

ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора, Когута Ігоря Тимофійовича, завідувача кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», на дисертаційну роботу **Іванюк Христини Богданівни «Розроблення нанорозмірних світловипромінювальних структур на основі амбіполярних карбазоловмісних напівпровідників»**, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Органічні світловипромінювальні структури (ОСВС) є сучасними пристроями органічної електроніки і відкривають перспективні можливості їх використання як складових компонентів новітніх плоских панелей відображення інформації та систем освітлення. Переваги таких структур - їх унікальні характеристики - гнучкість, можливість друку, широкий кут огляду, висока роздільна здатність, чіткість зображення, висока контрастність, низьке енергоспоживання, прозорість і легка вага.

На сьогодні широко розповсюджені фосфоресцентні СВС на основі металоорганічних комплексів рідкоземельних металів, які за рахунок участі триплетних екситонів характеризуються високим квантовим виходом електролюмінесценції. Проте такі структури є дорогими. Альтернативою до них можуть стати ОСВС, в яких задіяний механізм термоактивованої довготривалої флуоресценції (TADF) і володіють широким спектром електролюмінесценції, високою квантовою ефективністю співмірною до типових фосфоресцентних пристроїв. Якраз такі високоефективні ОСВС можна реалізувати підбором відповідних донорних та акцепторних органічних напівпровідників, або використанням амбіполярних напівпровідників.

Про що підтверджує аналіз сучасних літературних даних зі створення високоефективних ОСВС, в основу функціонування яких покладено механізми внутрішньомолекулярної та міжмолекулярної донор-акцепторної взаємодії демонструє їхню суттєву конкурентоздатність порівняно з флуоресцентними та фосфоресцентними ОСВС.

Окрім цього, аналіз сучасної літератури за тематикою ОСВС технологій демонструє той факт, що дослідження переважно зосереджені на фізико-хімічних властивостях і явищах в органічних структурах. Проте з ряду причин, зокрема комерційних, майже відсутня інформація стосовно впливу технологічних факторів на залежності ефективності світловипромінювання від варіювання технологічних підходів до формування композиційних структур у системі гість-господар та ексиплексних інтерфейсів.

Тому подальший прогрес у цій галузі, в значній мірі залежить від як від ефективного пошуку, досліджень і створення високоефективних ОСВС на основі амбіполярних органічних напівпровідників та донорно-акцепторних гетероструктур, композитів з урахуванням різних технологічних підходів до їх формування, які матимуть нові та покращені характеристики.

У цьому контексті дисертаційна робота спрямована на створення високоефективних світловипромінювальних структур ексиплексного типу

емісії, дослідження впливу технологічних підходів формування функціональних амбіполярних плівок, донорно-акцепторних гетероструктур та композитів, на квантову та світлову ефективність розроблених структур за рахунок архітектури пристрою та розширення зони рекомбінації носіїв заряду. Дослідницькі роботи в даному напрямку є необхідними, перспективними, сучасними та актуальними. Тому дисертація **Іванюк Х.Б.**, що присвячена розробленню ефективних ОСВС на основі амбіполярних органічних напівпровідників та донорно-акцепторних гетероструктур і композитів, з перспективою застосування для дисплейних пристроїв на їх основі є **актуальною науково-прикладною задачею.**

Актуальність роботи підтверджується зокрема й тим, що дисертація тісно пов'язана з науковими держбюджетними темами і планами науково-дослідних робіт і виконувалася відповідно до напряму наукових досліджень кафедри електронних приладів НУ «Львівська політехніка» і дербюджетних тем: «Розробка нових елементів та пристроїв електронної техніки на основі нанорозмірних органічних структур», (номер держреєстрації 0113U003196), а також у рамках спільного проекту FP7-PEOPLE-2013-IRES «Кольорові амбіполярні електропровідні полімери для однокомпонентних полімерних оптоелектронних приладів» (7-ма Рамкова угода). Результати наукових досліджень, наукові положення та висновки використані в навчальному процесі НУ «Львівська політехніка».

Структура та зміст дисертації. Дисертація складається зі вступу, переліку умовних позначень, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел інформації. Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи, об'єкт і предмет дослідження, основні завдання, проведені теоретичні й експериментальні дослідження та отримані науково-прикладні і практичні результати.

У вступі подані усі необхідні дані щодо актуальності проведення досліджень з поставленої в дисертації задачі, чітко визначено мету і задачі досліджень та дані про наукову новизну і прикладне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз проблеми дисертаційної роботи. І на основі проведеного аналізу сучасного стану розвитку ОСВС, розглянуто тенденції розвитку високоефективних ОСВС, показано сучасні технологічні підходи щодо їх формування і спрямованих на врахування :

-типу функціональних шарів структури і їх оптимальних товщин шарів;структури;

-зниження інжекційних бар'єрів для носіїв заряду;

-підбору транспортних шарів із високою рухливістю носіїв заряду для їх збалансованої інжекції та ефективною генерації екситонів в емісійний шар;

-визначено шляхи оптимізації технологічних підходів формування високоефективних ОСВС на основі механізму довготривалої флуоресценції (TADF) та ексиплексного механізму емісії.

В другому розділі дисертації представлені дослідження рухливості носіїв заряду в органічних нанорозмірних плівках часопротітним методом,

включаючи нові синтезовані амбіполярні напівпровідники. Отримані результати показали, що всі досліджувані матеріали характеризуються амбіполярною провідністю. Визначені величини рухливостей дірок і електронів.

Розроблено методику обчислення яскравісних і колірних характеристик ОСВС. На основі цієї методики розроблено її програмну реалізацію в середовищі Windows Form, яка входить до складу операційної системи Windows і потребує додаткових параметрів систем та спеціалізованого програмного забезпечення.

Проведено модернізацію установки термовакuumного нанесення органічних плівок для контрольованого одночасного нанесення двох матеріалів з двох різних джерел.

У третьому розділі проведено аналіз електрооптичних характеристик експериментальних зразків світловипромінювальних пристроїв залежно від технологічних режимів формування функціональних шарів. Гетероструктури були сформовані методом пошарового осадження плівок, а методом контрольованого одночасного осадження функціональних шарів були сформовані об'ємні структури. Досліджені спектри електролюмінесценції як об'ємних, так і планарних ОСВС, встановлені їх особливості.

На основі імпедансної спектроскопії досліджено механізми струмопроходження та генераційно-рекомбінаційні процеси в пошарових композитних структурах на основі двох різних донорних матеріалів. Результати цих досліджень, як експериментальних так і комп'ютерного моделювання одночасно вказують на відсутність енергетичного бар'єра на анод-донор і акцептор-катодних інтерфейсів, тоді як у композитних структурах додатково з'являються між фазні просторові орґано-орґанічні, анод-акцептор і донор-катодні енергетичні бар'єри.

У четвертому розділі дисертації розглядається питання розроблення та дослідження високоефективних світловипромінювальних структур на основі нових синтезованих амбіполярних напівпровідників, проведено дослідження спектрів флуоресценції, спектрів поглинання, квантових виходів і кривих загасання флуоресценції розчинів матеріалу в THF і твердих плівках. Проведено також дослідження рухливості носіїв заряду сполук, які показали, що ці сполуки мають як діркову, так і електронну провідність, що характеризує їх як амбіполярні напівпровідники.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

В дисертації Іванюк Х.Б. основну увагу зосереджено на вирішенні наукової задачі розроблення світловипромінюючих структур з нанометровими товщинами функціональних шарів на основі біполярних карбазоловмісних напівпровідників, зокрема, світловипромінюючих структур на основі амбіполярних напівпровідникових матеріалів і донорно-акцепторних гетероструктур. Використовуючи вперше синтезовані напівпровідники на основі похідних перилену і карбазолу розроблені високоефективні флуоресцентні ОСВС,

що відкриває можливості їх використання в дисплейних технологіях. До найсуттєвіших наукових результати роботи слід віднести наступні:

1. Використовуючи вперше синтезовані напівпровідники на основі похідних перилену та карбазолу, розроблено високоефективні флуоресцентні ОСВС синьо-зеленого та зеленого кольору свічення. Розроблені структури ІТО/DMAC36/PCz-13/Vphen/Ca/Al (Д), ІТО/DMAC36/PCz-19/Vphen/Ca/Al (Е), ІТО/DMAC36/PCz-12/Vphen/Ca/Al (Є) характеризуються низькими напругами ввімкнення 2,0-2,2В, високою яскравістю (14500кд/м² для пристрою Д, 31300 кд/м² для пристрою Е та 62000 кд/м² для пристрою Є). Зовнішня квантова ефективність ОСВС досягає 4,2% для пристрою Є, а для Д та Е 3,7% і 1,9% відповідно. Така висока ефективність виготовлених структур зумовлена високим квантовим виходом, флуоресценції для сполук, а також, у випадку пристрою Є, високою рухливістю носіїв заряду.

2. Встановлено, що імпедансна спектроскопія пошарової структури в обох випадках (як експеримент так і моделювання) однозначно вказують на відсутність енергетичного бар'єра на анод/донор і акцептор/катодних інтерфейсах, тоді як у композитних структурах додатково з'являються міжфазні просторові органи/органічні, анод/акцептор і донор/катодні енергетичні бар'єри. Виникнення негативної ємності при низьких частотах у пошаровій структурі, коли напруга перевищує порогову, викликане дрейфовим струмом, що виникає в результаті випромінювальної рекомбінації.

3. Виявлена ділянка негативного диференціального опору в припорогових ділянках залежності густини струму від напруги пошарової структури, що викликано резонансним тунелюванням електронів у шарі ТНСА через бар'єр Vphen/ТНСА і генераційно-рекомбінаційними процесами у ТНСА. Це припущення підтверджується виникненням негативної ємності при низьких частотах на діаграмі Найквіста для пошарової структури.

4. Розроблена методики визначення вольт-яскравісних (ВЯХ) та колірних характеристик ОСВС, які є площинними джерелами світла, (на відміну від неорганічних точкових СВС, які є точковими джерелами світла, а також розроблено програмне забезпечення для розроблених методик вимірювання характеристик ОСВС. Отримані дані експериментальних досліджень рухливості обох типів носіїв заряду в досліджуваних амбіполярних органічних напівпровідникових нанорозмірних плівках, отриманих методом термовакuumного осадження.

5. На залежності густини струму від напруги в пошаровій структурі ІТО/CuI/ТНСА/Vphen/Ca/Al виявлено ділянку негативного диференційного опору, природа якого зумовлена резонансним тунелюванням електронів у шарі ТНСА через бар'єр Vphen/ТНСА і генераційно-рекомбінаційними процесами у ТНСА. Додатковим підтвердженням цього факту є виникнення негативної ємності на низьких частотах на діаграмі Найквіста.

Слід зазначити, що дисертація Іванюк Х.Б. має ще й **практично-прикладну спрямованість. А особливої уваги, як результат проведених досліджень, заслуговує:**

- реалізація нового програмного комплексу для розрахунку й моделювання яскравісних та колірних характеристик ОСВС, що одночасно дозволить як проводити моделювання ОСВС в процесі їх створення, так і використовувати комп'ютерне моделювання як інструментарій дослідження характеристик ОСВС.

- має практичне значення модернізація установки термовакuumного осадження органічних плівок з метою контрольованого одночасного осадження двох матеріалів із різних випарників та вакуумного шлюзування зразків у робочу камеру зі збереженням залишкового тиску в робочій камері.

- створені експериментальні ОСВС білого та жовтого кольорів свічення ексиплексного типу емісії методом пошарового та композитного термовакuumного осадження ТНСА, m-MTDATA та Vphen органічних матеріалів, а для повноколірних і монохромних дисплеїв створені високоефективні органічні світлодіоди зеленого кольору свічення на основі нових амбіполярних матеріалів PCz-13, PCz-19 і PCz-12.

- розроблені структури за параметром зовнішньої квантової ефективності 5,28%, відповідає рівню сучасних ефективних флуоресцентних білих ОСВС

- запропоновано та розроблено схемотехнічне рішення автоматичного регулювання яскравості свічення ОСВС у залежності від освітленості приміщення для оптимізації режимів роботи та зниження енергоспоживання.

- проаналізовано вплив технології формування ОСВС на оптоелектричні характеристики пристроїв і показано, що технологічні методи осадження не мають вирішального впливу. Вибираючи технологію осадження необхідно більше брати до уваги особливості функціональних матеріалів.

- для прогнозування температурного режиму роботи ОСВС були досліджені термічні характеристики цих матеріалів, які показали, що всі сполуки (PCz-13, PCz-19, PCz-12) мають високу термічну стабільність - до 175-220°C.

- нові структурні прикладні і технологічні рішення зі створення приладних структур ОСВС захищені патентами України на корисні моделі.

Фактично, новизна цієї дисертації не обмежується лише зазначеними положеннями і розробками. Можна відзначити ще й інші експериментально виявлені, підтверджені комп'ютерним моделюванням рішення, які визначають ефективність ОСВС, які можуть бути використані при проектуванні світловипромінювальних і дисплейних пристроїв.

Достовірність і новизну висновків і рекомендацій отриманих дисертантом наукових висновків і рекомендацій, запропонованих рішень підтверджується використанням сучасних експериментальних методик і методів, зокрема, фізичних і математичних методів дослідження, які підтверджені результатами експериментальних перевірок. Запропоновані автором рішення і рекомендації підтверджується обґрунтуванням базових положень, результатами апробації. Експериментальні результати отримані на сучасному технологічному та вимірювальному обладнанні, володіють доброю відтворюваністю параметрів органічних пліткових нанорозмірних структур на основі відпрацьованих технологічних режимів їх формування, а також

результатами в цій галузі інших авторів. Тому отримані результати можна вважати перспективними як для подальших наукових досліджень, так і використання в науково-дослідних роботах зі створення реальних ОСВ приладних структур.

Однак, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація та автореферат не позбавлені певних недоліків і зауважень. Серед них відзначаю наступні:

1. На мою думку, недостатньо пояснено фізичний механізм вищої ефективності ОСВС пристроїв, виготовлених за допомогою термовакуумного нанесення з високою шорсткуватістю поверхні плівки який показав вищу ефективність, ніж аналог із гладшою поверхнею, виготовлений із розчину (стр.34.). Можливо розуміння цього впливу спонукало б до пошуку і створення регулярно повторюваної топології і морфології поверхні із заданими параметрами жорсткуватості виступів(розміри і висоти виступів).

2. Було б доцільним навести у дисертації прогнозовані характеристики надійності розроблених приладних ОСВС на основі досліджень змін у часі (напрацювання на відмову) вольт-амперних, вольт-яскравісних та світловипромінювальних характеристик. Такі дані необхідні для визначення прогнозованих параметрів надійності на стадіях проектування та експлуатації.

3.П.2.3. має назву: «Розроблення електричної принципової схеми регулювання яскравості ОСВС», на рис.2.8. «Зображення схеми електричної принципової для автоматичного регулювання яскравості свічення світло діода....». Коректнішою є назва як на рис.2.8. Те ж саме стосується назви і на рис.2.14.

4. Рис. 2.13. має назву «Принципова схема розробленого блока керування установкою УВР-3М», хоча реально зображено «Зовнішній вигляд модуля, а саме, розробленого блока керування установкою УВР-3М на друкованій платі із змонтованими електронними компонентами». Рис.4.2. було доцільніше назвати як блок-схема та фотографія пристрою вимірювання потенціалу іонізації.

5. Мають місце окремі неточності написання в авторефераті, напр., є описки - «гетеструктура» стр.7., «струмому» стр.9., є окремі вітсутні пробіли (Рис.8. Вольт-амперніта) та подібні. Вітсутні пробіли між словами мають місце і в дисертації. Напр., стр.42, 48 та ін.. На стор. 95. 4-ри слова злиті в одне: «фрагментафенантрокарбазолувідбувається».

6. Було б доцільним навести в авторефераті не тільки приклади характеристик ОСВС різних типів, а й поперечні перетини самих приладних структур. Це полегшило б сприйняття інформації, і дисертація спрямована власне на розроблення ОСВС.

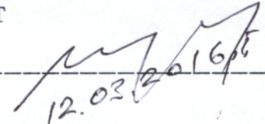
Однак вказані зауваження і недоліки суттєво не впливають на цінність дисертації в цілому. Вона складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних літературних джерел із 140 найменувань. Дисертація викладена на 129 сторінках, містить 58 рисунків, 11 таблиць. Результати досліджень опубліковані в 11 наукових працях, із них: 7 статей у фахових виданнях, 4 із них входять до науко-метричних баз даних, 2 патентах України на корисні моделі, 4 - матеріалах доповідей на конференціях. Що підтверджує

повноту висвітлення результатів у наукових працях та особистий внесок здобувача.

Автореферат дисертації в лаконічній формі повністю відповідає її змісту та опублікованим роботам, основним положенням дисертації. В ньому подано коротку інформацію про кожний з розділів дисертації, а також інші необхідні дані. Дисертація та автореферат оформлені у відповідності до вимог МОН України.

Висновок На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертація **Іванюк Х.Б. «Розроблення нанорозмірних світловипромінювальних структур на основі амбіполярних карбазоловмісних напівпровідників»** є завершеною науково-дослідницькою працею, у якій розв'язано науково-прикладну задачу з дослідження впливу технології осадження органічних плівок на електрооптичні характеристики ОСВС, встановлення оптимальних технологічних режимів і розробці на цій основі амбіполярних карбазоловмісних світловипромінювальних структур та донорно-акцепторних гетероструктур. Такі структури є перспективними для використання у технологіях виготовлення дисплеїв. За рівнем виконання, актуальністю роботи, обґрунтованістю і достовірністю наукових досліджень і висновків, науковою новизною, кількістю наукових публікацій, об'ємом - дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.27.01 – твердотільна електроніка і вимогам МОН України, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук відповідно до пункту 13 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань” а її автор, **Іванюк Христина Богданівна**, заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Офіційний опонент - доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника»


12.03.2016 р. І.Т. Когут

