

## Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**ІВАНЮК Христини Богданівни «Фізико-технологічні основи  
формування органічних та гібридних світловипромінювальних структур  
із заданими спектрально-енергетичними характеристиками»,**  
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за  
спеціальністю **05.27.06 -технологія, обладнання та виробництво  
електронної техніки**

Дисертаційна робота Христини Богданівни ІВАНЮК присвячена **актуальній** задачі - розробці та дослідженню основ формування органічних та гібридних світлодіодних ( в роботі світловипромінювальних) структур, що у світі має назву OLED (organic light-emitting diode) технології. Ці сучасні технології широко використовуються у сенсорних системах, дисплеях, джерах світла тощо. У Національному університеті «Львівська політехніка» раніше Львівському політехнічному інституті цю проблему більше 20 років успішно почали розробляти Стахіра Павло та Черпак Владислав (тепер професори) у співпраці з литовськими і іншими зарубіжними колегами, до якої успішно пізніше приєдналася Х. Б. ІВАНЮК. Група професора Павла Стахіри є провідною в Україні в цьому важливому напрямку, що у подальшому може стати одним з факторів які визначають науково-технічний потенціал України і є дуже важливим у воєнний час. Так, одним зі стратегічних напрямів є створення комбінованих органо-неорганічних гетероструктур із покращеними характеристиками, що дозволять підвищити ефективність конверсії енергії, стабільність випромінювання, стабільність кольору, високу контрастність і це є однією з задач представленої роботи.

Дисертаційна робота є комплексним дослідженням з фізичних та технічних властивостей, особливо люмінесцентних характеристик, молекулярних плівок та гетероструктур на їх основі, вибору оптимальних матеріалів, схемотехнічних рішень та інженерних підходів до оптимізації архітектури OLED-пристроїв для сучасних дисплейних технологій і сенсорних систем.

**Актуальність** дисертаційної роботи ІВАНЮК Х. Б. підтверджується її безпосереднім зв'язком із науковими планами та програмами кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка», яка направлена на розробку інноваційних методів побудови електронних

пристроїв, моделювання їхніх характеристик та дослідження перспективних технологій у галузі електроніки, оптоелектроніки та сенсорики в рамках держбюджетних науково-дослідних проєктів Міністерства освіти і науки України. Дисертантка була керівником проєкту «Розробка інтегрованих органічних електронних пристроїв ближньої інфрачервоної області» (83/89-2018,), що фінансувався Державним фондом фундаментальних досліджень (ДФФД). За матеріалами досліджень кафедра виконувала міжнародні європейські проєкти в рамках програм FP7 "Multicoloured ambipolar conducting polymers for single polymer optoelectronic devices" (AmbiPOD), 2014–2017(ЄС); та проєкт MEGA Marie Curie International Research Staff Exchange 4 "Heavy metal free emitters for new-generation light sources", 2019-2023) за участі дисертантки.

До **найважливіших наукових результатів** авторки дисертаційної роботи слід віднести наступні:

В роботі **вперше** експериментально продемонстровано, що процес триплет-триплетної анігіляції, котрий зазвичай розглядався як паразитний ефект в роботі OLED пристроях, насправді може грати роль позитивну роль в якості альтернативного або допоміжного механізму до стратегії термічно-активованої затриманої флуоресценції (TADF) з метою конвертації не випромінювальних триплетних екситонів у випромінювальні синглетні екситони і т підвищення квантової ефективності OLED пристроїв.

Іншим важливим і принциповим фізичним результатом є ідея використання матриці на основі ексиплексного матеріалу в поєднанні із інтерфейсним ексиплексом, що обумовило можливість реалізації зворотного інтеркомбінаційного переходу для триплетних збуджень в таких системах і таким чином підвищення ефективності OLED пристроїв.

**Практичне значення результатів роботи** зумовлено широкими можливостями використання запропонованих авторкою структур у сучасних електронних пристроях. З практичної точки зору **новим** принциповим результатом є запропонована методика «сухого розпилення» квантових неорганічних наноструктур для їх інтеграції у гібридні органічні-неорганічні світло-випромінюючі пристрої з використанням термічного осадження у вакуумі, що може бути важливою також для інших типів органічних електронних пристроїв, таких наприклад як сонячні елементи та органічні сенсори.

Важливою складовою роботи є розробка технологічного підходу, що інтегрує флуоресцентне, затримане флуоресцентне та ексиплексне

випромінювання в межах однієї гетероструктури. Така архітектура дозволяє отримати багатоканальну емісію з керованими характеристиками «теплого» білого та білого світла, відкриваючи нові перспективи для створення ефективних світловипромінювальних пристроїв. Розробка технологічних методів створення електролюмінесцентних квантових точок CdTe/CdS та CdSeS/ZnS у гібридних структурах забезпечує можливість отримання «чистого кольору» електролюмінесценції з високою яскравістю свічення понад 10 000 кд/м<sup>2</sup> і використання в сучасних оптоелектронних пристроїв. Результати дисертаційної роботи увійшли в лабораторні роботи для студентів спеціальності 171 «Електроніка» з дисципліни «Органічна електроніка», в Національному університеті «Львівська політехніка».

**Докторська дисертація** Христини Богданівни є **завершеною науковою працею** і оформлена у вигляді дисертації та наукової доповіді у відповідності до Вимог до оформлення дисертації, затверджених наказом МОН України № 40 від 12 січня 2017 року. Основні наукові результати дисертації опубліковано в 20 статтях у провідних наукових фахових виданнях, 2 монографіях та 3 патентах. 18 статей, що містять основні наукові результати дисертації, опубліковані в журналах Q1 та Q2, таких як «The journal of physical chemistry letters», «Applied Materials Today», «Dyes and Pigments», «Advanced Electronic Materials», «Organic Electronics», «Journal of Materials Chemistry C» «RSC Advances» та інших, тому, відповідно до вимог для докторських дисертацій, передбачених чинним Наказом МОН України №1220 від 23.09.2019р. «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», дисертаційна робота ІВАНЮК Х. Б складається з анотації, семи розділів, основних результатів і висновків, списку використаної літератури із 120 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 487 сторінок, із них 140 сторінок основного тексту, 15 таблиць, 73 рисунки та додатки на 290 сторінках.

В анотації дисертації обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, описано наукове й практичне значення роботи, особистий внесок здобувачки та апробацію результатів дисертації.

**У першому розділі** детально проаналізовано стан сучасних досліджень з даної тематики, визначено переваги й недоліки існуючих технологічних методів створення світловипромінювальних гетероструктур, сформульовано задачі дослідження.

**У другому розділі** описано дослідження з ефективності органічних світлодіодів, що працюють на основі механізмів затриманої флуоресценції TTA (triplet–triplet annihilation) та TADF (thermally activated delayed fluorescence) . Розглянуто органічні новосинтезовані сполуки, які залучають енергію триплетних станів у випромінювальну рекомбінацію. Показана реалізація двох механізмів затриманої флуоресценції в світловипромінювальних гетероструктурах. Завдяки оригінальному конструкторському підходу було отримано високу зовнішню квантову ефективність випромінювання (14% ).

Вдалося отримати ефективні світлодіоди синього кольору при низькому енергоспоживанні.

**В третьому розділі** показана технологічна можливість створення повноколірних світловипромінювальних структур на основі міжмолекулярної затриманої флуоресценції з використанням донорної та акцепторної складових. В результаті була підвищена ефективність створених структур. Запропоновано методи формування гетероструктур з багатоканальною емісією, які базуються на перенесенні енергії від об'ємного ексиплексу до інтерфейсного ексиплексу, що дозволяє розширити спектр випромінювання та підвищити квантову ефективність пристроїв.

Вперше реалізовано перенесення енергії від ексиплексного господаря до флуоресцентної домішки, що сприяло підвищенню квантової ефективності з 4,5% до 7%. Запропонований іноваційний підхід забезпечив оптимізацію електричних характеристик пристроїв, підвищує їх енергоефективність та довговічність, надає можливість створення високоефективних органічних світловипромінювальних пристроїв з покращеними параметрами стабільності, енергоефективності та яскравістю свічення.....

**У четвертому розділі** було досліджено світловипромінювальну гетероструктуру в умовах парамагнітного резонансу та проаналізовано процеси переходу з триплетного у синглетний стан. Це дозволило підтвердити механізми світловипромінювання в TADF матеріалах та запропонувати новий підхід до комбінування TADF та ексиплексного випромінювання на основі нової синтезованої сполуки та створити OLED теплого білого кольору з яскравістю понад 40 000 кд/м<sup>2</sup> та зовнішньою квантовою ефективністю 19%.

**У п'ятому розділі** дисертації удосконалено технологію створення гібридних світловипромінювальних гетероструктур та електролюмінесцентних пристроїв на основі наноматеріалів. Вперше запропоновано та реалізовано технологічний процес легування інтерфейсної



зони TCTA/Bphen експлексу нанодисперсним порошком цирконату барію. Розроблено ефективний спосіб нанесення нанопорошку цирконату барію методом сухого розпилення, який після введення у світловипромінювальні гібридні структури ITO/TCTA/BZO/Bphen/Ca/Al дозволив отримати максимальну яскравість 3465 кд/м<sup>2</sup>, струмову ефективності 3,88 кд/А та зовнішню квантову ефективність на рівні 1,26%, значно покращуючи продуктивність OLED. Вперше досліджено застосування квантових точок CdTe/CdS як емісійного шару в QLED, що відкриває нові перспективи для створення електронних пристроїв на основі квантових точок. Практично досягнуто електролюмінесценцію квантових точок CdTe/CdS у гібридних гетероструктурах з яскравістю 10 000 кд/м<sup>2</sup>, що більше показників для традиційних органічних OLED-структур.

**У шостому розділі** оцінено вплив дизайну гетероструктури та технологічних методів застосування однієї сполуки на створення як традиційних та інвертних світловипромінювальних структур. Проведено дослідження механоелектролюмінесцентних властивостей цієї сполуки, що дає змогу використовувати її як емітер у багатофункціональних органічних гетероструктурах. Визначено варіації колірних параметрів, ефективності та можливих практичних застосувань таких структур..

**Сьомий розділ** присвячений особливостям методів створення RGB-систем для органічних світлодіодів (OLED) на основі флуоресцентних і фосфоресцентних матеріалів. Проаналізовано технологічні аспекти інтеграції новосинтезованих емітерів на забезпечення стабільного кольорового відтворення, відповідного параметрам RGB-системи, та досягнення високої квантової ефективності кожного типу OLED-структур.

Проведено детальне дослідження фотофізичних і кінетичних характеристик новосинтезованих сполук, що дозволило визначити оптимальні матеріали та методи нанесення емісійних шарів для виготовлення флуоресцентних OLED із глибоким синім, синім, зеленим і червоним випромінюванням, інтегрованих у RGB-систему.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і висновків дисертації та повнота викладу в наукових публікаціях** не підлягає сумніву тому що, результати представлено у 52 роботах, включаючи 20 статей, з яких 18 статей опубліковані в реферованих високо рейтингових міжнародних наукових журналах віднесених до першого і другого квартилів (Q1 і Q2), 2-монографії та 3 патенти, представлені у міжнародних базах даних Scopus (h-factor 18), Web of Science (h-factor 18), Google of Scholar (h-factor 19),

**апробація** роботи проходила на 37 наукових конференціях, семінарах та школах міжнародного рівня. В дослідженнях були використані сучасні, добре апробовані експериментальні методи. Аналіз результатів здійснено з використанням сучасних програмних засобів та теоретичних підходів. Все вищезгадане забезпечує обґрунтованість та достовірність одержаних результатів та сформульованих на їх основі висновків. Особистий внесок здобувачки в опубліковані зі співавторами наукові праці за темою дисертаційної роботи вбачається таким, що свідчить про наукову зрілість ІВАНЮК Х. Б. та в складі наукової команди (включаючи міжнаціональні наукові команди) отримувати наукові результати сучасними фізичними методами (як експериментальними так і розрахунковими), аналізувати отримані дані та формувати наукові висновки та положення, що публікуються у вигляді наукових статей в авторитетних наукових національних та міжнародних виданнях.

**Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації**  
Дисертація *«Фізико-технологічні основи формування органічних та гібридних світловипромінювальних структур із заданими спектрально-енергетичними характеристиками»*, як кваліфікаційна наукова праця, оформлена для наукової доповіді, підготовлена здобувачкою самостійно. Використані в дисертації та в наукових публікаціях ідеї та результати досліджень інших науковців мають відповідні посилання. Уважне вивчення дисертації та статей здобувачки дозволяють стверджувати, що дослідження були проведені надійними сучасними оптичними, електричними та ЕПР методами на сучасному обладнанні за чітко описаними відтворюваними методиками. В наукових публікаціях наводяться оригінальні експериментальні спектри, що незалежно можуть бути проаналізовані читачем. Також дисертанткою використовувались добре апробовані методи розрахунків, а саме, розрахунки яскравості свічення OLED, рухливості носіїв заряду методом TOF, розрахунок струмової ефективності, енергоефективності та зовнішньої квантової ефективності для OLED. Зроблені в роботі висновки добре узгоджуються з існуючими літературними даними. Все вищезазначене вказує на відсутність ознак фабрикації або фальсифікації в проведених дослідженнях та на відповідність дисертації вимогам академічної доброчесності.

**Реферат** дисертації повністю відповідає її змісту та адекватно передає основні наукові результати дисертантки.

## **Зауваження, дискусійні питання та рекомендації стосовно положень докторської дисертації**

**Високо оцінюючи новизну, наукове та практичне значення** отриманих в рамках докторської дисертації ІВАНЮК Х. Б. результатів, хотілося б надати наступні зауваження та рекомендації, які виникли при аналізі дисертації та публікацій:

1. Незважаючи на те, що в роботі старанно наводяться фізичні та експлуатаційні характеристики OLED/WOLED, хотілося б побачити дані з довготривалої експлуатації пристроїв а також їхнє порівняння з існуючими на сьогодні в світі за напругою ввімкнення та ефективністю.
2. Недоліками є використання неточних формулювань в деяких частинах тексту роботи та використання «жаргонних» термінів. Наприклад, замість «використання ексіплексів як матриці» потрібно говорити «використання ексіплексних матеріалів як матриці», так як термін «ексіплекс» лише означає певний тип електронних збуджених станів - використовувати можна лише матеріали в яких ексіплекси є основними збудженнями. Замість «міжсистемного переходу» краще використовувати загально поширений термін «інтеркомбінаційний перехід».
3. Дуже часто в роботі термін «затримана флуоресценція» помилково підміняється терміном «довготривала флуоресценція». В роботі паралельно використовується термінологія українською та англійською мовами. Рекомендується забезпечувати єдність термінології та використовувати один мовний варіант для означення конкретного терміну. Це б полегшило сприйняття та розуміння тексту читачем та підсилило науковий характер дисертації.
4. Частина, де описується ЯМР дослідження є цікавою, не є новою і описана не відповідними фізичними термінами. ЯМР- це звичайний фізичний метод, який дозволяє отримати інформацію про мультиплетні стани.

Зазначені зауваження не впливають на загальну високу оцінку докторської дисертації ІВАНЮК Х. Б. і не знижують наукову та практичну цінність результатів та висновків роботи.

Таким чином, за обсягом та якістю проведених досліджень, за ступенем актуальності обраної теми, новизною та обґрунтованістю наукових положень та висновків, за достовірністю отриманих наукових результатів та повнотою

їх висвітлення в наукових публікаціях дисертаційна робота *«Фізико-технологічні основи формування органічних та гібридних світловипромінювальних структур із заданими спектрально-енергетичними характеристиками»* є завершеною науково-дослідницькою роботою, яку виконано на високому науковому рівні із застосуванням сучасних експериментальних методів і повністю відповідає вимогам МОН України, які висуваються до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, зокрема п.7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктор наук, затвердженого постановою Кабінетів Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, а її автор, ІВАНЮК Христина Богданівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки.

Завідувач відділу фізики біологічних систем  
Інституту фізики НАН України,  
доктор фіз.-мат наук, професор

*Def*

Галина ДОВБЕШКО

14 травня 2025 року



ВІСНО  
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
ІФ НАН УКРАЇНИ  
В.С.МАВХАР