

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

ОПТИМІЗАЦЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ПРОЗОРИХ ЕЛЕКТРОДІВ
ДЛЯ ОРГАНІЧНИХ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 курсу, групи _____ ФТОІм-23-1
Янцов В.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Лінник О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)
Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____
(повна назва)
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 175 Інформаційно-вимірювальні технології _____
(код і повна назва)
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма _____ «Фотоніка та оптоінформатика» _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«_____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Янцову Володимирі Володимировичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Оптимізація вибору матеріалу прозорих електродів для органічних оптоелектронних пристроїв _____
затверджена наказом університету від « 22 » листопада 2024 р. № 1230 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 28 січня 2025 р. _____
3. Вихідні дані до роботи _____
 - 1 Фізичні основи прозорих електродів.
 - 2 Основні характеристики прозорих провідних матеріалів.
 - 3 Методи оптимізації вибору матеріалів.
 - 4 Формули для статистичної обробки даних.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____
 - 1 Аналіз конструктивних особливостей сучасних прозорих електродів.
 - 2 Визначення основних параметрів прозорих провідних матеріалів для органічних оптоелектронних пристроїв.
 3. Застосування методу оптимізації вибору матеріалу до основних типів прозорих провідних матеріалів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал – 10 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел за темою роботи	02.09.24–26.09.24	Виконано
2	Дослідження конструктивних особливостей та застосування прозорих електродів	29.09.24–20.10.24	Виконано
3	Дослідження параметрів прозорих провідних матеріалів	25.10.24–08.11.24	Виконано
4	Вибір оптимізаційної методології та її практична реалізація	11.11.24–20.11.24	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.11.24–22.12.24	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	24.12.24–05.01.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	06.01.25–15.01.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	18.01.25–20.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	21.01.25–29.01.25	

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Лінник О.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 44 с., 9 рис., 3 табл., 2 додатки, 29 джерел.

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ, ГРАФЕН, МЕТАЛЕВІ НАНОДРОТИ, МЕТОД ІНДЕКСУ ВИБОРУ ЗА ПЕРЕВАГОЮ, ОРГАНІЧНА ОПТОЕЛЕКТРОНІКА, ПРОЗОРИ ЕЛЕКТРОДИ, ПРОВІДНІ ПОЛІМЕРИ.

Об'єкт дослідження – процес вибору матеріалів для прозорих електродів в органічних оптоелектронних пристроях з урахуванням множини критеріїв.

Метою кваліфікаційної роботи є вибір ефективного методу оптимізації вибору матеріалів та застосувати його до вибору матеріалу прозорих електродів, враховуючи компроміс між важливими характеристиками.

Методи дослідження – теоретичний, аналітичний, обчислювальний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Проаналізувати конструктивні особливості сучасних прозорих електродів.
2. Визначити основні параметри матеріалів для прозорих електродів органічних оптоелектронних пристроїв.
3. Обрати ефективний метод оптимізації вибору матеріалів та розробити його програмну реалізацію.
4. Застосувати метод оптимізації вибору матеріалів для прозорих електродів та проаналізувати отримані результати.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 44 pp, 9 figures, 3 tables, 2 applications, 29 sources.

CONDUCTIVE POLYMERS, GRAPHENE, METALLIC NANOWIRES, MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION, ORGANIC OPTOELECTRONICS, PREFERENCE SELECTION INDEX METHOD, TRANSPARENT ELECTRODES

The object of research is a process of selecting materials for transparent electrodes in organic optoelectronic devices, considering multiple criteria.

Theoretical, analytical, and computational research methods were employed.

The purpose of the work is to select an effective multi-criteria optimization method for material selection and apply it to the choice of transparent electrode materials, balancing critical performance characteristics.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. Analyze the design features of contemporary transparent electrodes.
2. Identify the key parameters and characteristics of materials suitable for transparent electrodes in organic optoelectronic devices.
3. Select the effective multi-criteria optimization method and develop its computational implementation.
4. Apply the chosen optimization method to the selection of transparent electrode materials and analyze the results.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначення.....	7
Вступ.....	8
1 Огляд матеріалів прозорих електродів.....	10
1.1 Прозорі електроди.....	14
1.2 Прозорі нагрівачі.....	18
1.3 Електроди, що розтягуються, і гнучкі підкладки.....	19
1.3.1 Гнучкі електрохімічні суперконденсатори.....	19
1.3.2 Струмопровідні полімерні плівки.....	21
1.3.3 Електроди на основі графену.....	22
1.3.4 Електрод із металевих нанодротів.....	23
1.3.5 Металеві тонкі плівки.....	25
1.3.6 Електроди діелектрик-метал-діелектрик (DMD).....	26
1.3.7 Металеві сітки.....	27
2 Оптимізація вибору матеріалів прозорих електродів.....	31
2.1 Метод індексу вибору за перевагою (PSI).....	32
2.2 Програмна реалізація методу PSI.....	35
2.3 Застосування методу PSI до вибору матеріалів прозорих електродів.....	36
Висновки.....	41
Перелік джерел посилання.....	42
Додаток А Програмний код MATLAB.....	45
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	47

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ОМО – оксидно-металеві структури;

ПЕ – прозорі електроди;

CNT – вуглецеві нанотрубки;

ЕС – гнучкий електрохімічний конденсатор;

GO – оксид графену;

ІТО – оксид індію та олова;

FESC – гнучкі електрохімічні суперконденсатори;

NW – металеві нанодроти;

OLED – органічні світловипромінювальні діоди;

OPV – органічні фотоелектричні прилади;

OSC – органічні сонячні елементи;

PANI – поліанілін;

PEDOT: PSS – полі (3,4-етилendioкситіофен): полістиролсульфонат

PET – поліетилентерефталат;

PSI – індекс вибору за перевагою (preference selection index);

TCO – прозорі електропровідні оксиди.

.

ВСТУП

Прозорі електроди є невід'ємним компонентом новітніх оптоелектронних технологій. Їх здатність забезпечувати високу прозорість та електропровідність дозволяє значно покращити ефективність, функціональність і комфорт у багатьох сучасних пристроях [1].

У виробництві органічних світловипромінювальних діодів OLED-дисплеїв і освітлювальних панелей прозорі електроди забезпечують високу якість зображення, яскравість і енергоефективність. Їх прозорість дозволяє створювати екрани з високим рівнем передачі світла та контрасту.

У фотовольтаїчних пристроях, зокрема органічних сонячних елементах (OSC), прозорі електроди забезпечують проникнення світла в активний шар, де відбувається перетворення енергії. Це дозволяє підвищити ефективність генерації електроенергії [2].

Прозорі електроди забезпечують функціонування сенсорних екранів, оскільки вони одночасно пропускають світло та реагують на дотики, що є важливим для смартфонів, планшетів і інших сенсорних пристроїв.

Використання прозорих електродів в таких пристроях, як розумне скло та інтерактивні вікна, дозволяє змінювати прозорість скла залежно від зовнішніх умов або управляти ними за допомогою електричного сигналу, що підвищує комфорт і енергоефективність будівель [3].

Актуальність роботи обумовлена швидким розвитком гнучкої електроніки, органічних світловипромінювальних діодів (OLED), сонячних елементів та інших пристроїв, де необхідні прозорі, провідні та гнучкі електроди.

Традиційний матеріал для прозорих електродів, зокрема, оксид індію та олова (ITO), має високу оптичну прозорість і електропровідність, проте його використання обмежене низкою факторів [4]. Серед них – висока вартість,

обмеженість ресурсів індію, його токсичність, а також недостатня механічна стійкість, що особливо актуально для сучасних гнучких та складних пристроїв.

Розвиток альтернативних матеріалів для прозорих електродів, таких як графен, металеві нанодропи, надтонкі метали та оксидно-металеві структури (ОМО), сприяє розширенню можливостей для створення ефективних, гнучких та екологічно безпечних оптоелектронних пристроїв. Кожен з цих матеріалів має свої унікальні властивості, але й стикається з певними технічними викликами – від проблем з адгезією до необхідності оптимізації електропровідності та оптичної прозорості. Тому вибір оптимального матеріалу і його характеристик є критично важливим завданням для розробки нових поколінь високоефективних, економічно доцільних і екологічно безпечних пристроїв.

Дослідження в цьому напрямку мають важливе практичне значення, оскільки вони дозволяють вдосконалити технології створення оптоелектронних компонентів для широкого спектра застосувань – від побутової електроніки до енергетики, водночас зменшуючи залежність від дорогих і рідкісних матеріалів.

Метою роботи є вибір критеріїв для оптимізації вибору матеріалу прозорих електродів і порівняння сучасних альтернативних матеріалів.

Для реалізації вказаної мети необхідно виконати наступні завдання:

- а) провести аналіз характеристик основних прозорих електродів;
- б) порівняти показники ефективності матеріалів;
- в) виконати пошук оптимальних матеріалів для оптоелектронних застосувань.

1 ОГЛЯД МАТЕРІАЛІВ ПРОЗОРИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Органічні оптоелектронні матеріали (такі як антрацен) вивчалися на предмет їхніх оптичних та електронних властивостей протягом майже століття, причому найперші дослідження були опубліковані в 1910-х роках. Відкриття провідних полімерів і електролюмінесценції в молекулярних кристалах збільшило інтерес до таких матеріалів у 1960–1970-х роках. Однак протягом останніх 30 років відбулося значне зростання інтересу до області органічної оптоелектроніки через значні досягнення в дизайні та очищенні матеріалів, які значно покращили характеристики матеріалів.

За останні кілька десятиліть оптоелектронні технології, такі як світловипромінювальні діоди (світлодіоди), фотовольтаїка та лазер, широко використовувалися в багатьох сферах сучасного життя, таких як побутова електроніка, телефонія та твердотільні освітлювальні прилади [1]. Завдяки унікальним властивостям, які відрізняють органічні напівпровідники від їхніх неорганічних аналогів, OSC були ретельно вивчені та використані в кількох електричних пристроях з моменту їх створення. Майже всі органічні пристрої являють собою тонкоплівкові багат шарові пристрої, такі як органічні фотоелектричні (OPV) і органічні світловипромінювальні діоди (OLED), які використовують органічні шари як функціональні шари та металеві шари як електроди (рис. 1.1) [2].

Інтерфейси між органічними матеріалами та металом є важливими для підвищення продуктивності пристрою. Сучасні пристрої OPV мають ККД перетворення потужності понад 10 %, що зараз наближається до ефективності, яку промисловість пропонує як необхідну. OLED-дисплеї Samsung з активною матрицею для смартфонів і 55-дюймовий OLED-телевізор LG є двома прикладами комерційно доступних дисплеїв, які використовують технологію OLED.



Рисунок 1.1 – Схематичні конфігурації пристроїв тонкоплівкового транзистора (TFT), органічного світловипромінюючого діода (OLED) і органічної фотоелектричної системи(OPV)

Нейтральна механічна площина, де напруга зменшується, а також оптимізація товщини та модуля – це два методи, які часто використовуються для підвищення гнучкості. Такі гнучкі електронні товари, як гнучкі екрани YOUM від Samsung, вже випущені і незабаром буде доступний для покупки [3]. Ці гаджети не можна вважати розтяжною електронікою, хоча вони захоплюючі та, можливо, корисні. Неважливо, наскільки гнучкою є технологія, її все одно не можна зігнути, як завгодно. Навпаки, плоский аркуш паперу неможливо легко розтягнути або вільно деформувати будь-яким іншим способом, не зламавши його. Наприклад, плоский аркуш паперу може легко зігнутися при згинанні. З іншого боку, тонкий гумовий лист можна згинати, неодноразово розтягувати, стискати, а потім відпускати без остаточної деформації. Таким чином, пристрій має дозволяти розтягування, стиснення та розтягування на додаток до згинання, щоб вважатися еластичним .

На рисунку 1.2 показано деякі комерційно доступні оптоелектронні пристрої, такі як фотодіоди, сонячні елементи, оптичні волокна тощо. Коефіцієнт пропускання підкладки особливо важливий для органічних оптоелектронних пристроїв, особливо коли йдеться про оптоелектронні пристрої та напрямом

падіння світла та відправлення. Іншою важливою оптичною характеристикою є оптичний туман.

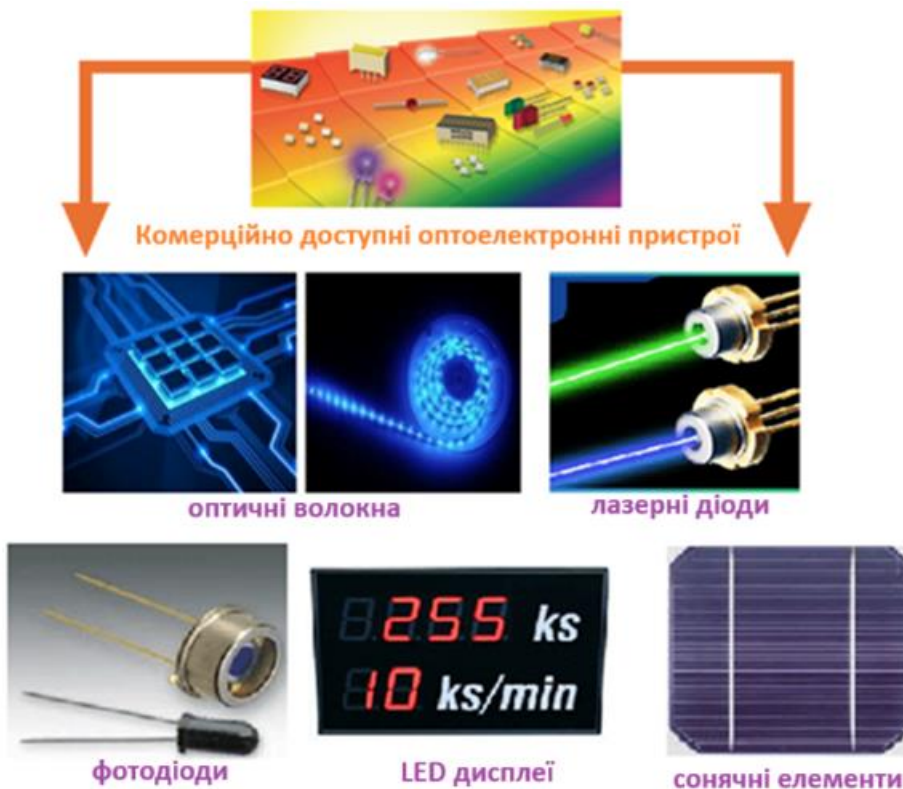


Рисунок 1.2 – Комерційно доступні оптоелектронні пристрої

Опір шару (R_{sheet}) і оптичне пропускання при 550 нм, що є довжиною хвилі, при якій чутливість людського ока є найвищою, можна використовувати для характеристики та порівняння їхніх оптоелектронних характеристик у цілому. Низький шаровий опір (R_s) від 5 Ом/кв до 40 Ом/кв і високий коефіцієнт оптичного пропускання 90 % при 550 нм оксиду індію та олова (ІТО) зробили його ефективним вибором для промислового стандарту прозорих електродів [2].

На жаль, через високу вартість індію, потребу у дорогих вакуумних процесах і механічну крихкість стандартні плівки ІТО не підходять для оптоелектронних застосувань наступного покоління, таких як гнучкі дисплеї, згортаються сонячні батареї та носимі електронні гаджети. Однак потреба в гнучких замінах крихких

ІТО була викликана специфікаціями гнучкості оптоелектронних пристроїв наступного покоління. На рисунку 1.3 показано схематичну схему типових компонентів звичайних суперконденсаторів і гнучких електрохімічних конденсаторів (ЕС) на основі вуглецю.

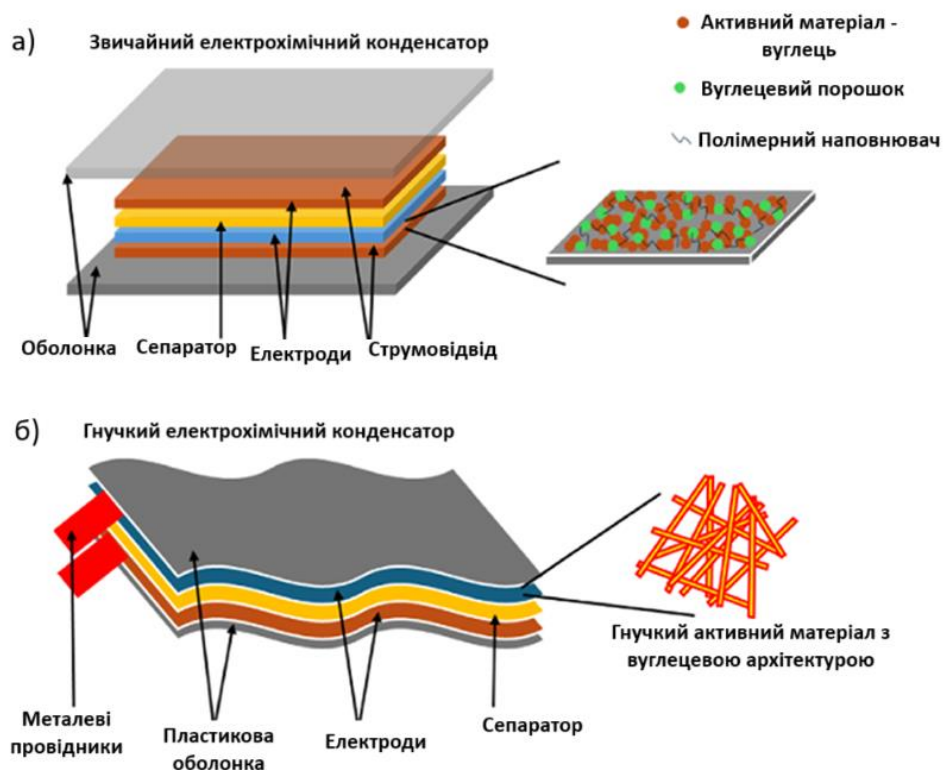


Рисунок 1.3 – Схематичні ілюстрації (а) типових компонентів звичайних суперконденсаторів і (б) гнучких ЕС на основі вуглецю

Матеріали для гнучких і прозорих електродів мають великий потенціал, включаючи вуглецеві нанотрубки (CNT), металеві нанодропи, металеві сітки, графен і провідні полімери.

Сонячні батареї та екрани наступного покоління також повинні бути розтяжними на додаток до прозорих і гнучких [4]. Розтяжність дозволяє застосовувати необхідні деформації, такі як скручування, згинання, зминання та розтягування, відповідно до будь-якої довільної криволінійної поверхні та вільно

переміщатися в рухомих з'єднаннях. Однак одночасне отримання високої еластичності, чудової оптичної прозорості та низького опору листів у гнучких провідниках є складним завданням. Оскільки ці характерні властивості стикаються з труднощами в новій гібридно-новій структурі та розробці мікроструктур або візерункових плівок, які можуть розтягуватися, зберігаючи ту саму провідність, наприклад, серпантини або сітчасті візерунки, надаємо огляд поточних розробок у ІТО альтернативи в цьому дослідженні, яке охоплює літературу з 2010 р. до початку 2023 р. Молекулярне пакування в дизайні матеріалів додатково підкреслює потенціал молекул для розробки та проектування потужних органічних матеріалів і систем. Крім того, цей аналіз дав критичну оцінку проблем і перспектив подальших досліджень.

1.1 Прозорі електроди

Особливий клас матеріалів з оптичною прозорістю та електропровідністю відомий як прозорі електроди (ПЕ).

Транзистори та ПЕ є життєво важливими частинами багатьох сучасних гаджетів, у тому числі сонячних панелей, рідкокристалічних дисплеїв (LCD), органічних світлодіодів (OLED), прозорих обігрівачів, розумних вікон тощо. Прозорі електропровідні оксиди (ТСО) історично мали монополію в галузі ПЕ. Широкий спектр практичних застосувань став можливим ще в 1950-х роках завдяки розробці широкозонних напівпровідників з високою оптичною прозорістю ($> 80\%$), таких як SnO_2 та In_2O_3 , і здатності підвищувати їхню провідність за рахунок легування домішки. Таким чином, як на рівні лабораторії, так і на промисловому рівні існує ціла промислова екосистема та сукупність знань, пов'язаних із ТСО. Завдяки більш ніж 60-річним інтенсивним дослідженням плівок з оксиду індію-олова (ІТО) із чудовими оптичними та електричними характеристиками найпопулярніші ПЕ-матеріали сьогодні можуть бути виготовлені

за допомогою передових методів вакуумного напилення. ІТО не підходить для деяких застосувань, особливо для гнучких пристроїв, через проблеми з його керамічною природою та дефіцитом індію. Значний прогрес, досягнутий у пошуках нових матеріалів із покращеними властивостями, такими як більша гнучкість, стабільність, велика кількість сировини та зниження витрат на обробку, поставив під загрозу домінування ІТО у секторі [5].

Досліджуються три основні типи матеріалів для ПЕ на додаток до ТСО:

- провідні полімери, такі як полі (3,4-етилендіокситіофен): полі (стиролсульфонат);
- вуглецеві наноматеріали, такі як вуглецеві нанотрубки (CNT) або графен;
- металеві наноструктури, такі як тонкі металеві плівки, металеві нанодропи або волокнисті мережі, або металеві сітки.

Ці наноматеріали потенційно можуть вирішити найсерйозніші проблеми ІТО, як продемонстрували численні дослідження, проведені з ними. Перспективними кандидатами серед альтернатив є термоелектрики на основі металу ПЕ через їх високу власну електропровідність, їх здатність використовувати наноструктури для досягнення високої оптичної прозорості та їх високу схильність до набуття додаткових властивостей, таких як розтяжність, гнучкість, регульоване вирівнювання забороненої зони та матовість при поєднанні з іншими матеріалами. Ще в 1877 р. методи розпилення та випаровування використовувалися для вивчення та створення металевих ПЕ. Варто зазначити, що, незважаючи на те, що ІТО сьогодні є найбільш широко використовуваним ПЕ, найперші зареєстровані випадки використання ПЕ були на селенових фотоелементах у 1880-х роках, коли використовувалися металеві ультратонкі плівки, такі як срібло, золото або платина. На початку сегнетоелектрична пам'ять, пристрої формування зображень, прозорі обігрівачі вікон літаків (для систем розморожування та усунення запотівання) і перетворення сонячної енергії були одними із застосувань, які привернули велику увагу до ПЕ на основі металів та оксидів. Оскільки метали зберігають високу

щільність вільних електронів ($> 10^{22} \text{ см}^{-3}$) на нанорозмірі, металеві наноматеріали є привабливими як ПЕ. Найбільшим електропровідником при кімнатній температурі є Ag, провідність якого $6,3 \times 10^7 \text{ См/м}$. У результаті матеріали на основі Ag мають великі шанси функціонувати як ефективні ПЕ [2].

Незважаючи на те, що електроди, виготовлені з наноструктур Ag, були предметом кількох досліджень, інші метали, такі як Cu та Ni-Cu, зараз також досліджуються. Пластичність металів, на відміну від TCO, є ще однією перевагою. Ця пластичність ще більше покращується, коли метал формують на нанорозмірі. Навпаки, недоліком високої густини вільних електронів є те, що однорідні металеві шари часто мають низьку оптичну пропускну здатність через високу відбивну здатність металів. Щоб підвищити прозорість ПЕ на металевій основі, було зроблено кілька ініціатив. Приклади ефективних ПЕ включають ультратонкі металеві плівки та неперервні металеві наноструктури, такі як періодичні металеві сітки та випадкові металеві нанодротяні мережі. Незважаючи на те, що ІТО використовувався в широкому діапазоні програм, не всі програми вимагають однакових стандартів ПЕ.

Гнучкі ПЕ повинні мати видатні оптичні, електричні та механічні характеристики, щоб використовуватися в гнучкій і розтяжній оптоелектроніці, такій як OLED, OSC і сенсорні екрани. Провідник ІТО став найбільш широко використовуваним матеріалом TCE для OLED та OSC за останні роки. Для комерційних тонких плівок ІТО оптичне пропускання у видимій області становить близько 80 %, а опір шару (R_s) зазвичай становить 20 Ом/кв. Однак рідкісний і делікатний характер ІТО перешкоджає майбутньому розвитку гнучкої оптоелектронної технології. Щоб знайти альтернативи, було досліджено різноманітні матеріали як потенційну заміну ІТО.

Було запропоновано шість видів матеріалів TCE для використання в OLED та OSC або органічних оптоелектронних пристроях. Основні ознаки, які відображають ці шість категорій, узагальнено в таблиці 1.1 [2].

Таблиця 1.1 – Аналіз відомих прозорих провідних матеріалів

Типи	Матеріали	Коефіцієнт пропускання (%)	Опір шару R_s ($\Omega/\text{кв}$)	Гнучкість	Застосування	Сумісність з гнучкою підкладкою
Електропровідні полімери	PDMS/PEDOT: PSS	84 %	4,17	гнучкий	OSC	так
	Оброблений кислотою PEDOT: PSS	> 90 %	95	гнучкий	OLED	так
	Оброблений УФ PEDOT: PSS	81 %	57	гнучкий	OLED & OSC	так
	Ag@f-RGO/PEDOT: PSS	88 %	18	гнучкий	–	так
Електроди на основі графену	PET/Single layer Graphene film/Gra HIL	97,70 %	1	гнучкий	OLED	так
	Graphene Oxide /Graphene PMMA	90 %	40	гнучкий	OLED	так
	RGO/SWNT/PMMA	85 %	153	гнучкий	–	так
	Graphene RGO-SWCNT hybrid	58,1 % (5th layer)	254	гнучкий	OSC	так
Електроди з металевими нанодротями	Embedded Ag network PET	85 %	33	гнучкий	OLED	так
	Ag NWs PDMS	17,66 %	–	розтягується	–	ні
	Cu NWs PET	84,10 %	23,1	гнучкий	–	так
	Ag NWs film	80 %	20	гнучкий	OLED	так
	Au NWs CuNi nano mesh PDMS	77,4–94,1 %	від 6 до 30	гнучкий	–	так
	Ag NWs PET	> 87 %	< 5	розтягується	OSC	ні
	Ag NWs PU	80 %	< 10	гнучкий	сенсори	так
	Ag NWs	88,50 %	0,4	гнучкий	Touch Screen	ні
	вуглецеві нанотрубки	80–90 %	< 1000	гнучкий	OLED & OSC	так
	металеві нановолокна	~ 90 %	~ 1,3	гнучкий	OLED	так
Леговані оксиди металів	CNT/SWNT	78 %	< 10	розтягується	OLED	ні
	Indium Tin Oxide (ITO)	90 %	100	розтягується	OLED & OSC	ні
	ITO coated PET	72 %	182	гнучкий	OSC	так
	ITO coated glass	85 %	183	гнучкий	OLED	так
	PET/ITO	70 %	90	гнучкий	OLED	так
	PPC/ITO	80 %	145	гнучкий	–	так
Гібридні електроди на основі графена з металевими нанодротями	PPC/ITO/Ag/ITO	68 %	6,5	гнучкий	OSC	так
	PEDOT: PSS/Ag NWs/Graphene	83 %	216,6	гнучкий	OLED	так
	PEDOT: PSS/Ag NWs	84,98 %	183,3	гнучкий	транзистори	так
	Graphene/Ag NWs Hybrid	94 %	33	розтягується	дисплеї	ні
DMD електроди	Graphene Metal NW	91 % у видимому діапазоні	< 1	розтягується	транзистори	ні
	ZnS/Ag/WO ₃	> 80 %	від 10 до 20	гнучкий	OLED	так
Металеві решітки	PET/ZnS/Ag/MoO ₃	74,22 %	9,74	гнучкий	OLED	так
	Ag Grid	74 %	2,8	гнучкий	–	так
	Graphene/Ag grid	73 %	12	гнучкий&роз	OSC	так
	PEDOT: PSS/Ag honeycomb	85 %	–	тягується	OLED	так
	CNT/Ag grid	88 %	8,1	гнучкий	TCH	так
	ITO/Cu grid	82,5%	3,8	гнучкий	OLED	так

1.2 Прозорі нагрівачі

Ефект Джоуля служить основою для прозорого нагрівача. Дж. П. Джоуль (1818–1889) експериментально довів закон, згідно з яким кількість тепла, що виділяється за одиницю часу, коли електричний струм I проходить через однорідний провідний матеріал з електричним опором u . Завдяки балансу між втратою тепла та ефектом Джоуля, енергія, що витрачається в матеріалі, безпосередньо корелює з досягнутою температурою в стаціонарному стані. Три основні фізичні причини цих теплових втрат – теплопровідність до підкладки або через провідні з'єднання, конвекція до навколишнього повітря та випромінювання, що випромінюється від гарячих поверхонь. Ці втрати являють собою загальну теплопередачу від термопари.

Дедалі більшим попитом користуються прозорі обігрівачі та унікальні резистори, які можуть виробляти джоулеве тепло та пропускати видиме світло, стаючи дедалі популярнішими як засіб для запобігання запотіванню вікон і дзеркал. Ефективність прозорого нагрівача в основному визначається двома ключовими параметрами: оптичним пропусканням і опором листа. Прозорі обігрівачі з високим коефіцієнтом прозорості ідеально підходять для перископів і лобового скла автомобіля, серед інших застосувань, які потребують безперешкодного огляду. Окрім низької вхідної потужності, низький опір шарів також необхідний для швидкої підтримки високої температури насичення. Оптичне пропускання та опір шару зазвичай мають поступитися одне одному. Завдяки своїм винятковим оптоелектронним якостям ІТО тривалий час займав домінуючі позиції в галузі прозорого опалення. Однак обмежена гнучкість, повільна реакція на температуру та зростання вартості джерела індію не дозволяють ІТО знайти ширше промислове використання. Сьогодні металеві нанодропи (NW), металеві дротяні сітки, вуглецеві нанотрубки (CNT), графен та інші гібридні плівки розглядаються як життєздатні альтернативи ІТО як прозорі провідники або нагрівачі [3]. Через високий

контактний опір між сусідніми нанотрубками та листами прозорі нагрівачі на основі вуглецю належать до тих, що мають високий опір шару R_S . Завдяки високій концентрації електронів металеві нанодропи і сітки мають набагато кращу електропровідність. Нерівномірний тепловий розподіл є наслідком схильності хімічно виготовлених металевих наносіток до групування разом під час операцій диспергування на основі розчину .

1.3 Електроди, що розтягуються, і гнучкі підкладки

На жорстких підкладках, які часто є крихкими та не здатними деформуватися, будують традиційні електричні та оптоелектронні пристрої. Щоб взаємодіяти з людьми та іншими середовищами новими способами, все ж зростає потреба в технологіях наступного покоління, які можуть гнутися та розтягуватися. Електроніка, що розтягується, має потенціал для створення нових класів пам'яті, що деформується та розтягується, дисплеїв, фотоелектричних пристроїв, датчиків, електронної шкіри, накопичувачів енергії та суперконденсаторів, революціонізуючи технології в секторі електроніки [4]. На цьому етапі дуже важливо визначити термін «розтягнутий» з огляду на тему огляду та для ясності. Системи, що розтягуються, повинні бути більш ніж просто гнучкими; вони також повинні бути гнучкими. Вони також повинні функціонувати за наявності деформацій, які включають значні зміни форми та розміру, які можуть бути досить серйозними.

1.3.1 Гнучкі електрохімічні суперконденсатори

Гнучкий електрохімічний конденсатор (гнучкий ЕС) зазвичай складається з сепараторів, рідких і твердих електролітів, симетричних і асиметричних позитивних/негативних електродів і гнучого пластикового зовнішнього контейнера.

Гнучкі електрохімічні суперконденсатори (FESC), як і звичайні суперконденсатори, в основному складаються з функціональних електродів, колекторів і електроліту. Враховуючи те, що його компоненти мають бути гнучкими, FESC досягають виняткових електрохімічних характеристик завдяки використанню високоефективних гнучких електродів і використанню гнучкого електроліту та колектора.

Хороша гнучкість так само важлива для носимих і портативних суперконденсаторів, як і електрохімічні характеристики. Залежно від компонентів, що використовуються, FESC можуть демонструвати різноманітні характеристики та здібності, включаючи стисливість, розтяжність, згинання та скручування. FESC мають відмінні властивості, які роблять їх придатними для багатьох застосувань. Основним пріоритетом дизайну гнучких конденсаторів є розробка матеріалів гнучких електродів для виробництва FESC.

Серед них основний компонент електродів гнучкого ЕС часто виготовляється з матеріалів, що містять окремо стоячий вуглець. Ці сполуки вуглецю можуть діяти і як електроди, і як струмоприймачі, і зазвичай мають виняткову гнучкість і високу провідність. Оскільки електроактивні порошкові компоненти гнучких ЕС з'єднуються разом без потреби в сполучних речовинах, провідних добавках або окремих струмоприймачах, вони простіші у використанні, ніж стандартні.

Таким чином, ці адаптивні ЕС повинні демонструвати наступні дві стратегічні переваги:

- 1) конструкції пристрою: окремо стоячі вуглецеві матеріали використовуються безпосередньо як електроди та струмоприймачі, тоді як м'які пластики (такі як тефлонові плівки, сополімери етилену/вінілацетату, поліетилентерефталат і полідиметилсилоксан) зазвичай використовуються як упаковка. Як результат, ці обтічні ЕС значно економлять вагу та простір, крім того, що вони тонші, легші та гнучкіші, ніж традиційні ЕС;

2) матеріали електродів: для створення початкової пасти потрібні класичні ЕК, певні сполучні та подрібнений електродний матеріал. Потім можна виготовити відповідні електроди, помістивши отриману пасту на струмоприймач. Таким чином, ці процеси неминуче призводять до наступних проблем: Довгі електропровідні канали у вуглецевому компоненті розбиваються асиметричною сумішшю порошкоподібних компонентів.

Електроліт не може проникнути крізь електроди через:

- блокування ділянок електроактивного матеріалу;
- закриті ділянки електроактивного матеріалу;
- погано пов'язаний об'єм пустот, широко відомий як «мертвий об'єм», в електродах.

Електроактивні хімічні речовини можуть бути швидко залиті в гнучкі вуглецеві каркаси для формування електродів для гнучких ЕС. Цей тип ЕС напроцуд готовий до пристроїв, здатний вибирати вуглецевий субстрат для регулювання геометрії пор і здатний підтримувати безперервні електропровідні шляхи через макроскопічний вуглецевий каркас. Тому вони можуть досягти неймовірних електрохімічних характеристик.

1.3.2 Струмопровідні полімерні плівки

Гнучкі екрани та сонячні батареї привернули увагу завдяки своїй мобільності, малій вазі та тонкості. Тонкі плівки з поліетилентерефталату (PET) використовуються в оптоелектронних додатках, причому прозорі електроди є важливими для їх ефективності [6].

Однак ІТО є крихким і може викликати тріщини після циклів згинання, знижуючи надійність пристрою. Поліанілін (PANI), полі (3,4-етилендіокситіофен): полістиролсульфонат (PEDOT: PSS), провідний полімер із чудовими механічними властивостями, розглядається для електродних плівок у гнучких оптоелектронних

пристроях. Такі обробки, як розчинники, відпал або легування металевими наночастинками, можуть збільшити провідність PEDOT: PSS. Обробка ультрафіолетовим озonom часто використовується для посилення роботи PEDOT: PSS, але оброблені плівки виявляють на два порядки більшу стійкість, ніж необроблені. Низька вільна поверхнева енергія гнучких субстратів призводить до поганого зчеплення, що вимагає подальшої модифікації поверхні. Для усунення цих проблем рекомендується попередня УФ-обробка поліетилентерефталатом (PET).

1.3.3 Електроди на основі графену

Завдяки високій оптичній прозорості та потенціалу балістичного транспорту, тобто здатності електронів залишатися неушкодженими навіть при кімнатній температурі, двовимірні (2D) матеріали широко рекомендуються як прозорі електроди. Графен на сьогоднішній день є найдосконалішим двовимірним матеріалом, навіть незважаючи на відсутність забороненої зони, і спочатку він був запропонований як потенційний прозорий провідник. Електродні матеріали на основі графену мають середнє оптичне пропускання близько 95 % і середній опір близько 100 Ом/кв [7].

Спільнота органічної оптоелектроніки приділила багато уваги графену та його похідним, включаючи оксид графену (GO) і відновлений оксид графену (RGO). Їх використання в об'ємному гетеропереході (Bulk Heterojunction) (BHJ) сонячних елементів і фотозаломленні (Photo Refractive) (PR) матеріалів як заміна анодів (таких як ITO), катодів, проміжних шарів транспортування дірок (таких як PEDOT: замінити PSS), проміжних прошарків екстракції електронів і акцептора електронів було доведено існування, і проблеми були виявлені. Наприклад, здатність графенових шарів функціонувати як електроди має бути покращена шляхом зниження опору листа та підвищення прозорості. Щоб графен використовувався як катодний матеріал, потрібен сильніший контроль над його

робочою функцією, наприклад, за допомогою легування. Щоб використовувати його як акцептор електронів у сумішах, змішуваність повинна бути підвищена.

Поки що цей тип рухливості носія був досягнутий лише у відновлених нанорозмірних графенових пластівцях, які генеруються механічним відшаруванням, і на плівках, створених за допомогою хімічного осадження з парової фази на підкладках, що складаються з нітриду бору.

1.3.4 Електрод із металевих нанодротів

Завдяки своїм відмінним якостям, включаючи високу електропровідність, гнучкість і прозорість, металеві нанодроти (NW) часто використовуються як електроди в різноманітних електронних і оптоелектронних пристроях. Срібло (Ag), золото (Au) і мідь (Cu) є популярними кандидатами на матеріали, що використовуються для створення цих нанодротів, хоча можуть використовуватися й інші матеріали. Ці NW електроди мають вирішальне значення для гнучких накопичувачів енергії, антистатичних застосувань і гнучкого і прозорого електропровідного електрода завдяки низькому шаровому опору, технологічності розчину, дешевій ціні та простоті масштабування. Для збільшення оптичного пропускання та зменшення низького опору використовується гібрид із графену або провідних полімерів та металевих нанодротяних електродів. Оскільки металеві нанодроти мають виняткову електропровідність, оптичну прозорість і стійкість до механічних навантажень, вони є іншим типом потенційного матеріалу ПЕ, який може замінити ІТО для гнучкої електроніки. За допомогою таких методів розчину, як спінування або покриття стержнем Майєра, розпилення, струменевий друк або крапельне лиття, NW можуть бути рівномірно розподілені в розчинах і згодом покриті для створення великомасштабних пристроїв. Метод виробництва доступний, стійкий і відтворюваний. Металеві нанодроти можуть легко окислюватися, а зв'язки між ними можуть спричиняти значну шорсткість і нерівний радіус R .

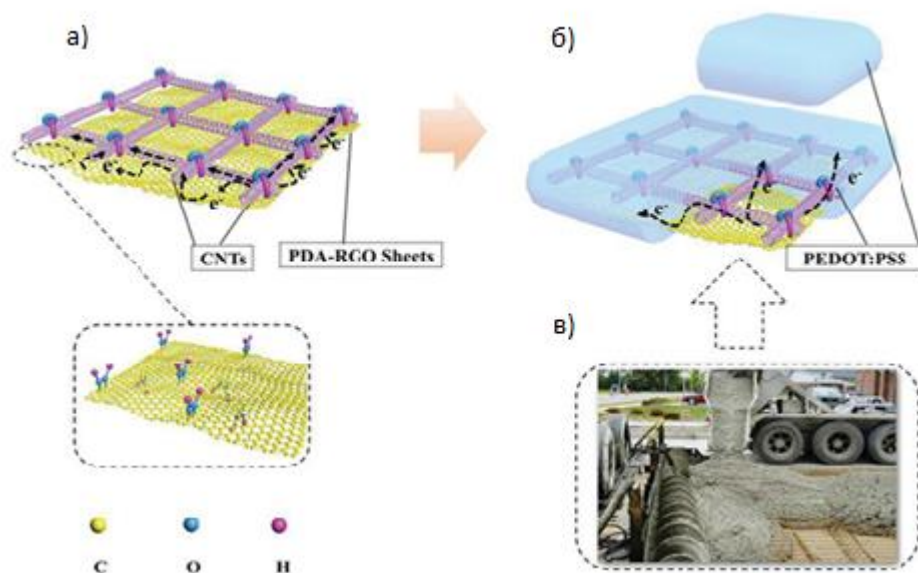
Висока провідність, прозорість, механічна гнучкість і проста обробка AgNW на основі розчину були продемонстровані в кількох застосуваннях. Однак шорстка поверхня оптоелектронних пристроїв має кілька недоліків, таких як погана адгезія, окислення повітрям і коротке замикання. Графен має кілька дивовижних якостей, включаючи сильну провідність у площині, чудову прозорість і механічну гнучкість. Навпаки, надмірно високий опір між межами зерен прозорого провідного електрода може перешкоджати провідності заряду та знижувати загальну провідність електрода.

Популярним електропровідним полімером є PEDOT: PSS, який також легко отримати на підприємствах. Плівки, виготовлені з PEDOT: PSS, мають меншу провідність, ніж інші провідні матеріали, але вони також мають певні відмінні властивості, включаючи чудову прозорість, велику механічну гнучкість, кращу термічну стабільність і просту обробку на основі розчину. Крім того, провідність чистого PEDOT: PSS можна покращити шляхом обробки розчинниками, такими як ДМСО, H_2SO_4 , етиленгліколь.

Нещодавно було досліджено, чи можна металеві нанодоти замість наножолобів гібридувати з графеном. Наскільки нам відомо, не було проведено жодної оцінки потенціалу цієї гібридної конструкції з використанням графену та наножолобів для підвищення ефективності прозорих електродів або розробки носимої електроніки. Бьонг Ван Ан та ін. інтегрував 1D наномережі жолобів у 2D графен без істотного зменшення прозорості. У цій гібридній архітектурі провідні компоненти наномережей жолобів і графена забезпечують одночасну передачу заряду, компенсуючи недоліки іншого компонента (рис.1.4). Цей електрод може зменшити R_s до 1 Ом/кв для прозорості 91 %, зберігаючи незмінні електричні та оптичні характеристики за довгострокових теплових навантажень.

Створення прозорих оксидних напівпровідникових масивів транзисторів, які є гнучкими та діють як джерело/ дренаж і сполучення є одним із способів використання цього типу гібридного електрода. Ці масиви пристроїв мають

потенціал для використання в гнучких електронних системах, які можна носити, у майбутньому, оскільки вони можуть бути прикріплені до різноманітних неплоских підкладок, таких як поверхні листя, людської шкіри та окулярів.



а) PDA–RGO/CNT; б) PDA–RGO/CNT/PEDOT:PSS;
в) зображення залізобетонної конструкції, яка використовується в будівництві.

Рисунок 1.4 – Схематична ілюстрація прозорих провідних структур з ультраадгезією, відносно низькою шорсткістю та чудовою електропровідністю

1.3.5 Металеві тонкі плівки

Гнучкі прозорі провідні тонкі плівки (FTCTF) є важливими компонентами гнучких електронних пристроїв, включаючи сенсорні екрани, органічні сонячні елементи, гнучкі прозорі нагрівачі та органічні електролюмінесцентні діоди (світлодіоди). Через обмеження доступних на даний момент плівок з оксиду індію і олова (ІТО), а саме, дослідники дефіциту індію та керамічної крихкості змушені

шукати альтернативні матеріали для FTCTF. Найбільш перспективними матеріалами FTCTF були визначені металеві нанодропи (NW), зокрема NW Ag і Cu, через їх відмінні механічні, оптичні та електричні властивості. Прозорі провідні тонкі плівки (TCF), є основними частинами багатьох оптико-електронних систем, включаючи рідкокристалічні дисплеї, сонячні елементи, сенсорні панелі, сонячні елементи, електромагнітне захисне скло та органічні світловипромінювальні діоди. Металеві нанодропи (Ag NW і Cu NW) зараз спостерігають сплеск популярності серед навантажувальних матеріалів через їх виняткові механічні та електричні якості. Крім того, металеві NW сітки легко наносяться за допомогою простої та доступної техніки розчинного покриття, і їх можна розподіляти як чорнило.

Незважаючи на те, що вона в 100 разів дешевша за срібло, мідь має меншу стабільність, ніж срібло, тому мережі Cu NW мають значно нижчі оптоелектричні характеристики, ніж Ag NW. Таким чином, Ag NW стали одним із найперспективніших компонентів прозорих електродів майбутнього. У таблиці 1.1 наведено матеріали та їх оптичне пропускання та низький листовий питомий опір NW та металевих плівок.

1.3.6 Електроди діелектрик-метал-діелектрик (DMD)

Відомий приклад типу електрода, який поєднує металеву плівку, шар діелектрика з високим індексом і багат шаровий шар діелектрика з високим індексом. Він має чудову пропускну здатність разом із низьким опором листів і надзвичайною гнучкістю. Зокрема, багат шарові діелектричні шари з високим показником заломлення підвищують пропускну здатність, зменшуючи відображення металеві плівки, викликане руйнівною інтерференцією.

Робота над тепловідбиваючими оптичними фільтрами була відправною точкою для попередніх експериментів з багат шаровими електродами. ZnS/Ag/ZnS, WO₃/Ag/MoO₃, ZnS/Ag/MoO₃, Cs₂CO₃/Ag/ZnS, застосовані до OLED, є кількома

прикладми багатошарових електродів, про які кілька дослідницьких груп повідомляли в різних топологіях. Однак плівки Ag, які використовувалися в цих дослідженнях, були товщі за 10 нм. Оскільки для компенсації падіння коефіцієнта пропускання пристрою потрібне збільшення товщини плівки Ag, через її товщину може бути важко виготовити виключно прозорі OLED. Тому створення дуже прозорих пристроїв вимагає ідеальної мінімальної товщини для безперервних плівок Ag з низьким листовим опором. Через нездатність пристроїв бути прозорими та гнучкими одночасно багатошарові електроди використовувалися в попередніх експериментах як катоди або аноди.

Зменшений коефіцієнт пропускання та кутова залежність спричинені ефектом мікропорожнини, коли товщі металеві шари розміщуються з обох сторін. Високопрозорі гнучкі органічні світлодіоди (TFOLED) мають кращу пропускну здатність і можуть подолати кутову залежність, спричинену ефектом мікропорожнини. Кінцевий продукт мав піковий коефіцієнт пропускання близько 550 нм, що становив 74,22 %, а спостережувані та обчислені коефіцієнти пропускання збіглися. Запропонована конструкція TFOLED мала характеристики J-V-L, які можна порівняти з тими, про які повідомлялося в дослідженнях, де не було втрати ефективності. Крім того, під напругою стиску гнучкі багатошарові електроди на TFOLED залишаються гнучкими. Розрахунки ефекту мікропорожнини також були мінімальними. Таким чином, архітектура TFOLED є потенційною для використання в прозорих, гнучких дисплеях, оскільки вона обходить проблеми з попередніми роботами.

1.3.7 Металеві сітки

Гнучкість регулювання ширини лінії та кроку лінії для оптимізації прозорості та опору слою робить металеві сітчасті електроди головним претендентом на прозорі провідники. Меншого опору слою можна досягти за рахунок зменшення

прозорості шляхом збільшення ширини лінії або зменшення кроку лінії. Для ефективного випромінювання світла OLED часто потребують прозорих електродів. Рисунок 1.5 ілюструє порівняння прозорих електродів.

Металеві сітчасті електроди, такі як срібло або мідь, забезпечують альтернативний підхід. Вони мають сильну електропровідність, але є прозорими, і їх можна зробити дешево за допомогою таких технологій, як електропрядіння, трафаретний друк або фотолітографія. Металеві сітчасті конструкції можуть бути вбудовані в OLED-дисплеї для підвищення ефективності відведення світла. Металеві сітчасті підкладки можуть надати OLED-пристроєм гнучкість, дозволяючи їм згинатися або скручуватися без втрати продуктивності.

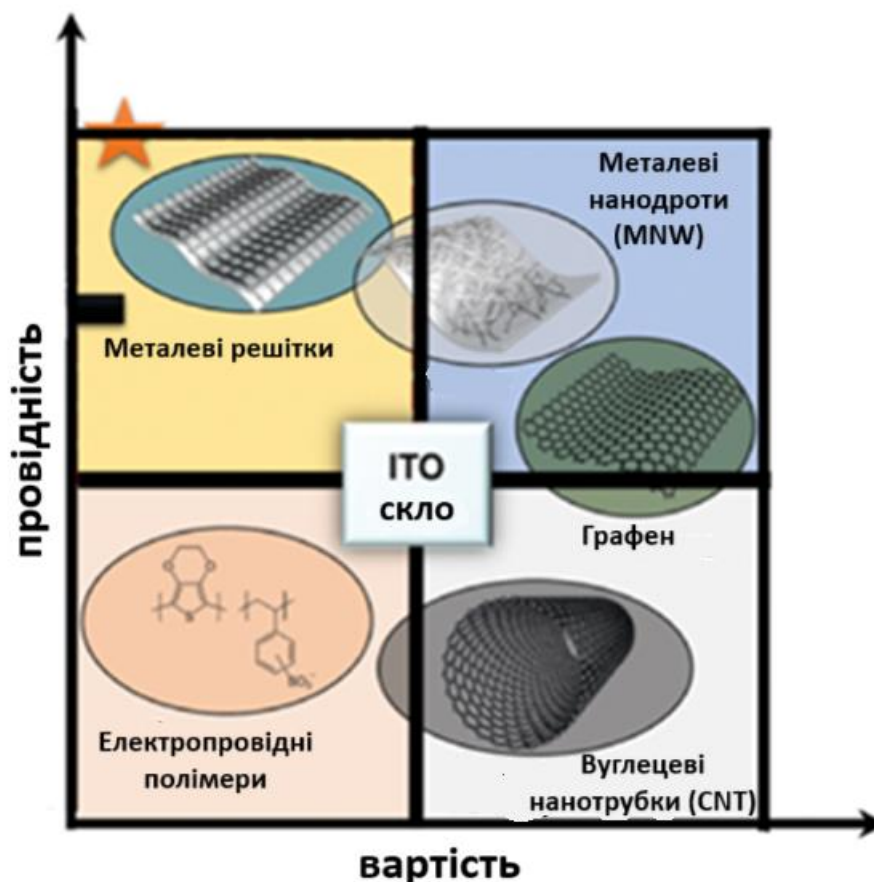


Рисунок 1.5 – Ілюстрація компромісу між комерційним склом ITO та кількома можливими альтернативами

Електроніка носимого типу, вигнуті дисплеї та освітлення транспортних засобів – все це потенційне використання гнучких OLED. Металеві сітчасті підкладки підходять для гнучких OLED-додатків, оскільки вони механічно стійкі та довговічні, але зберігають електропровідність. Металеві сітки також можна використовувати в OLED-пристроях як інкапсуляційний або бар'єрний шар. Ці покриття захищають органічні шари OLED від вологи, кисню та інших забруднювачів навколишнього середовища, збільшуючи термін служби та стабільність.

Металеві сітки можуть діяти як провідні бар'єри, запобігаючи проникненню вологи в структуру пристрою та забезпечуючи додаткову механічну підтримку. Металеві сітчасті структури можна формувати в масиви пікселів, щоб регулювати світловіддачу OLED-пристроїв. Пікселізації та збільшення роздільної здатності дисплея можна досягти шляхом вибіркової активації різних ділянок металевого сітчастого електрода. Цей підхід особливо ефективний для дисплеїв і вивісок великої площі [8]. Загалом металева сітка забезпечує різноманітну основу для покращення продуктивності, функціональності та довговічності OLED-дисплеїв. Металева сітка, використовуючи свої унікальні якості, такі як прозорість, провідність і гнучкість, може подолати критичні проблеми у виробництві OLED і створити дисплеї наступного покоління.

Було проведено аналіз сучасних матеріалів, що використовуються для виготовлення прозорих електродів у різних оптоелектронних пристроях, таких як органічні світлодіоди (OLED), сонячні елементи та сенсорні екрани. Традиційний матеріал оксиду індію та олова (ITO), попри свої переваги у високій прозорості та провідності, має ряд обмежень, зокрема високу вартість, обмеженість ресурсів індію та низьку механічну стійкість.

Було розглянуто альтернативні матеріали, зокрема графен, металеві нанодропи, надтонкі металеві плівки та структури оксид-метал-оксид (ОМО).

Графенові електроди забезпечують високу прозорість і електропровідність, але вимагають вдосконалення методів виробництва для зменшення дефектів і зниження вартості.

Металеві нанодропи відрізняються простотою виготовлення, але мають високу шорсткість поверхні, що може обмежити їх застосування в деяких пристроях.

Оксидно-металеві структури (ОМО) демонструють високі показники електропровідності та прозорості, поєднуючи переваги металів і оксидів.

Таким чином, оптимізація вибору матеріалу прозорих електродів є актуальним завданням для підвищення ефективності та довговічності оптоелектронних пристроїв.

Подальші дослідження слід зосередити на розробці економічно доцільних і технологічно стабільних матеріалів для масового виробництва, які б відповідали вимогам сучасної гнучкої та екологічно безпечної електроніки.

2 ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ПРОЗОРИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Останні досягнення в галузі проектування підкреслюють важливу роль вибору матеріалів для інженерів. Вибір матеріалу не повинен ґрунтуватися виключно на вартості, а також залежить від різних властивостей матеріалу, його доступності, можливості переробки, методу виробництва, методу утилізації, терміну служби тощо [9]. Вибір матеріалу залежить від декількох атрибутів або факторів, тому це є задачею прийняття багатоатрибутного рішення. Вибір відповідного матеріалу є невід'ємною частиною успішної реалізації інженерного проекту. Здатність вибрати найбільш підходящий матеріал для конкретного застосування є одним з основних викликів, з якими стикаються інженери-проектувальники [10]. Необхідний систематичний та ефективний підхід до вибору матеріалів для вибору найкращої альтернативи для конкретного застосування [11–15]. Важливість вибору матеріалів в інженерному проектуванні добре усвідомлюється.

Процес прийняття рішень щодо вибору відповідних матеріалів визначається специфічними вимогами застосування, часто вимогами до властивостей матеріалів [16]. У минулому було проведено багато досліджень щодо вибору матеріалів за допомогою класичних методів прийняття багатоатрибутного рішення. Аналіз за кількома критеріями є популярним інструментом для вибору найкращої альтернативи для заданих застосувань, а методи включають методи простої зваженої суми (SAW), зваженого добутку (WPM), техніку упорядкування переваг за схожістю з ідеальним розв'язком (TOPSIS), метод Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR), аналітичний ієрархічний процес (АНР), підхід, що базується на теорії графів та матричному представленні (GTMA) тощо [17–20]. Рао [19,20] представив підхід, що базується на теорії графів та матричному представленні (GTMA) для вибору матеріалів. Шаніан та Савадого [21] представили метод ELECTRE (ELimination and Et Choice Translating REality) для вибору

матеріалів. Шаніан та Савадого [22] застосували метод TOPSIS як аналіз прийняття рішень за кількома критеріями для вибору матеріалів металевих біполярних пластин для полімерно-електролітних паливних елементів. Маншаді та ін. [23] запропонували числовий метод для вибору матеріалів, що поєднує нелінійну нормалізацію з модифікованим методом цифрової логіки. Чан та Тонг [24] використали підхід сірого реляційного аналізу (GRA) для методу вибору за кількома критеріями. Рао [25] представив покращений метод компромісного ранжування для вибору матеріалів. Рао та Давім [26] описали комбіновану методологію прийняття рішень за кількома критеріями АНП/TOPSIS. Прасенджит та ін. [27] використали методи компромісного ранжування та ранжування за перевагою для вибору матеріалів. Також вибір матеріалів проводиться за допомогою нечіткого прийняття рішень, проектування та вибору матеріалів за допомогою методів прийняття рішень за кількома критеріями [28, 29].

Метою даної роботи є впровадження методу, що називається індексом вибору за перевагою (PSI – Preference selection index), для вибору матеріалу прозорих електродів для органічних оптоелектронних пристроїв. Метод PSI є систематичним науковим методом та інструментом для інженерів-проектувальників для вибору відповідного матеріалу для заданого застосування.

2.1 Метод індексу вибору за перевагою (PSI)

Запропонований підхід є новим методом вибору матеріалів. Більшість методів вибору матеріалів базуються на методах прийняття рішень за множиною критеріїв. Огляд літератури чітко вказує на те, що у всіх існуючих методах прийняття рішень за множиною критеріїв необхідно задавати відносну важливість між критеріями або ваги критеріїв, а також виконувати багато складних обчислень.

У PSI методі немає потреби задавати відносну важливість між критеріями, але в цьому методі загальне значення переваги критеріїв розраховується за допомогою

статистичних понять. Цей метод корисний, коли виникає конфлікт у визначенні відносної важливості між критеріями, і це є перевагою методу PSI. Використовуючи загальне значення переваги, розраховується індекс вибору за перевагою (I_i) для кожної альтернативи, і альтернатива з вищим значенням PSI вибирається як найкраща альтернатива.

Далі наведено детальні кроки для розрахунку.

Крок 1: визначення мети; визначення всіх можливих альтернатив матеріалів, критеріїв вибору та їхніх показників для заданого застосування.

Крок 2: формулювання матриці рішень. Розв'язання будь-якої задачі прийняття рішень за множиною критеріїв починається з побудови матриці рішень. Нехай $A = \{A_i \text{ для } i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ – множина альтернатив, $C = \{C_j \text{ для } j = 1, 2, 3, \dots, m\}$ – множина критеріїв вибору або атрибутів, x_{ij} – продуктивність альтернативи A_i при оцінюванні за критерієм C_j . Тоді матриця рішень представлена у табличній формі, як показано на рисунку 2.1.

Альтернативи (A_i)	Критерії (C_j)			
	C_1	C_2	...	C_m
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1m}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
A_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nm}

Рисунок 2.1 – Матриця рішень

Крок 3: нормалізація даних. Процес перетворення значень атрибутів в діапазоні від 0 до 1 називається нормалізацією, і він необхідний у методах прийняття рішень за множиною критеріїв для перетворення рейтингу продуктивності з різними одиницями вимірювання в матриці рішень в сумісні

одиниці. Якщо очікується, що чим більше, тим краще (тобто прибуток), то початкову продуктивність атрибута можна нормалізувати так:

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}} \cdot \quad (2.1)$$

Якщо очікується, що чим менше, тим краще (тобто витрати), то початкову продуктивність атрибута можна нормалізувати таким чином:

$$R_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}}, \quad (2.2)$$

де x_{ij} – показники атрибутів ($i = 1, 2, 3, \dots, N$ та $j = 1, 2, 3, \dots, M$).

Крок 4: озрахунок значення варіації переваги (PV_j). На цьому кроці визначається значення варіації переваги (PV_j) для кожного атрибута за допомогою аналогії вибіркової дисперсії, використовуючи наступне рівняння:

$$PV_j = \sum_{i=1}^N (R_{ij} - \bar{R}_j)^2, \quad (2.3)$$

де \bar{R}_j – середнє значення нормалізованого значення атрибута j $\bar{R}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij}$.

Крок 5: визначення загального значення переваги (W_j). На цьому кроці визначається загальне значення переваги (W_j) для кожного атрибута. Для отримання загального значення переваги необхідно знайти відхилення (U_j) у значенні переваги (PV_j), а відхилення у значенні переваги для кожного атрибута визначається за допомогою наступного рівняння:

$$U_j = 1 - PV_j, \quad (2.4)$$

а загальне значення переваги (W_j) визначається за допомогою наступного рівняння:

$$W_j = \frac{U_j}{\sum_{j=1}^M U_j}. \quad (2.5)$$

Загальне значення переваги всіх атрибутів повинно дорівнювати одиниці, тобто $\sum_j W_j = 1$.

Крок 6: отримання індексу вибору за перевагою (I_i). Тепер розраховується індекс вибору за перевагою (I_i) для кожної альтернативи за допомогою наступного рівняння:

$$I_i = \sum_{j=1}^M (R_{ij} \times W_j). \quad (2.6)$$

Після розрахунку індексу вибору за перевагою (I_i) альтернативи ранжуються за спаданням або зростанням для спрощення управлінської інтерпретації результатів, тобто альтернатива займає перше місце, якщо її індекс вибору за перевагою (I_i) є найвищим, а альтернатива займає останнє місце, якщо її індекс вибору за перевагою (I_i) є найнижчим і так далі.

2.2 Програмна реалізація методу PSI

Для реалізації методу було створено, наведений в Додатку А, програмний код в MATLAB. Він включає функції для нормалізації даних, розрахунку індексів переваги та ранжування альтернатив.

Цей код припускає, що для всіх критеріїв «чим більше, тим краще». Якщо для деяких критеріїв «чим менше, тим краще», необхідно модифікувати функцію `normalizeData` відповідно до формули (2.2).

Функція `normalizeData` включає обробку випадку, коли всі значення в стовпці однакові (для запобігання ділення на нуль).

2.3 Застосування методу PSI до вибору матеріалів прозорих електродів

Запропонований метод було застосовано до даних, що містять кількісні та якісні характеристики прозорих електродів різних типів. Дані були отримані з відкритих джерел.

На основі попереднього аналізу літературних джерел було відібрано дані про вісім різних типів матеріалів, що розглядаються як потенційні кандидати для прозорого електрода: ІТО, вуглецеві нанотрубки (CNTs), металеві нанодропи (два типи), електропровідні полімери (два типи) та графен (два типи). Для кожного матеріалу наведено значення восьми критеріїв:

- опір шару (чим менший опір, тим кращий матеріал);
- оптична прозорість (чим вища прозорість, тим кращий матеріал);
- світловідбиття (чим менше світло відбивається, тим кращий матеріал);
- світлозахват (чим менше світла поглинається, тим кращий матеріал);
- вартість матеріалу (чим нижча вартість, тим кращий матеріал);
- вартість виготовлення (чим нижча вартість, тим кращий матеріал);
- стабільність (чим вища оцінка, тим краща стабільність);
- гнучкість (чим вища оцінка, тим більша гнучкість).

Важливо зазначити, що критерії мають різні шкали вимірювання та різну природу (кількісні та порядкові). Це потребує застосування методу нормалізації для приведення всіх критеріїв до єдиної шкали.

Нижче описано детальні етапи застосування методу PSI для вибору оптимального матеріалу прозорих електродів.

Крок 1: на основі попереднього аналізу було визначено можливі альтернативи (8 матеріалів), критерії відбору (8 параметрів) та їх безпосередні значення. Результати аналізу представлені на рисунку 2.2.

Матеріали	Опір шару Ом/см2	Оптична прозорість (на 550 нм), %	Світло-відбиття	Світло-захват	Вартість матеріалу	Вартість виготовлення	Стабільність	Гнучкість
ІТО	10	90	високе	високий	висока	висока	добра	погана
Вуглецеві нанотрубки (CNTs)	180	85	низьке	низький	низька	потенційно низька	відмінна	добра
Металеві нанодропи 1	9,7	89	низьке	низький	середня	потенційно низька	середня	добра
Металеві нанодропи 2	30	93	низьке	низький	середня	потенційно низька	середня	добра
Електропровідні полімери 1	42	82	низьке	низький	низька	низька	середня	відмінна
Електропровідні полімери 2	240	97	низьке	низький	низька	низька	середня	відмінна
Графен1	125	97	відсутнє	відсутній	низька	потенційно низька	відмінна	відмінна
Графен2	30	90	відсутнє	відсутній	низька	потенційно низька	відмінна	відмінна

Рисунок 2.2 – Дані аналізу матеріалів прозорих електродів

Крок 2: формування матриці рішень. На цьому етапі було сформовано матрицю прийняття рішень (8 × 8), яку представлено на рисунку 2.3. Нечислові значення критеріїв було трансформовано до бальної шкали.

		критерії							
альтернативи	Матеріали	Опір шару Ом/см2	Оптична прозорість (на 550 нм), %	Світло-відбиття	Світло-захват	Вартість матеріалу	Вартість виготовлення	Стабільність	Гнучкість
	ІТО	10	90	3	3	3	3	4	0
	Вуглецеві нанотрубки (CNTs)	180	85	1	1	1	2	5	1
	Металеві нанодропи 1	9,7	89	1	1	2	2	3	1
	Металеві нанодропи 2	30	93	1	1	2	2	3	1
	Електропровідні полімери 1	42	82	1	1	1	1	3	2
	Електропровідні полімери 2	240	97	1	1	1	1	3	2
	Графен1	125	97	0	0	1	2	5	2
	Графен2	30	90	0	0	1	2	5	2

Рисунок 2.3 – Матриця рішень до вибору матеріалів прозорих електродів

Крок 3: нормалізація даних. На цьому кроці міри критеріїв нормалізуються для перетворення в сумісну одиницю. У цьому дослідженні оптична прозорість, стабільність та гнучкість є вигідними критеріями, тобто бажаним є більш високе значення. Нормалізація значень за цими критеріями відбувалась за допомогою формули (2.1). Інші атрибути є невигідними, тобто бажаним є менше значення. Тому нормалізація значень за цими критеріями відбувалась за формулою (2.2). Результат нормалізації забезпечує приведення всіх показників до діапазону від 0 до 1. Для критеріїв порядкової шкали (стабільність, гнучкість) використана лінійна нормалізація з урахуванням мінімального та максимального значень. Результати нормалізації матриці рішень наведено на рисунку 2.4.

		критерії							
Матеріали		Опір шару	Оптична прозорість	Світло-відбиття	Світло-захват	Вартість матеріалу	Вартість виготовлення	Стабільність	Гнучкість
ITO		0,97	0,92783505	0	0	0,33333333	0,33333333	0,8	0
альтернативи	Вуглецеві нанотрубки (CNTs)	0,05388889	0,87628866	0,33333333	0,33333333	1	0,5	1	0,5
	Металеві нанодоти 1	1	0,91752577	0,33333333	0,33333333	0,5	0,5	0,6	0,5
	Металеві нанодоти 2	0,32333333	0,95876289	0,33333333	0,33333333	0,5	0,5	0,6	0,5
	Електропровідні полімери 1	0,23095238	0,84536082	0,33333333	0,33333333	1	1	0,6	1
	Електропровідні полімери 2	0,04041667	1	0,33333333	0,33333333	1	1	0,6	1
	Графен1	0,0776	1	1	1	1	0,5	1	1
	Графен2	0,32333333	0,92783505	1	1	1	0,5	1	1

Рисунок 2.4 – Нормалізована матриця рішень до вибору матеріалів прозорих електродів

Крок 4: розрахунок значення варіації переваги (PV_j). Значення варіації переваг (PV_j) було обчислено за допомогою формули (2.3). Це дає уявлення про розкид значень для кожного критерію. Результати наведені у таблиці 2.1

Крок 5: Визначення загального значення переваги (W_j). На основі значень PV_j було визначено значення W_j за формулами (2.4) та (2.5). Ці значення відображають відносну важливість кожного критерію, враховуючи розкид значень.

Таблиця 2.1 – Розрахунок загальних ваг критеріїв

Розрах. індекси	Критерії							
	Опір шару	Оптична прозорість	Світло-відбиття	Світло-захват	Вартість матеріалу	Вартість виготовлення	Стабільність	Гнучкість
PV_j	0,351127	0,0000149	0,210069	0,210069	0,210069	0,0733507	0,000625	0,472656
U_j	0,648873	0,999985	0,789931	0,789931	0,789931	0,9266493	0,999375	0,527344
W_j	0,100258	0,154509	0,122053	0,122053	0,122053	0,1431778	0,154415	0,081481

Крок 6: отримання індексу вибору за перевагою (I_i). Для кожного матеріалу було обчислено індекс I_i за формулою (2.6). Цей індекс представляє собою зважену суму нормалізованих значень показників, де ваги визначаються значеннями W_j . Результати наведено в таблиці 2.2.

Далі матеріали були ранжовані за спаданням значень I_i . Матеріал з найбільшим значенням I_i вважається найкращим за сукупністю критеріїв.

Таблиця 2.2 – Результати ранжування матеріалів

Матеріали	Індексу вибору за перевагою (I_i)	Пріоритет
ІТО	0,45255152	8
Вуглецеві нанотрубки (CNTs)	0,61096323	5
Металеві нанодропи 1	0,5893977	5
Металеві нанодропи 2	0,52792777	5
Електропровідні полімери 1	0,67449997	4
Електропровідні полімери 2	0,67929033	3
Графен1	0,83593287	2
Графен2	0,84941954	1

Результати застосування методу PSI демонструють, що за даними критеріями, найкращим матеріалом для прозорого електрода є Графен1, за ним слідують ІТО,

Металеві нанодрти 1 та Графен2. Це свідчить про те, що метод PSI ефективно врахував компроміси між різними критеріями, надаючи перевагу матеріалам з високою прозорістю та гнучкістю, навіть незважаючи на вищу вартість.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було проведено дослідження з метою оптимізації вибору матеріалу для прозорих електродів, що використовуються в органічних оптоелектронних пристроях.

Був проведений ретельний аналіз наукових публікацій, присвячених властивостям та застосуванню різних матеріалів для прозорих електродів (ІТО, графен, металеві нанодропи, провідні полімери та ін.). Це дозволило визначити основні характеристики, переваги та недоліки кожного з них.

На основі аналізу літератури та вимог до прозорих електродів було сформовано систему критеріїв для оцінки різних матеріалів. Враховувалися такі характеристики як електричний опір, оптична прозорість, світловідбиття, світлопоглинання, вартість, стабільність та гнучкість.

Для вибору оптимального матеріалу був застосований метод індексу вибору за перевагою (PSI). Цей метод обрано через його простоту та відсутність необхідності у визначенні ваг критеріїв, що є важливим у випадку конфліктуючих критеріїв. Для автоматизації обчислень було розроблено програмний код, який реалізує метод PSI у середовищі MATLAB.

Отримані за допомогою методу PSI результати продемонстрували ранжування альтернативних матеріалів и найкращим матеріалом було визначено графен.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових поколінь оптоелектронних пристроїв з покращеними характеристиками. Запропонований метод є корисним інструментом для інженерів-проектувальників при розробці та оптимізації оптоелектронних пристроїв, особливо в умовах обмежених ресурсів та конфліктуючих вимог до матеріалів. Розроблений програмний код може бути використаний для подальших досліджень та розрахунків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Афанасьєва О.В. Функціональні матеріали оптоелектронної техніки. Частина друга: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2019. 172 с.
2. Ravikumar K., Dangate M. S. Advancements in stretchable organic optoelectronic devices and flexible transparent conducting electrodes: Current progress and future prospects. // Heliyon. 2024. Vol. 10, No. 1. P. e33002.
3. Chen Z. et al. Analysis of the Effect of Graphene, Metal, and Metal Oxide Transparent Electrodes on the Performance of Organic Optoelectronic Devices. // Nanomaterials. 2022. Vol. 13, No. 1. P. 25.
4. Hofmann A.I., Cloutet E., Hadziioannou G. Materials for Transparent Electrodes: From Metal Oxides to Organic Alternatives // Advanced Electronic Materials. 2018. Vol. 4, No. 10.
5. Morales-Masis M., Wolf S. De, Woods-Robinson R. et al. Transparent Electrodes for Efficient Optoelectronics // Advanced Electronic Materials. 2017. Vol. 3, No. 5.
6. Lee H., Jiang Z., Yokota T., Fukuda K., Park S., Someya T. Stretchable organic optoelectronic devices: design of materials, structures, and applications // Material science and engineering: R: Reports. 2021. P. 100631.
7. Студеняк І.П., Сусліков Л.М. Оптичні властивості кристалічних та некристалічних матеріалів: навчальний посібник. Ужгород: УжНУ Говерла, 2021. 272 с.
8. Anufriiev V., Kravchuk O., Levchenko Y., Hlukhova H., Linnyk E., Glukhov O. Perspective of Creating a Low-Cost Medical Assistant Robot Based on the WafflePI4 Platform with a Palm Vein Pattern Scanner. Preprints URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202403.1696/v1> (дата звернення 16.12.2024)

9. Мельнікова Л.І., Лінник О.В., Пастушенко І.Ю. Оцінка інтернет-провайдерів України: модель багатокритеріального прийняття рішень. *Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (іtk-2024)*: матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Харків, ХНУРЕ, 2024.

10. Linnyk E., Melnikova L., Levchenko O. Heuristic Solutions to Route Optimization for Autonomous Robot Assistant. *Problems of Infocommunications, Science and Technology: IEEE International Scientific-Practical Conference, PIC S&T 2024*. Kharkiv, Ukraine.

11. Fisher P.E., Lawrence W. Selection of engineering materials and adhesives. 1st Edition.. Taylor & Francis Group: CRC Press, 2005. 608 p.

12. Ashby M.F., Johnson K. Materials and design: the art and science of materials selection in product design. Oxford: Butterworth Heinemann, 2002. 416 p.

13. Farag M. Materials selection for engineering design. New York: Prentice-Hall, 1997. 513 p.

14. Edwards K.L. Selecting materials for optimum use in engineering components // *Mater & Design*. 2005. Vol. 26, No. 5. P. 469–473.

15. Deng Y.M., Edwards K.L. The role of materials identification and selection in engineering design // *Materials & Design*. 2007. Vol. 28, No. P. 131–139.

16. Edwards K.L., Deng Y.M. Supporting design decision-making when applying materials in combination // *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. P. 1288–1297.

17. Chen S.J., Hwang C.L. Fuzzy multiple attribute decision-making methods and applications. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin: Springer-Verlag. 1992.

18. Hwang C.L., Yoon K.P. Multiple attribute decision-making: methods and applications. New York: Springer, 2012. 269 p.

19. Rao R.V. Decision making in the manufacturing environment using graph theory and fuzzy multiple attribute decision-making methods. London: SpringerVerlag. 2007.

20. Roa R.V. A material selection model using graph theory and matrix approach // *Mater Sci Eng A*. 2006. Vol. 431, No (1–2). P. 248–255.
21. Shanian A, Savadogo O. A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making // *Materials & Design*. 2006. Vol. 27. P. 329–337.
22. Shanian A, Savadogo O. TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell // *J Power Sources*. 2006. Vol. 159. P. 1095–1104.
23. Manshadi B.D., Mahmudi H., Abedian A., Mahmudi R. A. Novel method for materials selection in mechanical design: combination of non-linear normalization and a modified digital logic method // *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. P. 8–15.
24. Chan J.W.K., Tong T.K.L. Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: grey relational analysis approach // *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. P.1539–1546.
25. Rao R.V. A decision-making methodology for material selection using an improved compromise ranking method // *Materials & Design*. 2008. Vol. 29, No 10. P. 1949–1954.
26. Rao R.V., Davim J.P. A decision-making framework model for material selection using a combined multiple attribute decision-making method // *Int. J. Adv. Manuf. Technol*. 2008. Vol. 35. P. 751–760.
27. Chatterjee P., Athawale V. M., Chakraborty S. Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. // *Materials & Design*. 2009. Vol. 30, No 10. P. 4043–4053.
28. Liao T.W. A fuzzy multi-criteria decision-making method for material selection // *J Manuf Syst*. 1996. Vol. 15. P. 1–12.
29. Ashby M.F. Multi-objective optimization in material design and selection // *Materials & Design*. 2000. Vol. 48. P. 359–69.