УДК 621.822.681.2:369.64
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/58

Охрімчук О.Б.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вербицький В.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Прогрес, досягнутий в органічній електроніці, підвищує інтерес до неї в тих областях, де її переваги виявляються найбільшою мірою. Зокрема, це легкі, недорогі, мобільні біоелектронні пристрої, насамперед датчики та фотодетектори. Сфера органічної біоелектроніки та датчиків привертає все більшу увагу розробників сучасних електронних систем. На базі досліджень хімічних, іонних, електронних та оптоелектронних властивостей органічних матеріалів сформовані принципи їх застосування у датчиках, що використовуються в біомедичних, діагностичних і вимірювальних пристроях. Завдяки гнучкості, біосумісності та можливості виготовлення на великих площах органічні матеріали відкривають нові перспективи для створення сенсорів, здатних інтегруватися з біологічними тканинами та поверхнями.

Через різноманітність матеріалів, конструкцій і сфер застосування окремі сегменти органічної електроніки перебувають на різних етапах розвитку. Органічні випромінювачі вже широко використовуються у пристроях відображення інформації, насамперед в екранах телевізорів, мобільних телефонів та інших портативних системах. Водночас сенсори на основі органічних матеріалів лише починають входити у повсякденне життя, демонструючи значний потенціал для медичних діагностичних систем, моніторингу стану довкілля та розумних носимих пристроїв.

У статті зроблено детальний огляд нещодавнього прогресу в органічних оптоелектронних матеріалах і пристроях для біоінтерфейсу. Обговорено стратегії розробки розтяжних біоінтерфейсів із використанням органічних полімерів та напівпровідників, розглянуто переваги їхньої механічної адаптивності та стабільності в біологічних середовищах. Наведено приклади біоінтегрованих органічних оптоелектронних пристроїв для різних застосувань, включно з фотоплівками, гнучкими сенсорними панелями та оптичними детекторами. Отримані результати підкреслюють перспективність органічних матеріалів для створення нового покоління біоелектронних систем із високою ефективністю, екологічною безпечністю та мінімальним енергоспоживанням.

Ключові слова: *оптоелектронний сенсор, біоінтерфейс, датчик, органічні матеріали, пристрої.*

Постановка проблеми. Органічні сенсори можуть бути побудовані на основі ОПТ, пасивних органічних датчиків або їх комбінації. Найбільші успіхи досягнуті в розробці датчиків чотирьох категорій: біосенсори, датчики тиску, температури та індикатори парової фази. Органічні польові тонкоплівкові транзистори (ОПТ або ОПТТ) були предметом пильної уваги науково-дослідного співтовариства в останні десятиліття. ОПТ – це триполюсник, який, як і звичайні транзистори, забезпечує можливість модуляції електричного потоку, що протікає двома електродами (витоку та стоку) за рахунок модуляції напруги (або струму) на третьому електроді (затворі). В ОПТ підкладкою є органічний напівпровідник (ОПП). Терміном ОПТ (OFET) позначається велика частина типів органічних транзисторів. Однак залежно від механізму, використовуваного для модуляції потоку, органічних транзисторів, як правило, поділяються на кілька категорій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх десятиліть спостерігається зростаючий науковий інтерес до оптоелектронних сенсорів, створених на основі органічних матеріалів, зокрема органічних тонкоплівкових транзисторів (ОТФТ). Dimitrakopoulos і Mascaro [1]

© Охрімчук О.Б., Вербицький В.Г., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

здійснили ґрунтовний огляд розвитку органічних тонкоплівкових транзисторів, наголосивши на їхній перспективності у створенні гнучких, легких і дешевих електронних пристроїв, що відкриває нові горизонти для сенсорних технологій. Особливу увагу вчені приділяють електролітично керованим органічним польовим транзисторам, які, як зазначають Wang, Vincent і Piro [2], демонструють високу чутливість та сумісність із біологічними середовищами, що є надзвичайно важливим для біосенсорів. У цьому контексті органічні сенсори проявляють потенціал до інтеграції в портативні аналітичні пристрої. Elkington та співавт. [3] досліджують функціональні характеристики ОТФТ-основних сенсорів, підкреслюючи їхню здатність до селективного виявлення хімічних та біологічних агентів, а також адаптивність до широкого спектра застосувань у медицині, екології та безпеці. Автори вказують на можливість поєднання фоточутливих властивостей органічних матеріалів із транзисторною архітектурою, що забезпечує підвищення ефективності оптоелектронного перетворення сигналів.

Вагомий внесок у розвиток оптоелектроніки здійснили й українські дослідники. Зокрема, Чадюк В. О. [7] у двотомному виданні розкриває фундаментальні засади генерації оптичного випромінювання, особливості взаємодії світла з матеріалами на макро- та нано-рівнях, а також аналізує перспективи використання органічних структур в оптоелектронних приладах нового покоління. Праця вирізняється глибоким аналізом фізичних процесів, що лежать в основі сенсорного функціонування. Також Кожем'яко В. П., Павлов С. В. та Тарновський М. Г. [8] у своїй роботі зосередили увагу на прикладних аспектах оптоелектронної схемотехніки, що має важливе значення для розробки ефективних сенсорних систем на базі органічних матеріалів. Авторами висвітлено питання побудови схем перетворення світлових сигналів в електричні, а також наведено практичні рішення для реалізації сенсорних модулів із заданими характеристиками.

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про високий рівень зацікавленості світової наукової спільноти до використання органічних матеріалів у конструкції оптоелектронних сенсорів, з акцентом на їх гнучкість, чутливість і потенціал для масштабованого виробництва.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження теоретичних основ та сучасного стану розробки оптоелектронних сенсорів на основі органічних матеріалів, зокрема органічних тонкоплівкових транзисторів, а також виявлення їхніх функціональних переваг і можливостей застосування у високочутливих сенсорних системах для екологічного моніторингу, біомедицини та аналітичної хімії.

Виклад основного матеріалу. Метою дослідження є вивчення застосування оптоелектронних сенсорів на основі органічних матеріалів.

Оптоелектронні пристрої, такі як сонячні елементи, фотодетектори, лазери та світловипромінювальні діоди (світлодіоди), протягом останніх кількох десятиліть широко використовуються в багатьох аспектах сучасного життя, таких як телекомунікації, енергетика, побутова електроніка та твердотільні освітлювальні прилади. Останнім часом постійно зростає інтерес до розширення застосування оптоелектроніки до біологічних і біомедичних досліджень, щоб запропонувати нові можливості для біосенсору, високоточної терапії, персоналізованої медицини та інтерфейсу «людина-машина» тощо [1–4].

Звичайні високоефективні оптоелектронні пристрої базуються на монокристалічних неорганічних напівпровідниках, таких як кремній або арсенід галію, побудованих на крихких і жорстких підкладках [5–7]. Ці пристрої демонструють значну невідповідність структури та властивостей м'яким і криволінійним біологічним тканинам і органам.

Таким чином, інновації в нових оптоелектронних матеріалах, стратегіях проєктування, виготовленні та техніці інтеграції є критично важливими для створення гнучких і навіть розтяжних оптоелектронних систем для передових застосувань, які можна носити та імплантувати. Органічні напівпровідники мають переконливі альтернативи для біоінтеграції порівняно з неорганічними напівпровідниками. Вони мають широкий спектр надзвичайно привабливих характеристик для застосування, пов'язаного з біотехнологіями, включаючи: механічну гнучкість, адаптованість до оптоелектронних властивостей, низьку температуру обробки розчину, легку вагу та біосумісність [8; 9].

Важливо, що продуктивність органічних електронних пристроїв, таких як органічні тонкоплівкові транзистори (OTFT), органічні світлодіоди (OLED), органічні сонячні батареї (OSC) і органічні фотодетектори (OPD), значно покращилася після піонерської роботи Heeger щодо сполучених полімерів. MacDiarmid і Shirakawa в 1977 році та OLED на основі малих молекул від Tang і Van Slyke в 1987 році [10–12]. Наприклад, ефективність

перетворення електроенергії (PCE) OSC зросла з менш ніж 5% у 2005 році до понад 17% у 2018, тоді як OLED були комерціалізовані Samsung і LG для використання в гнучких дисплеях [3; 4].

Органічні напівпровідникові матеріали загалом можна розділити на два класи: спряжені полімери та малі молекули. Полімери мають високу молекулярну масу, що призводить до повільної швидкості агрегації під час випаровування розчинника, що дозволяє точно налаштовувати морфологію органічних фотоактивних шарів за допомогою різних розчинників і добавок до розчинників.

Полімери вигідні для виготовлення пристроїв великої площі. Малі молекули мають переваги у повторюваності від партії до партії, кристалічності та чудовій рухливості носіїв заряду завдяки сильній міжмолекулярній сполуці π-π. Для створення OSC, OPD і OLED для біоінтеграції використовуються як полімери, так і малі молекули. Незважаючи на свою крихку природу та широкі поточні дослідницькі зусилля з розробки гнучких прозорих електродних матеріалів [5; 6], оксид індію-олова (ITO) все ще залишається основним прозорим електродним матеріалом серед негнучких біоінтегрованих органічних оптоелектронних пристроїв.

Для OSC/OPD на полімерній основі фотоактивний шар зазвичай складається з кон'югованого полімеру p-типу, такого як полі(3-гексилтіофен) (P3HT), і похідного фулерену n-типу, такого як [6,6]-феніл-C61-масляна кислота, метиловий ефір кислоти (PCBM) у структурі об'ємного гетеропереходу (BHJ). Для OSC/OPD на основі невеликих молекул приймається складена двошарова структура з окремим шаром p-типу, таким як пентацен, і шаром n-типу, таким як астріс (8-гідроксихінолін) алюміній. Залежно від завдань, що представляють інтерес, заборонені зони органічних напівпровідників можна регулювати для налаштування спектрів поглинання отриманих пристроїв.

Стратегії проектування органічних оптоелектронних сенсорів. Розтяжні пристрої, які можуть зберігати розроблені оптоелектронні властивості при повторюваних деформаціях розтягування та стиснення, дуже привабливі для біоінтегрованих застосувань, що включають рухи.

Стратегія вигину — це метод, який використовується для створення багатошарових пристроїв, складених у стос, на попередньо розтягнутих еластомерних підкладках із подальшим зняттям напруги після обробки пристрою. Отримані пристрої можуть зберігати початкову продуктивність при розтягуванні до значення попереднього розтягування.

Стратегію поглинання вперше було застосовано для розробки OSC, що розтягуються, у 2011 році шляхом нанесення прозорого анода PEDOT:PSS, активного шару, що складається з P3HT і PCBM, і евтектичного рідкометалевого катода на основі галію та індію безпосередньо на 20% попередньо напруженому полі (диметилсилоксан) [1].

Після звільнення попередньої деформації на отриманій плівці видно пряжки, перпендикулярні до напрямку попередньої деформації. Фотоелектричні характеристики OSC майже не залежать від деформації розтягування до 27%. Перший OLED, що розтягується, був продемонстрований у 2013 році з емісійним шаром на полімерній основі та анодом PEDOT:PSS [2]. Пристрій спочатку виготовляється на ультратонкій поліетилентерефталатній (ПЕТ) фользі на скляній підкладці, а потім переноситься на 100% попередньо напружену еластомерну стрічку. Після розслаблення еластомеру OLED утворює випадкову мережу складок, щоб пристосуватися до деформації стиснення. Отриманий пристрій зберігає електричні характеристики, які можна порівняти з його плоским станом.

Sun та ін. використав лазерно-програмований процес викривлення, щоб реалізувати OLED з високою ефективністю та механічною міцністю, що розтягуються, з OLED на основі малих молекул [23]. Фосфоресцентні зелені OLED спочатку виготовляються за допомогою термічного випаровування на підкладці з полімеру/Si. Потім OLED/полімерна плівка приклеюється до верхньої поверхні попередньо розтягнутої на 120% еластомерної підкладки з одновимірними борозенками з довгим періодом гратки, підготовленими за допомогою фемтосекундної лазерної абляції. Після звільнення від напруги впорядковані елементи вигину формуються лише для ділянок OLED над канавками. Розтяжність залежить від ширини ліній і канавок. OLED показує світлову ефективність 70 кд/менше 70% деформації, що майже так само, як у ненапруженого пристрою (72,5 кд/А). Спостерігаються невеликі коливання продуктивності при розтягуванні до 100% протягом 15 000 циклів. Пізніше та ж група виготовила двовимірні OLED, що розтягуються, використовуючи подібну стратегію вигину, де OLED переносяться на попередньо розтягнуті за двома осями еластичні підкладки [24].

Отримані пристрої демонструють стабільну ефективність після 100 циклів розтягування-розвільнення від 0 до 25% деформації.

Органічний фотоактивний шар, що розтягується. Ще один простий підхід до розробки

органічних оптоелектронних сенсорів, що розтягуються, полягає в безпосередній розробці еластомерних компонентів для кожного шару пристроїв, включаючи підкладки, провідники, шари транспортування заряду та органічний фотоактивний шар.

Завдяки унікальним характеристикам, доступності, мобільності, одноразовості та простоті конструкції біосенсори перспективні як аналітичні інструменти для охорони здоров'я, моніторингу харчових токсинів та патогенних мікроорганізмів, а також скринінгу навколишнього середовища [3].

Створено велику кількість біосенсорів, переважно для медичних застосувань: аналізи гемоглобіну, глюкози, кальцію, сечовини та багатьох інших критично важливих показників. Біосенсори можуть не тільки визначати такі параметри, як вологість або pH, а й численні типи небіологічних сполук, наприклад важкі метали або невеликі органічні молекули шкідливі речовини, зокрема бісфенол А. Однак досі біодатчики не з'явилися на ринку, можливо, через надто високу вартість виробництва, принаймні, для більшості повсякденних додатків. Але з приходом Інтернету речей, тобто технологій, що пов'язують різнорідні об'єкти в єдину систему, зокрема, інтегруючі датчики медичних застосувань у системи безперервного моніторингу життєвих показників, ринковий потенціал біосенсорів можна реалізувати.

Значні успіхи у розвитку датчиків тиску на основі ОПТ, причому як дискретних, так і об'єднаних у масиви, дозволяють говорити про створення, наприклад, «електронної шкіри» на принципах виявлення тиску та сили (додаються статично або динамічно). Елемент, що сприймає тиск у масиві датчиків для «електронної шкіри», виготовляється з чутливого до тиску каучуку, що містить вуглецеві частинки, і з'єднується з виводом початку транзистора [10].

Електричний опір між верхньою та нижньою поверхнями вуглецевмісного каучукового матеріалу є функцією механічної деформації. Прикладений до нього тиск змінює опір в ланцюзі сток-витік транзистора. Час відгуку датчика тиску становить менше 22 мс. Органічні тонкоплівкові транзистори за своєю природі чутливі до прикладеного тиску [11].

Залежність від тиску транзисторів з органічним напівпровідником на основі пентацену було досліджено із застосуванням одновісного механічного тиску за допомогою голки. Пентацен краще, ніж P3HT, підходить для виготовлення датчиків тиску завдяки високого ступеня кристалічності тонкої плівки, що робить його чутливішим до деформації. Чутливість до тиску в транзисторі, де як підзатворного діелектрика використаний мікроструктурований полідимітілсилоксан (ПДМС), становить 8,4 кПа-1, час відгуку – менше 10 мс, стабільність – висока (понад 15 тис. циклів) при споживаній потужності менше 1 мВт [12].

Датчики тиску на органічних тонкоплівкових транзисторах, які власними силами є підсилювальними елементами, мають підвищену чутливість. При цьому широко представлені простіші за конструкцією датчики тиску, що використовують тензорезистивні та п'єзорезистивні властивості органічних полімерів. Такий датчик є шарувату структуру, в якій полімер розташований між двома електродами [13].

Датчики такого типу досить просто об'єднати в матричні структури з великою кількістю елементів. Оскільки згадані ОПП, як і будь-які напівпровідники, мають температурну чутливість, були зроблені спроби створення на їх основі датчиків температури. Найбільш ефективною виявилася комбінована конструкція, що містить терморезистор із ОПП, з'єднаний з ОПТ (рис. 1).

Нещодавно з'явилася інформація про датчик на гнучкій підкладці [20], який має повноцінну органічну мікросхему, що складається із сенсора та АЦП. Датчик температури – це міст Уітстона, що складається з полімерних термочутливих плівок, поліетилендіоксітіофена-полістиренсульфонату (PEDOT:PSS) та металевих плівок. Схема зчитування приймає аналоговий сигнал від датчика температури і видає 1 цифровий біт-сигнал, який показує перевищення температурного порога. Продемонстровано також дворозрядний аналого-цифровий перетворювач як схему зчитування. Комбінований датчик температури-тиску (рис. 8) описаний в [21].

Його основою є комбінація термочутливого та п'єзорезистивного матеріалів. Як останні використані PEDOT:PSS та пористий поліуретан (ПУ). Матеріали утворюють шарувату структуру, розташовану між двома електродами. Активний шар отримують шляхом осадження органічного термоелектричного матеріалу на основу, що деформується, що дозволяє одночасно фіксувати зміну температури та тиску. Температурна чутливість датчика 0,1 К та чутливість до тиску – до 28,9 кПа. На основі подібних датчиків, що реагують одночасно на температуру та тиск, можна ближче підійти до створення «електронної шкіри».

Оптогенетика – це початкова технологія, яка дозволяє швидко оптично контролювати цільові

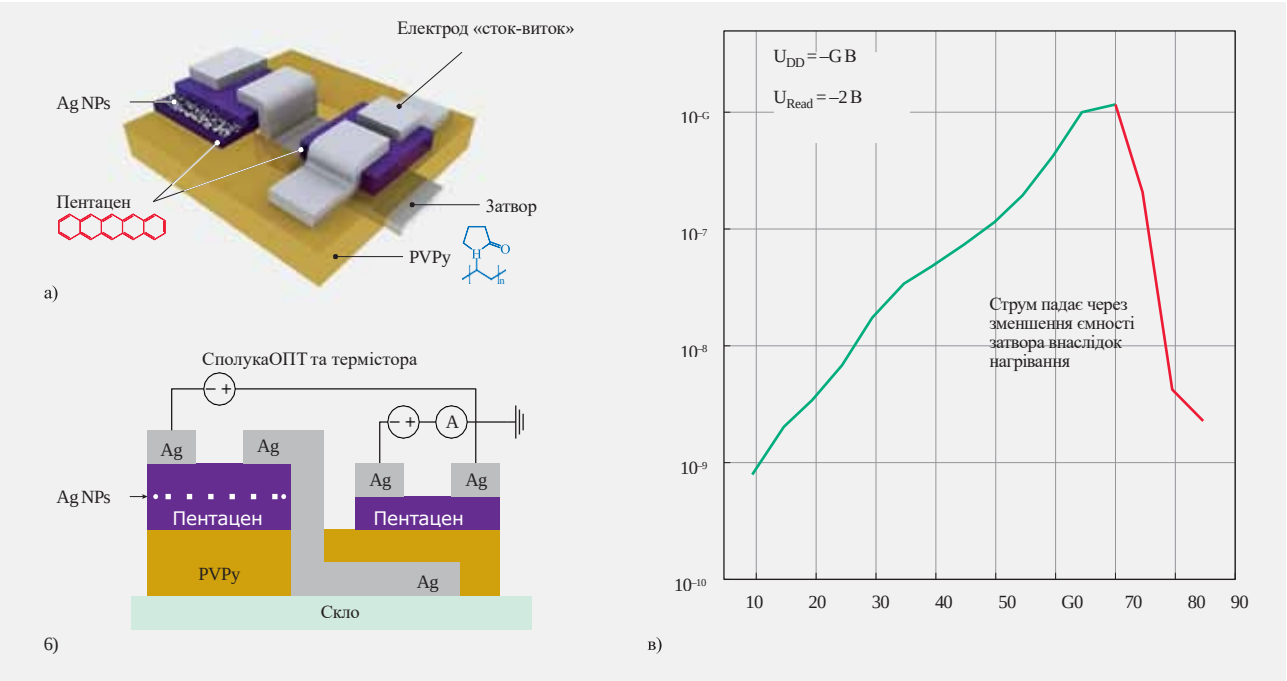

Рис. 1. Температурний датчик: конструкція (а), схема включення та розріз структури (б), температурна залежність струму датчика (в)

конкретні підтипи клітин або нейронів у біологічних системах [47]. Мікромасштабні неорганічні світлодіоди широко використовуються як мінімально інвазивні імплантовані джерела світла для оптогенетичних досліджень [48–51].

Пропозиція OLED кілька основних переваг перед неорганічними світлодіодами для оптогенетики. Наприклад, Young's модуль органічних напівпровідникових матеріалів в OLED зазвичай набагато менший, ніж у неорганічні напівпровідники в неорганічних світлодіодах, що допомагає мінімізувати реакцію стороннього тіла при хронічних станах. Налаштування емісійних властивостей OLED можна легко здійснити за допомогою хімічного синтезу. Що ще важливіше, OLED можна структурувати в масиви високої щільності субклітинні масштаби довжини (наприклад, 10 мкм) для оптогенетичної модуляції окремих клітин/нейронів за допомогою мікро- та нанофабрики. Група Gather вперше продемонструвала, що мікроматриці OLED запозичені з індустрії мікродисплеїв можна використовувати для безлінзового контролю локального руху живих клітин (рис. 2) [52, 53].

Рисунок 2 описує експериментальну установку. Масив OLED має активну площу близько 20 мм^2 і 230 000 пікселів, кожен з яких визначається 6 × 9 мкм^2 розмір алюмінієвого анода. Чергування шарів Al2O3 та органічний полімер Barix інкапсулюють пристрої та забезпечують тісний контакт

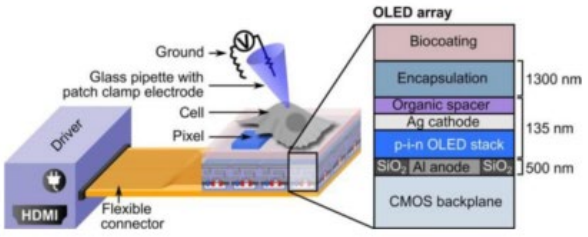

Рис. 2. Схема мікроматриці OLED з клітинами, прикріпленими зверху

із живими клітини. Нещодавно та ж група повідомила про міліметрові OLED-дисплеї високої яскравості з достатньою інтенсивність освітлення (0,3 мВт/мм^2) для досягнення оптичної активації каналу родопсин-2 (ChR2) in vivo з низькою робочою напругою при 5 В [54].

Виготовляються сині, зелені та оранжеві OLED за допомогою термічного осадження. Рухові нейрони, що експресуються ChR2, демонструють найсильнішу поведінкову реакцію до синього підсвічування OLED, тоді як помаранчеве підсвічування OLED не викликає активності клітин до спектральної невідповідності.

Незважаючи на вражаючий прогрес, досягнутий в оптогенетиці, вона вимагає генетичних модифікацій, що ускладнює використання для лікування людей. Негенетичні підходи до оптики стимулюють нейрони або клітини, дуже бажані для застосування in vivo у людей, такі як цен-

тральні або терапевтичні засоби периферичної нервової системи та імплантати для протезів сітківки [55].

Пристрої на основі кремнію були широко вивчені для застосування нейрональної стимуляції [56, 57]. Однак ці прилади є жорсткими та не ідеальними для біоінтерфейсу. Крім того, кремній є напівпровідником із непрямою забороненою зоною, для ефективного збирання фотонів потрібна товщина від десятків до сотень мікрометрів, а також тому обмежує загальну товщину пристрою. Тим часом органічні напівпровідникові матеріали показали здатність фотостимулювати нейрони.

При розробці датчиків на основі органічних напівпровідників було реалізовано два підходи. В ОПТ з багатошаровою структурою органічні матеріали, що використовуються як підкладка або підзатворний діелектрик ОПТ, самі можуть взаємодіяти з аналітом та індукувати зміни у провідності каналу витік-стік. Інший підхід вимагає вбудовування в конструкцію транзистора додаткового матеріалу, який має чутливість. і селективністю до аналітів, що розпізнаються. В статті наведено основні конструкції датчиків на ОПП. Широке розмаїття матеріалів, можливості низькотемпературної технології стимулюють фантазію вчених та інженерів, дозволяють реалізовувати безліч конструкцій. Не всі вони зарекомендують себе надалі. Але експерименти дозволяють відчути можливості нового нового напряму мікроелектроніки – полімерної електроніки.

Висновки. Отже, останні досягнення в області органічних напівпровідникових матеріалів і оптоелектронних пристроїв зробили це можливість виготовити гнучкі та розтяжні органічні оптоелектронні біоінтерфейси для багатьох додатків, які можна носити та імплантувати. Нами розглянуто різні типи органічної оптоелектроніки матеріалів, пристроїв, інтегрованих систем і висвітлено поточний стан цього розвитку. Тим часом перед цим необхідно вирішити декілька наукових та інженерних проблем. Вже можна повністю використати переваги органічних оптоелектронних біоінтерфейсів у практичній біологічній галузі. Незадовільна довгострокова екологічна стабільність органічних оптоелектронних сенсорів повинна бути вдосконалена. Це вимагає розробки інноваційних органічних оптоелектронних матеріалів, які є стабільними під час дії повітря і біологічні рідини для зондування/стимуляції та стратегії інкапсуляції для захисту інших частини приладів.

У результаті потрібне вивчення молекулярного дизайну та правила розробки нових органічних напівпровідникових матеріалів, які демонструють чудові оптоелектронні та механічні властивості та біосумісність. Наразі не вистачає механістичних моделей щоб повністю зрозуміти інтерфейс органічного пристрою. Інші важливі майбутні дослідження у цьому напрямки включають інтеграцію з передовими електронними модулями для бездротового зв'язку або функціональні компоненти, такі як мікроелектромеханічні підсистеми та мікрофлюїдні канали для багатофункціонального зондування/стимуляції.

Синергічні зусилля хіміків, інженерів, фізиків та біологів мають вирішальне значення для подальшого прогресу в цій сфері. Таким чином, застосування оптоелектронних сенсорів на основі органічних матеріалів пропонують сприятливий майданчик для подальших фундаментальних наукових відкриттів та клінічного застосування.

Список літератури:

1. Dimitrakopoulos C.D., Mascaro D.J. Organic thin-film transistors: A review of recent advances. *IBM J.Res. Dev*. 2021. Vol. 45. P. 11–27.

2. Wang D.N.Vincent, Piro B. Electrolytic Gated Organic Field-Effect Transistors for Application in Biosensors. *A Review Electronics*. 2016. Vol. 5. № 9. https://doi.org/10.3390/ electronics5010009.

3. Elkington D., Cooling N., Belcher W., Dastoor P.C., Zhou X. Organic Thin-Film Transistor (OTFT) – Based Sensors. *Electronics*. 2019. № 3. P. 234–254

4. Xiaohui Ren, Gengcheng Liao, Zhongjun Li. et al. Two-dimensional MOF and COF nanosheets for next-generation optoelectronic applications. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021. V. 435. ID 213781.

5. Fakun K. Wang, Sijie J. Yang, Tianyou Y. Zhai Wang. 2D Bi2Se3 materials for optoelectronics. *iScience*. 2021. V. 24. ID 103291

6. Xia Y., Cho J.H., Lee J., Ruden P.P., Frisbie C.D. Comparison of the mobility-carrier density relation in polymer and single-crystal organic transistors employing vacuum and liquid gate dielectrics. *Adv. Mater*. 2009. Vol. 21. P. 2174–2179

7. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання. У 2 кн. / В. О. Чадюк. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. Кн. 1. 380 с. Кн 2. 436 с.

8. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2018. 189 с.

9. Cho J.H., Lee J., He Y., Kim B., Lodge T.P., Frisbie C.D. High-capacitance ion gel gate dielectrics with faster polarization response times for organic thin film transistors. *Adv. Mater*. 2018. Vol. 20. P. 686–690.

10. Cotrone S., Ambrico M., Toss H., Angione M.D., Magliulo M., Mallardi A., Berggren M., Palazzo G., Horowitz G., Ligonzo T. Phospholipid film in electrolyte-gated organic field-effect transistors. *Org. Electron*. 2022. Vol. 13. P. 638–644

11. Manoli K., Dumitru L.M., Mulla M.Y., Magliulo M., Franco C.D., Santacroce M.V., Scamarcio G., Torsi L. A comparative study of the gas sensing behavior in p3htand pbttt-based otfts: The influence of film morphology and contact electrode position. *Sensors*. 2024. Vol. 14. P. 16869–16880.

12. Schwartz G., Tee B.C.-K., Mei J., Appleton A.L., Wang H., Bao Z. Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring. *Nat. Commun*. 2023. Vol. 4. P. 1859.

Okhrimchuk O.B., Verbytskyi V.H. APPLICATION OF OPTOELECTRONIC SENSORS BASED ON ORGANIC MATERIALS

The progress achieved in organic electronics has significantly increased interest in its use in areas where its advantages are most evident. In particular, lightweight, low-cost, and flexible bioelectronic devices such as sensors and photodetectors are among the most promising applications. The field of organic bioelectronics and sensors is attracting growing attention from researchers and developers of modern electronic systems. Based on studies of the chemical, ionic, electronic, and optoelectronic properties of organic materials, fundamental principles have been established for their application in sensors used in biomedical, diagnostic, and measurement devices. Due to their flexibility, biocompatibility, and capability for large-area fabrication, organic materials offer new opportunities for creating sensors that can integrate seamlessly with biological tissues and surfaces.

Because of the diversity of materials, designs, and applications, various segments of organic electronics are currently at different stages of development. Organic light-emitting devices are already widely used in information display systems such as television screens, mobile phones, and other portable devices. Meanwhile, organic-material-based sensors are only beginning to enter everyday life, showing great potential for medical diagnostics, environmental monitoring, and wearable smart technologies.

This article provides a detailed overview of recent progress in organic optoelectronic materials and devices for biointerfaces. It discusses strategies for developing stretchable biointerfaces using organic polymers and semiconductors, emphasizing their mechanical adaptability and stability in biological environments. Examples of biointegrated organic optoelectronic devices for various applications – including photofilms, flexible sensing panels, and optical detectors – are presented. The findings highlight the promise of organic materials for creating a new generation of bioelectronic systems with high efficiency, environmental safety, and low energy consumption.

Key words: *optoelectronic sensor, biointerface, sensor, organic materials, devices.*

Дата надходження статті: 10.11.2025
Дата прийняття статті: 27.11.2025
Опубліковано: 30.12.2025