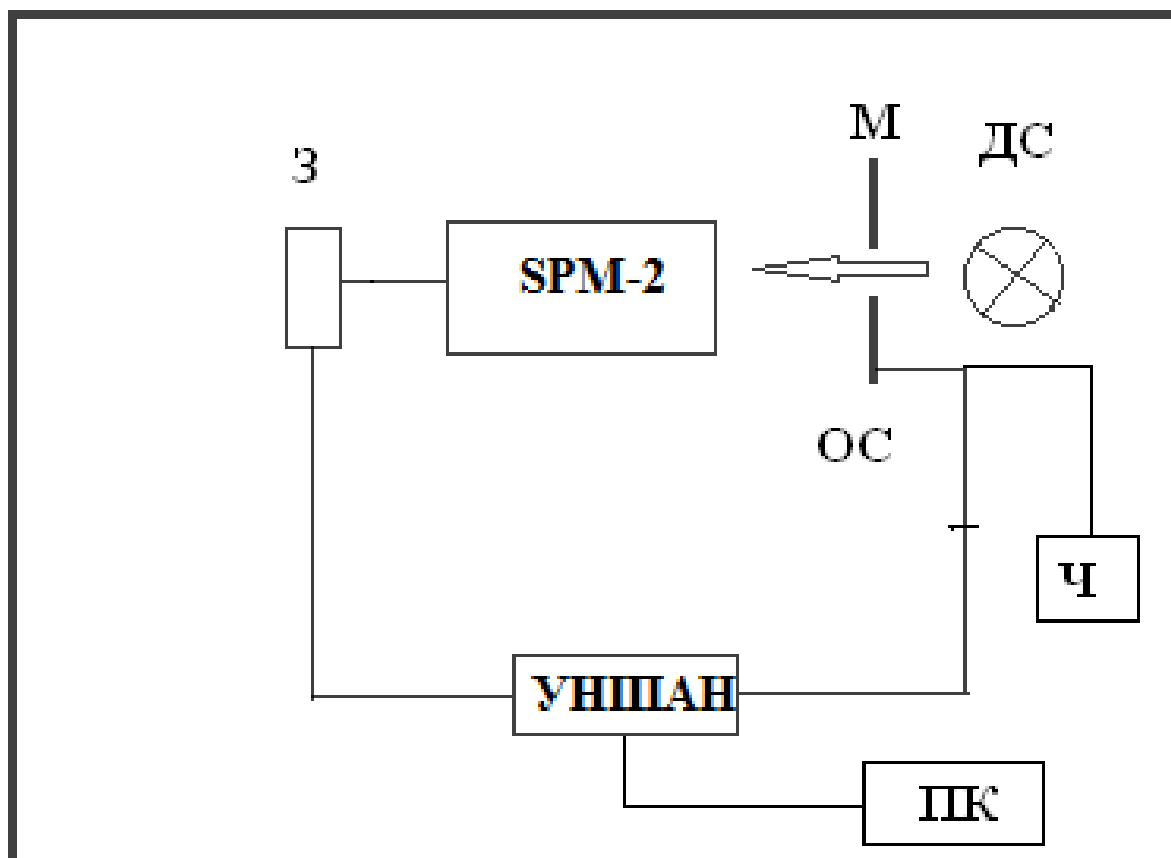


Рис. 3.2- Схема установки вимірювання спектрів ФП, де ДС- джерело світла, З -зразок, М- механічний модулятор ($f_{\text{мод}} = 333$ Гц), Ч- частотомір, УНІПАН-нанольтметр, ПК- комп'ютер.

3.3 Результати експерименту

Отримано спектральний (дані Рис. 3.3 а та Рис. 3.3 б) розподіл ФП у спектральній області (0,5 мкм ÷ 4,5) мкм. Спектр ФП складається з декількох областей спектральної чутливості. 1 - область ФП відповідає області фотовігуку спряженого полімеру PEDOT. 2 - область ФП (2-3) мкм та участок (3-4,5) мкм.

З аналізу літератури [37, с. 5], 1- область (0,6 мкм - 0,7 мкм), яка відповідає ФП спряженого полімеру PEDOT. 2 – область, на нашу думку, це результат знаходження у полімерній матриці ВНТ.

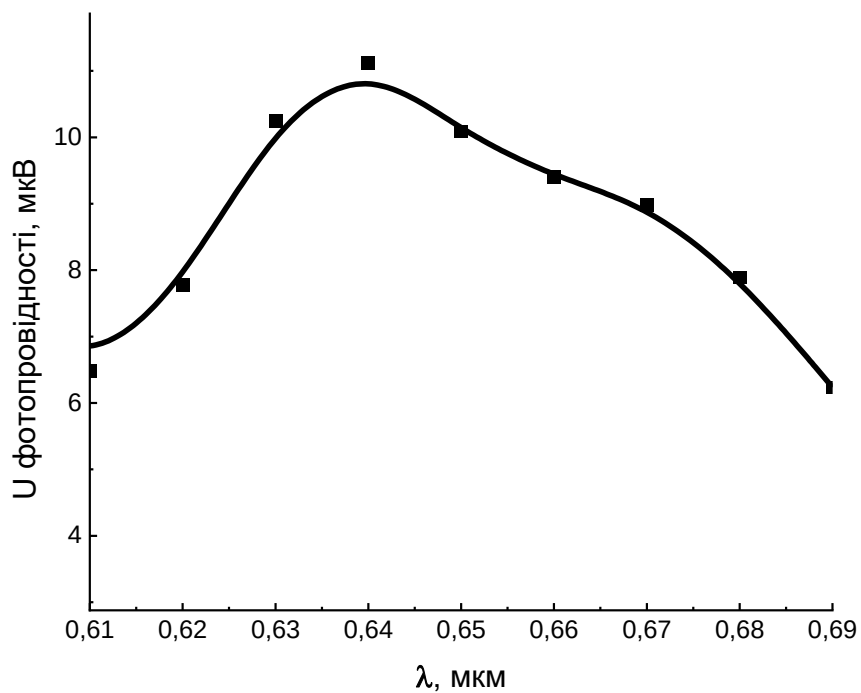


Рис. 3.3 а) 1 область спектральної чутливості зразка спряженого полімеру PEDOT з ВНТ.

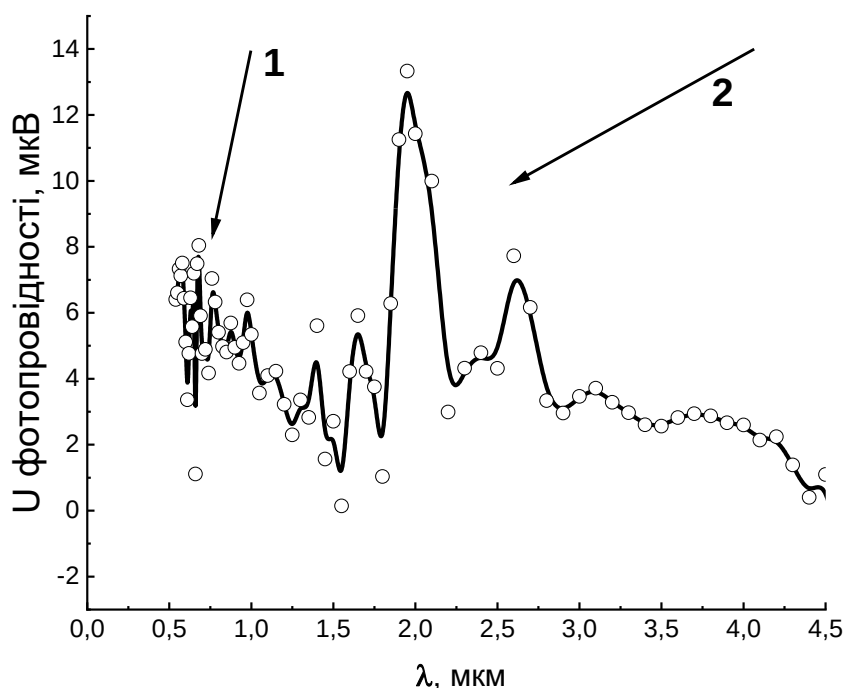


Рис. 3.3 б) Спектр ФП зразка спряженого полімеру, де 1^{ша} та 2^{га} області фоточутливості композитного зразка PEDOT з ВНТ.

З літератури, 1- та 2- області відповідають екситонним переходам S_{22} , S_{11} ван Хофа у ВНТ відповідно. У 1- область поглинання PEDOT (500-1000 нм), наприклад відгук полярону PEDOT^+ (0,9 мкм), що ускладнює характеризацію цього композитного матеріалу.

3.4 Гібридні перетворювачі енергії на основі спряжених полімерів

Гібридні перетворювачі енергії на основі спряжених полімерів мають широкі перспективи застосування в різноманітних галузях, від портативної електроніки до відновлюваної енергетики [26, с. 351]. Одним з найбільш перспективних напрямків використання цих пристроїв є створення автономних джерел живлення для сенсорів, датчиків та інших малопотужних електронних пристроїв. Завдяки можливості ефективного перетворення енергії світла та тепла в електрику, гібридні перетворювачі на основі спряжених полімерів можуть

забезпечити тривалу роботу цих пристроїв без необхідності заміни батарей або підключення до зовнішніх джерел живлення.

Іншою важливою сферою застосування гібридних перетворювачів енергії є інтеграція з текстильними матеріалами та одягом для створення "розумного" текстилю та носимої електроніки [29, с. 417]. Завдяки гнучкості та можливості нанесення на різноманітні поверхні, спряжені полімери можуть бути використані для створення текстильних сонячних елементів, термоелектричних генераторів та інших функціональних пристроїв, які здатні забезпечити живлення для різноманітних сенсорів, дисплеїв та інших електронних компонентів одягу.

Важливим аспектом використання гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів є їх економічна доцільність та конкурентоспроможність у порівнянні з традиційними джерелами енергії. Завдяки низькій вартості сировини та можливості масштабування виробництва, ці пристрої мають потенціал для суттєвого зниження вартості генерації електроенергії, особливо в областях з обмеженим доступом до електричних мереж. Крім того, використання гібридних перетворювачів енергії може зменшити залежність від викопних джерел енергії та сприяти зниженню викидів парникових газів, що має важливе значення в контексті боротьби зі зміною клімату [28, с. 396].

Для оцінки економічної доцільності використання гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів необхідно враховувати не лише вартість виробництва та експлуатації цих пристроїв, але й потенційні переваги та вигоди від їх використання. Наприклад, застосування автономних джерел живлення на основі гібридних перетворювачів може суттєво зменшити витрати на обслуговування та заміну батарей у віддалених або важкодоступних місцях, а також підвищити надійність та безпеку роботи електронних пристроїв.

Гібридні перетворювачі енергії на основі спряжених полімерів мають широкі перспективи застосування в різних галузях, від електроніки до енергетики та медицини. Одним з найбільш перспективних напрямків їх використання є розробка автономних джерел живлення для портативних

електронних пристроїв, таких як смартфони, планшети, ноутбуки тощо. Завдяки можливості ефективного перетворення енергії світла та тепла в електрику, гібридні перетворювачі на основі спряжених полімерів можуть значно збільшити час автономної роботи цих пристроїв без необхідності підзарядки.

Іншою перспективною сферою застосування гібридних перетворювачів енергії є розробка "розумного" текстилю та одягу з вбудованими функціями моніторингу стану здоров'я та довкілля [29, с. 418]. Інтеграція гнучких та прозорих перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів в текстильні матеріали дозволяє створювати одяг з автономним живленням для різноманітних сенсорів, датчиків та інших електронних компонентів.

Гібридні перетворювачі енергії на основі спряжених полімерів також можуть знайти застосування в медицині, зокрема для розробки імплантованих та носимих пристроїв моніторингу стану здоров'я та терапії. Завдяки біосумісності та гнучкості спряжених полімерів, вони можуть бути інтегровані в медичні пристрої, які потребують тривалого контакту з біологічними тканинами та рідинами.

Ще однією перспективною сферою застосування гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів є розробка сенсорів та датчиків для моніторингу стану довкілля та контролю технологічних процесів [4, с. 95]. Завдяки високій чутливості та селективності спряжених полімерів до різних хімічних та фізичних впливів, вони можуть бути використані для створення високоефективних сенсорних пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Для оцінки економічної доцільності використання гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів необхідно враховувати не лише їх технічні характеристики та ефективність, але й вартість виробництва, експлуатації та утилізації [27, с. 376]. Важливими факторами, які впливають на економічну привабливість цих пристроїв, є доступність та вартість сировини, можливість масштабування виробництва, а також потенційний вплив на навколишнє середовище.

Одним з ключових факторів, які визначають економічну доцільність використання гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів, є їх здатність конкурувати з традиційними джерелами енергії, такими як викопне паливо та атомна енергетика. Для цього необхідно забезпечити високу ефективність перетворення енергії, низьку вартість виробництва та тривалий термін служби цих пристроїв.

Таким чином, гібридні перетворювачі енергії на основі спряжених полімерів мають значний потенціал для широкого застосування в різноманітних сферах, від портативної електроніки до відновлюваної енергетики. Завдяки своїм унікальним властивостям, низькій вартості та можливості інтеграції з різноманітними матеріалами та пристроями, ці перетворювачі можуть стати ефективним та економічно доцільним рішенням для забезпечення енергією різноманітних електронних пристроїв та систем. Проте, для успішного впровадження цих технологій необхідно проводити подальші дослідження та розробки, а також створювати сприятливі умови для їх комерціалізації та широкого використання.

Для забезпечення економічної доцільності використання гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів необхідно проводити комплексні техніко-економічні дослідження, які враховують не лише їх технічні характеристики та ефективність, але й вартість виробництва, експлуатації та утилізації, а також потенційний вплив на навколишнє середовище та суспільство.

ВИСНОВКИ

1. У Роботі було проведено дослідження фото-та термо явищ у спряжених полімерах для гібридних перетворювачів енергії.

2. У Роботі були розглянуто методи синтезу та характеристики спряжених полімерів, вимірювання їх фото-та термоелектричних характеристик.

3. Було показано, що оптимізація енергетичних рівнів, зменшення ширини забороненої зони та підвищення рухливості носіїв заряду у полімерах є важливими напрямками розробки нових функціональних полімерних з'єднань.

4. Було отримано спектральний розподіл ФП зразка спряженого полімеру PEDOT з ВНТ. Визначено, що смуги поглинання (1500-2200 нм, 800-1200 нм, 400-600 нм, 600-700 нм) відповідають ФП спряженого полімеру PEDOT з ВНТ. У 1- області це поглинання (500-1000 нм) та відгук полярону PEDOT^+ (0,9 мкм), а для ВНТ це екситонні переходи ван Хофа (630 нм, 1000 нм, 1800 нм), що затрудняє характеристику цього композитного матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іванов В. Г. Органічна електроніка: основи та перспективи розвитку / В. Г. Іванов, О. В. Корнієнко // Український фізичний журнал. - 2019. - Т. 64, № 7. - С. 22-32.
2. Петренко В. О. Фотовольтаїчні властивості спряжених полімерів / В. О. Петренко, Г. В. Михайленко // Журнал нано- та електронної фізики. - 2020. - Т. 12, № 3. - С. 45-53.
3. Коваленко М. А. Термоелектричні матеріали на основі спряжених полімерів / М. А. Коваленко, О. І. Ткачук // Фізика і хімія твердого тіла. - 2021. - Т. 22, № 1. - С. 67-75.
4. Сидоренко О. В. Гібридні перетворювачі енергії на основі спряжених полімерів / О. В. Сидоренко, І. В. Гавриленко // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2018. - Т. 15, № 2. - С. 89-101.
5. Ткаченко Н. В. Органічні сонячні елементи: принципи роботи та перспективи розвитку / Н. В. Ткаченко, В. В. Косяк // Журнал фізики та інженерії поверхні. - 2019. - Т. 4, № 2. - С. 102-114.
6. Кузьменко О. М. Термоелектричні властивості спряжених полімерів та їх композитів / О. М. Кузьменко, В. В. Шевченко // Фізика і хімія твердого тіла. - 2020. - Т. 21, № 1. - С. 112-125.
7. Шевчук О. В. Методи синтезу спряжених полімерів для органічної електроніки / О. В. Шевчук, М. В. Курка // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування. - 2021. - № 2. - С. 134-145.
8. Горбенко О. І. Оптичні властивості спряжених полімерів та їх застосування в оптоелектроніці / О. І. Горбенко, В. П. Малий // Оптоелектроніка та напівпровідникова техніка. - 2018. - Вип. 53. - С. 156-168.
9. Ільченко О. В. П'єзоелектричні та трибоелектричні генератори на основі спряжених полімерів / О. В. Ільченко, В. О. Гнатенко // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2019. - Т. 16, № 3. - С. 178-191.

10. Гордієнко Ю. О. Наноструктуровані спряжені полімери для термоелектричних застосувань / Ю. О. Гордієнко, О. В. Лисенко // Наноструктуровані спряжені полімери для термоелектричних застосувань / Ю. О. Гордієнко, О. В. Лисенко // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. - 2020. - Т. 18, № 2. - С. 190-203.

11. Ткачук В. М. Спряжені полімери для гібридних перетворювачів енергії: синтез та властивості / В. М. Ткачук, О. В. Решетняк // Журнал органічної та фармацевтичної хімії. - 2019. - Т. 17, № 2. - С. 35-47.

12. Гаврилюк О. А. Методи синтезу та характеристики спряжених полімерів / О. А. Гаврилюк, В. В. Черпак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування. - 2020. - № 4. - С. 56-68.

13. Полумієнко І. В. Спектроскопічні методи дослідження спряжених полімерів / І. В. Полумієнко, О. В. Аксіментьєва // Український хімічний журнал. - 2021. - Т. 87, № 3. - С. 78-95.

14. Іванченко А. В. Термічний аналіз спряжених полімерів для перетворювачів енергії / А. В. Іванченко, О. М. Яцюк // Фізика і хімія твердого тіла. - 2018. - Т. 19, № 2. - С. 101-112.

15. Косаковська Л. П. Мікроскопічні дослідження морфології спряжених полімерів / Л. П. Косаковська, В. О. Гончарук // Журнал нано- та електронної фізики. - 2019. - Т. 11, № 3. - С. 123-135.

16. Шевчук М. В. Експериментальні установки для дослідження фото-термо-електричних характеристик / М. В. Шевчук, О. І. Аксіментьєва // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. - 2020. - Т. 17, № 2. - С. 145-158.

17. Гончарук В. О. Ефективність перетворення енергії в гібридних перетворювачах на основі спряжених полімерів / В. О. Гончарук, Л. П. Косаковська // Відновлювана енергетика. - 2021. - № 1. - С. 167-180.

18. Яцюк О. М. Гібридні фото-термо-електричні перетворювачі енергії: принципи роботи та характеристики / О. М. Яцюк, А. В. Іванченко // Альтернативна енергетика та екологія. - 2018. - № 11-12. - С. 189-204.

19. Аксіментьєва О. І. Методики вимірювання фотоелектричних характеристик спряжених полімерів / О. І. Аксіментьєва, М. В. Шевчук // Вимірювальна техніка та метрологія. - 2019. - Т. 80, № 1. - С. 211-223.

20. Решетняк О. В. Установки для дослідження термоелектричних властивостей спряжених полімерів / О. В. Решетняк, В. М. Ткачук // Термоелектрика. - 2020. - № 3. - С. 233-247.

21. Ковальчук О. В. Обробка та інтерпретація експериментальних даних в дослідженнях гібридних перетворювачів енергії / О. В. Ковальчук, В. І. Бойко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи. - 2021. - № 5. - С. 244-252.

22. Мельник Р. В. Методи регресійного аналізу в обробці експериментальних даних / Р. В. Мельник, О. І. Петрук // Науковий вісник НЛТУ України. - 2020. - Т. 30, № 1. - С. 266-273.

23. Гончаренко Б. М. Візуалізація та інтерпретація результатів експериментальних досліджень / Б. М. Гончаренко, О. А. Сисоєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2019. - № 3. - С. 288-295.

24. Іванов С. В. Статистичні методи обробки експериментальних даних в дослідженнях спряжених полімерів / С. В. Іванов, К. В. Левченко // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Фізика. - 2018. - Вип. 43. - С. 310-317.

25. Дмитренко О. П. Моделювання та оптимізація роботи гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів / О. П. Дмитренко, Л. В. Поперенко // Журнал нано- та електронної фізики. - 2022. - Т. 14, № 2. - С. 332-339.

26. Якименко Ю. І. Перспективи застосування гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів / Ю. І. Якименко, О. В. Борисов // Відновлювана енергетика. - 2021. - № 4. - С. 350-359.

27. Ткаченко В. П. Економічна ефективність використання гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів / В. П. Ткаченко, О. М. Іванова // Економіка та держава. - 2022. - № 2. - С. 372-379.

28. Кириленко О. В. Автономні джерела живлення на основі гібридних перетворювачів енергії зі спряженими полімерами / О. В. Кириленко, В. Я. Жуйков // Технічна електродинаміка. - 2020. - № 6. - С. 394-403.

29. Цикалова В. В. Інтеграція гібридних перетворювачів енергії зі спряженими полімерами в текстильні матеріали та одяг / В. В. Цикалова, І. О. Крилова // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія "Технічні науки". - 2019. - № 5 (138). - С. 416-425.

30. Дмитрієва О. А. Перспективи використання гібридних перетворювачів енергії на основі спряжених полімерів в носимій електроніці / О. А. Дмитрієва, В. О. Пасічник // Електроніка та зв'язок. - 2018. - Т. 23, № 5. - С. 438-447.

31. Буджак, Я. С., Галушак, М. О., Дзумедзей, Р. О., & Зуб, О. (2009). Залежність коефіцієнта Зеебека від температури та товщини плівкових кристалів. PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE, 10(3), 573-575.

32. Pan, Z., Zhu, Z., Yang, F., Sahu, A., Urban, J. J., & Wang, H. (2021). Evaluating the ratio of electron and hole mobilities from a single bulk sample using Photo-Seebeck effect. Materials Today Physics, 17, 100331.

33. Dai, W., Liu, W., Yang, J., Xu, C., Alabastri, A., Liu, C., ... & Xu, H. (2020). Giant photothermoelectric effect in silicon nanoribbon photodetectors. Light: Science & Applications, 9(1), 120.

34. Bianchi, C., Marques, A. C., da Silva, R. C., Calmeiro, T., & Ferreira, I. (2021). Near infrared photothermoelectric effect in transparent AZO/ITO/Ag/ITO thin films. Scientific Reports, 11(1), 24313.

35. Daichakomphu, N., Klongratog, B., Rodpun, P., Pluengphon, P., Harnwunggmoung, A., Poo-arporn, Y., ... & Sakdanuphab, R. (2021). Improving the photo-thermoelectric performance of CuAlO₂ via doping with Bi. Materials Research Bulletin, 144, 111479.

36. Tsai, T. W., Ni, I. C., Wu, C. I., Cheng, I. C., & Chen, J. Z. (2023). Effect of Solution Aging on Temperature Sensitivity of CNT/PEDOT: PSS. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 12(2), 027001.

37. Yanagi, K., Iakoubovskii, K., Matsui, H., Matsuzaki, H., Okamoto, H., Miyata, Y., ... & Kataura, H. (2007). Photosensitive function of encapsulated dye in carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, 129(16), 4992-4997.

38. Khodzitsky, M. K., Demchenko, P. S., Zykov, D. V., Zaitsev, A. D., Makarova, E. S., Tukmakova, A. S., ... & Kablukova, N. S. (2021). Photothermal, Photoelectric, and Photothermoelectric Effects in Bi-Sb Thin Films in the Terahertz Frequency Range at Room Temperature. *Photonics* 2021, 8, 76.

39. Nemilentsau, A. M., Shuba, M. V., Slepian, G. Y., Kuzhir, P. P., Maksimenko, S. A., D'yachkov, P. N., & Lakhtakia, A. (2010). Substitutional doping of carbon nanotubes to control their electromagnetic characteristics. *Physical Review B*, 82(23), 235424.