

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ІВАНЮК Христина Богданівна



УДК 621.382.592

**Фізико-технологічні основи формування органічних та гібридних
світловипромінювальних структур із заданими спектрально-енергетичними
характеристиками**

05.27.06 Технологія, обладнання та виробництво електронної техніки

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

ЛЬВІВ – 2025

Дисертацією є наукова доповідь.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Стахіра Павло Йосипович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри електронної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Музика Катерина Миколаївна,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, професор кафедри біомедичної
інженерії;

доктор фізико-математичних наук, професор
Довбешко Галина Іванівна,
Інститут фізики НАН України, головний науковий
співробітник за спеціальністю фізика твердого тіла;

доктор технічних наук, професор
Ціж Богдан Романович
Львівський національний університет ветеринарної
медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького,
завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін.

Захист відбудеться 29 травня 2025 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, аудиторія 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Реферат розісланий «28» квітня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13
д.т.н., проф.



Галина КЛИМ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасних умовах нестабільного функціонування енергетичної системи необхідним є мінімізація енергоспоживання. В цьому контексті впровадження новітніх енергоощадних систем освітлення є одним із пріоритетних напрямів державної політики України (закон України про енергетичну ефективність №1818-IX від 21.10.2021р. та ст.6. закону України №3764-IX від 04.06.2024р.). Сьогодні в країні на освітлення витрачається близько 30% усього обсягу генерованої електроенергії. Слід зауважити, що відповідно до директиви, упродовж найближчих 9 років кожна з 27 країн ЄС щорічно має досягати щонайменше 1% економії електроенергії в усіх сферах її споживання. Одним з пріоритетних напрямків енергоощадності є розробка і впровадження новітніх систем освітлення на основі альтернативних вискоефективних джерел випромінювання. Основними критеріями оцінки ефективності джерел світла є чотири основні параметри, а саме: якість кольору, яскравість свічення та ефективність, яка включає в себе струмову ефективність, енергоефективність та зовнішню квантову ефективність, а також термін безвідмовного функціонування пристрою. Конкурентоспроможність сучасних освітлювальних систем і дисплейних технологій потребує безперервне вдосконалення технології виготовлення приладів, оптимізації якості кольору та розроблення нових архітектурних рішень побудови пристрою для їх широкого застосування.

Дисертація спрямована на комплексне вирішення основних наведених задач в галузі органічної світловипромінювальної електроніки від підбору новосинтезованих амбіполярних органічних напівпровідників та квантових точок для мультифункціональних шарів нанорозмірних гетероструктур до реалізованих конструкторсько-технологічних розробок вискоефективних OLED- та QLED-пристроїв різних типів генерації. Такий підхід вимагає проведення фундаментальних та прикладних досліджень природи люмінесценції молекулярних плівок та гетероструктур на їх основі, розробку нових методів технологічної імплементації, сполук органічної та неорганічної природи в світловипромінюючу гетероструктуру, та ефективних архітектурних рішень побудови OLED - пристроїв для RGB - кольорних систем, дисплейних технологій та білого кольору свічення дифузних систем освітлення, на основі екологічно чистих матеріалів. З урахуванням викладеного, дисертація має наукову й практичну цінність, а її результати є актуальними для галузі електроніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до тематики науково-дослідних робіт кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка» та містить результати міжнародних проектів в рамках програми Горизон 2020, що фінансувалися коштом ЄС, в яких дисертант був виконавцем та фінансовим лідером: «Багатокольорові амбіполярні провідні полімери для однополімерних оптоелектронних пристроїв» (AmbiPOD), 2014–2017 pp. (FP7 Marie Curie International Research Staff Exchange project "Multicoloured ambipolar conducting polymers for single polymer optoelectronic devices" (AmbiPOD)2014-2017), «Випромінювачі без важких металів для джерел світла нового покоління» (MEGA Marie Curie International Research Staff Exchange

project “Heavy metal free emitters for new-generation light sources” 2019-2023). Дисертація також містить результати М57/2020 «Розробка високоефективних органічних білих світлодіодів на основі експлексної та уповільненої флюоресценції для новітніх систем освітлення» (2020). В дисертації також використано результати держбюджетних науково-дослідних робіт, що фінансувалися МОН України, в яких дисертант був керівником, або виконавцем НДР: «Вплив структурної організації органічних напівпровідників на люмінесцентні та фотоелектричні параметри приладів органічної електроніки» (№ держреєстрації 0119U100259, 2010-2021pp.), «Розроблення плазмонних наноструктурованих підкладок для підсилення SERS сигналу при детектуванні вибухових речовин» (№ держреєстрації 0124U000823, 2024-2026pp). У дисертації також використано результати наукового проекту, що фінансувався за кошти Державного фонду фундаментальних досліджень (ДФФД), у якому дисертант був керівником «Розробка інтегрованих органічних електронних пристроїв ближньої інфрачервоної області», (83/89-2018, 2018).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є вирішення науково-прикладних проблем покращення яскравості, ефективності та якості кольору приладів сучасних дисплейних технологій та систем дифузного освітлення шляхом впровадження нових концептуальних конструкторсько-технологічних рішень формування мультифункціональних світловипромінювальних органічних та гібридних гетероструктур на основі новосинтезованих донорно-акцепторних низькомолекулярних органічних та нанорозмірних неорганічних і металоорганічних напівпровідників.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити такі наукові та практичні завдання:

1. Дослідити механізми затриманої флуоресценції (TADF та TTA) в сполуках з внутрішньомолекулярними донорно-акцепторними комплексами перенесення енергії з метою їх застосування як емітерів у високоефективних органічних світловипромінювальних структурах.
2. Розробити архітектурний дизайн гетероструктур з міжмолекулярними донорно-акцепторними комплексами для отримання затриманої флуоресценції в повноколірних світловипромінювальних структурах.
3. Дослідити електролюмінесценцію розроблених повноколірного OLED з багатоканальною TADF емісією в умовах парамагнітного резонансу (electroluminescence detected magnetic resonance (ELDMR)).
4. Провести дослідження ефекту агрегації та механохромізму в гетероструктурах на основі новосинтезованих органічних емітерів з метою керування показниками колірності та зовнішньою квантовою ефективністю в органічних гетероструктурах.
5. Дослідити технологічні можливості багатфункціонального застосування планарних 2D молекул для світловипромінювальних гетероструктур.
6. Розробити технологічні підходи реалізації каналів перенесення енергії від органічної компоненти до неорганічної гостьової компоненти в світловипромінювальних композитних гетероструктурах на їх основі.
7. Розробити архітектуру безрезонаторної рідкокристалічної структури для оптичного підсилення вузьконаправленого випромінювання.

Об'єктом дослідження є - технологічні процеси отримання органічних та неорганічних тонких плівок, органічних та гібридних світловипромінювальних гетероструктур.

Предмет дослідження - фізико-технологічні основи формування органічних та неорганічних плівок, а також органічних і гібридних світловипромінювальних структур на їх основі.

Методи дослідження. У роботі використані методи оптичної та інфрачервоної спектроскопії; електронної, оптичної та атомно-силової мікроскопії; рентгенівського структурного аналізу для дослідження ефекту молекулярної агрегації; дослідження в атмосфері навколишнього середовища та при кімнатній температурі без додаткової герметизації; комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці технологічних та конструктивних засад формування мультифункціональних світловипромінювальних органічних і гібридних гетероструктур. У роботі розглянуто особливості та методи дослідження органічних донорно-акцепторних сполук, встановлено закономірності електролюмінесцентних властивостей гетероструктур від хімічної структури сполук, архітектури побудови та технологічних методів формування гетероструктур. Зокрема:

1. Продемонстровано, що створення умов, які мінімізують полярон-триплетну анігіляцію, та впровадження нових архітектур емітерів, дозволяють підвищити зовнішню квантову ефективність і яскравість глибоко-синіх OLED до рекордних значень.

2. Показано, що на основі інтеграції інтерфейсного та об'ємного ексіплексу, оптимізації енергетичних рівнів компонент для активації зворотного міжсистемного переходу (RISC) і використання ексіплексів як матриці для емісійних компонент вдається забезпечити затриману флуоресценцію та підвищити ефективність органічних світловипромінювальних діодів (OLED).

3. Встановлено, що використання ексіплексів як складових багатоканальної емісії дозволяє покращити параметри світловипромінювальних гетероструктур OLED. Зокрема, реалізація передавання енергії в інтерфейсі між ексіплексом та флуоресцентним емітером за механізмом Ферстера (FRET) сприяє підвищенню квантової ефективності (EQE) пристрою.

4. Запропоновано спін-чутливий метод діагностики (електролюмінесценція в умовах парамагнітного резонансу) внутрішньо-молекулярної та міжмолекулярної затриманої флуоресценції емітера та багатоканальної емісії на його основі, що дозволяє оцінити вплив процесу зворотного міжсистемного переходу (RISC) триплетного стану молекули або молекулярної системи у синглетний стан і в свою чергу вплив на ефективність роботи органічних світлодіодів.

5. Розроблено новий технологічний метод виготовлення світловипромінювальних пристроїв на основі квантових неорганічних наноструктур, що дозволяє покращити колірні характеристики та стабільність пристроїв при високих напругах живлення. Вперше застосовано метод «сухого розпилення» нанопорошку цирконату барію та модель переносу енергії між органічними та неорганічними компонентами, що дозволяє значно підвищити ефективність передачі енергії та покращити спектральні властивості пристроїв.

6. Продemonстровано можливість підсилення вузьконаправленого (лазерного) випромінювання флуоресцентного матеріалу (похідні тетрафенілетилену і дигідроіндолакарбазолу) у безрезонаторній рідкокристалічній фотонній структурі.

7. Показано, що двоканална емісія в гібридній гетероструктурі на основі квантових точок CdTe/CdS (ядро-оболонка), яка поєднує два механізми світловипромінювання емітера в межах структури, сприяє перенесенню енергії між квантовими точками та органічними молекулами, забезпечуючи стабільність структури, зменшуючи втрати енергії та підтримуючи рівновагу між енергетичними станами в процесі рекомбінації носіїв заряду.

8. Продemonстровано, що на основі нових планарних сполук, похідних карбазоловмісного тетрафлуоровінілфенілу, розроблені та сформовані різні типи органічних світловипромінювальних гетероструктур (COLED, IBOLED, QLED).

Практичне значення отриманих результатів. В дисертації досліджено та продemonстровано конструкторсько-технологічний вплив системи «гість – господар», створеної на основі новосинтезованих амбіполярних карбазоловмісних ціанотрифенілбензолів, на підвищення зовнішньої квантової ефективності органічних електролюмінесцентних пристроїв глибокого синього кольору. Досягнута ефективність у діапазоні від 10,9% до 14,1% підтверджує ефективність конструкції та застосування цих матеріалів у RGB - колірній моделі для сучасних дисплейних технологій.

Запропоновано та реалізовано технологічний підхід, що поєднує флуоресцентне, затримане флуоресцентне та ексіплексне випромінювання в межах однієї гетероструктури. Це дозволяє забезпечити багатоканальну емісію з регульованими характеристиками «теплого» білого та білого випромінювання, що відкриває нові можливості для створення ефективних світловипромінювальних пристроїв із широким спектром застосувань.

Розроблено технологічний метод створення РЗЗ-лазера, заснованого на органічних сполуках - похідних індолакарбазолу та рідкокристалічній холестерико-нематичній суміші, з оптичною накачкою на довжині хвилі 352 нм. Запропонований технологічний підхід до створення РЗЗ-лазерів на основі органічних сполук і рідкокристалічних сумішей відкриває нові можливості для розробки лазерів з налаштованими параметрами випромінювання на основі цілої серії сполук похідних індолакарбазолу та дозволяє адаптувати спектральні характеристики та й ефективність лазерів під конкретні, наперед задані вимоги.

Показано технологічну реалізацію електролюмінесценції квантових точок CdTe/CdS та CdSeS/ZnS в гібридних гетероструктурах, що забезпечують високу яскравість свічення понад 10 000 кд/м². Інтеграція різних типів квантових точок згідно з наведеними конструктивно-технологічними підходів в органічну світловипромінювальну гетероструктуру дозволила досягти високої чистоти кольору (FWHM= 30 нм) та значної ефективності (EQE до 4.5%) розроблених пристроїв.

Розроблений технологічний метод «сухого розпилення» у вакуумі (dry spray process) нанопорошку цирконату барію, імплементованого в архітектуру гібридної світловипромінювальної структури (ITO/TCTA/BaZrO₃/Bphen/Ca/Al), дозволив отримати електролюмінесценцію високотемпературного нанопорошку цирконату барію. Розроблений метод сприяє інтеграції високотемпературних матеріалів

(перовскит-цирконатів) у гібридні електронні структури з використанням термовакуумного осадження.

Багатофункціональне використання нових планарних сполук, похідних карбазоловмісного тетрафлуоровінілфенілу, дозволяє спростити технологічні процеси виготовлення RGB - дисплейних структур.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, які становлять суть дисертації, отримано та сформульовано автором особисто. Основні науково-практичні результати досліджень, наведені в дисертації, отримані автором особисто.

У спільних наукових роботах авторів належать:

- проведення аналізу природи внутрішньомолекулярного та міжмолекулярного перенесення енергії у світловипромінювальних структурах, а саме дослідження фотофізичних та кінетичних характеристик (часів загасання фотолюмінесценції в наносекундному та міросекундному діапазонах) новосинтезованих сполук та сумішей на їх основі. На основі проведених досліджень розроблено архітектури та сформовано гетероструктури з використанням різних конструкторських підходів для підвищення основних параметрів, а саме яскравості свічення, ефективності та кольорних параметрів [4,8,13,14,17];

- дослідження мультиканальної електролюмінесценції квантових точок у QLED, а саме природи перенесення енергії від органічної структури до неорганічної компоненти в світловипромінювальній гетероструктурі, та конструкторсько-технологічна реалізація гібридної структури з розробленими підходами технологічного осадження: методом термовакуумного осадження, осадження з розчину та метод «сухого розпилення» у вакуумі (dry spray process) [11,16];

- дослідження механохромізму та електролюмінесценції в органічних світловипромінювальних структурах на основі новосинтезованої сполуки на скляних та гнучких підкладках [5];

- дослідження електролюмінесцентних властивостей новосинтезованих сполук, що включає: розроблення архітектури та технологічне формування органічних світловипромінювальних структур на основі новосинтезованих сполук; вимірювання яскравісних та вольт-амперних характеристик сформованих структур; розрахунок енергоефективності, струмової ефективності та зовнішньої квантової ефективності [1-20];

- розроблення рідкокристалічної холостерико-нематичної суміші з органічним барвником та дослідження можливості лазерної генерації новосинтезованих сполук у рідкокристалічних лазерах з розподіленим зворотнім зв'язком [6];

- дизайн та технологічно-конструкторська реалізація повноколірної гетероструктури та її складових з багатоканальною емісією. Структури сформовані на основі флуоресцентних та TADF сполук, а також ексіплексів та досліджені основні електрофізичні параметри сформованих світловипромінювальних структур [4,13];

- експериментальне дослідження багатоканальної електролюмінесценції повноколірної гетероструктури в умовах парамагнітного резонансу. Розраховано екситонний радіус та локалізацію екситону в структурі. З температурної залежності електролюмінесценції розраховано енергетичну щілину між першим збудженим синглетним та триплетним рівнями [7];

- конструкторські та технологічні рішення багатофункціонального застосування

новосинтезованих планарних сполук (похідні карбазоловмісного тетрафлуоровінілфенілу) для розроблення різних типів органічних світловипромінювальних гетероструктур (COLED, IBOLED, QLED) RGB системи для дисплейних технологій [1-3,9,10,12,18-20];

- запропонована концепція та технологічне рішення підвищення ефективності світловипромінювальної гетероструктури за допомогою використання розроблених архітектурних рішень: використання системи «гість-господар», інтерфейсного та об'ємного типів ексіплексів, перенесення енергії від ексіплексної складової до гостьової компоненти, введення додаткових функціональних шарів [10,15,17,19].

Апробація результатів досліджень. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на конференціях:

- 10-th Conference "ELectronic processes in organic and in organic materials" ICEPOM-10, (May 23-27, 2016) – Ternopil, Ukraine, 2016;
- Baltic Polymer Symposium 2016. Klaipeda. September 21-24, 2016;
- International scientific conference, dedicated to the 75th anniversary of Professor Boris Minaev, September 25–26, 2018, Cherkasy, Ukraine;
- Photonics applications in astronomy, communications, industry, and high-energy physics experiments 2018, 2018, Wilga, Poland;
- XI International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-11), May 21–25, 2018, Ivano-Frankivsk, Ukraine;
- 8th International Scientific Practical Conference "Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage of Information in Infocommunication Systems", Chernivtsi, 2019;
- International conference "Baltic polymer symposium 2020" (Zoom);
- VIII International Conference "Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2020)": 26–29 August 2020, Lviv, Ukraine;
- International research and practice conferenceN "anotechnology and nanomaterials (NANO-2023)" 16 -19 August 2023;
- 25th International conference-school "Advanced materials and technologies", Palanga, Lithuania, 21–25 August, 2023.

Публікації. Основні положення та результати дисертації викладені автором у 52 наукових публікаціях, зокрема в 20 статтях в наукових фахових виданнях України та інших держав, які індексовані міжнародними наукометричними базами даних Scopus та/або Web of Science (із них 18 статей у журналах з Q1 та Q2, 2 статті в спеціалізованих фахових виданнях категорії Б), 3 патентах України на корисну модель, 2 монографіях та 27 матеріалах і тез доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 487 сторінок, у тому числі 140 сторінок основного тексту, 15 таблиць, 73 рисунки, список використаних джерел із 120 найменуваннями та додатки на 290 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, викладені мета і завдання роботи, наведено методи досліджень, сформульовані наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, надано інформацію стосовно їх впровадження. Зазначено особистий внесок здобувача, подано відомості про апробацію результатів дисертації, публікації за темою досліджень, а також короткий опис структури та обсягу дисертаційної роботи. Обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження та сформульовано його завдання.

У **першому розділі** проведено аналіз літературних джерел, за результатами якого визначено основні властивості органічних донорно-акцепторних напівпровідникових сполук та гетероструктур на їх основі, шляхи підвищення їх ефективності та колірних параметрів. Визначено переваги та недоліки існуючих конструкторсько-технологічних методів побудови світловипромінювальних гетероструктур щодо їх практичного застосування. Відзначено, що структура і властивості органічних напівпровідникових плівок суттєво залежать від технологічних умов їх отримання.

Сформульовано проблему та визначено основні завдання дисертаційного дослідження щодо розроблення органічних та гібридних гетероструктур для високоефективних світловипромінювальних пристроїв на основі донорно-акцепторних органічних сполук, квантових точок та наночастинок ZnO.

У **другому розділі** предстало особливості експериментальних комплексних методів дослідження кінетики загасання швидкої та затриманої флуоресценції новосинтезованих органічних сполук як емітерів для світловипромінювальних гетероструктур. Наведено розроблені конструктивно-технологічні рішення формування високоефективних органічних світловипромінювальних структур на основі донорно-акцепторних новосинтезованих сполук з наявною затриманою флуоресценцією різної природи.

Запропоновані в роботі рішення уможливили підвищення квантової ефективності структури, оскільки лише 25 % інжекттованих носіїв заряду утворюють емісійні синглетні стани, а 75 % є безвипромінювальними триплетними станами у флуоресцентних гетероструктурах. Задіяні зворотні міжсистемні перехресні переходи (RISC) дозволяють залучати триплетні екситони до випромінювальної рекомбінації, що значно підвищує ефективність пристроїв на основі затриманої флуоресценції. Однак затримана термоактивована флуоресценція (TADF) може бути індукована, якщо донорно-акцепторні молекули демонструють невелике розщеплення енергії ΔE_{ST} між синглетним і триплетним станами. ΔE_{ST} переважно визначається перекриттям орбіталей між вищою зайнятою молекулярною орбіталлю (HOMO) і нижчою вакантною молекулярною орбіталлю (LUMO) електронів і дірок, що утворюють екситони. Отже, стратегія досягнення малого значення ΔE_{ST} полягає у розробці молекул, які мають просторово розділені рівні HOMO і LUMO. Одним із способів досягнення є молекули зі «скрученими» донорними та акцепторними фрагментами, що утворюють стани внутрішньомолекулярного перенесення заряду (CT), або у відповідних комбінаціях окремих донорних та акцепторних молекул, що утворюють міжмолекулярні ексиплексні стани.

Крім механізму TADF, задіяння триплетних екситонів можливе також за

механізмом триплет-триплетної анігіляції (ТТА). Хоча OLED на основі TADF можуть реалізовувати вищу квантову ефективність порівняно з пристроями на основі ТТА, останні є перспективними для практичного застосування завдяки більш тривалому терміну безвідмовної роботи та експлуатаційній стабільності.

Беручи до уваги вищенаведені факти, у роботі проведено комплексний аналіз новосинтезованих сполук пара- та мета-спряжених похідних карбазолу як перспективних кандидатів для використання їх як ТТА-емітерів.

Зазвичай, успішне використання системи «гість-господар» передбачає узгодження енергетичних положень перших триплетних рівнів відповідних компонент системи та потенціальних бар'єрів на інтерфейсах шарів архітектури пристрою. В роботі представлено дві архітектури пристроїв. Особливістю структури А (еталонна) ITO/CuI/TBP/mCP:p-TPB-m-Cz/PBD/Ca/Al є використання комерційної матричної компоненти mCP, на відміну від якої в структурі В використано новосинтезовану сполуку m-TPB-m-Cz (рис. 1). Проведений порівняльний аналіз спектрів електролюмінесценції двох гетероструктур (рис. 2) показав, що використання різних матриць не змінює спектральне випромінювання порівняно з спектрами фотолюмінесценції плівок емітера.

Однак спектр електролюмінесценції приладу А звужений та має плече в довгохвильовій області спектру, яке можна пояснити утворенням чи рекомбінацією ексимера та/або електромера емісійного шару. Проте, як видно з табл.1 світловипромінювальні характеристики цих двох пристроїв кардинально відрізняються. Розроблена світловипромінювальна гетероструктура В глибокого синього кольору емісії з колірними координатами 0.22, 0.19 (CIE 1931) має зовнішню квантову ефективність 14,1%.

Такі екстремально високі значення для глибоко-синьої електролюмінесценції вказують на близьке до максимального задіяння триплетних екситонів у випромінювальній рекомбінації ймовірно через механізм триплет-триплетної анігіляції. Таким чином, технологічно оптимізували і максимізували етап «збирання» триплетних екситонів, що, у поєднанні з майже стовідсотковим квантовим виходом фотолюмінесценції емітера, дозволило досягнути оптимального значення зовнішньої квантової ефективності гетероструктури.

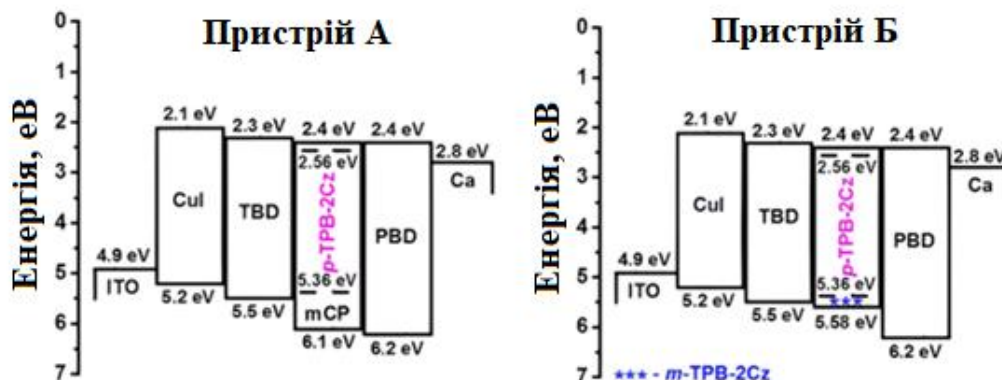


Рис.1. Схематичні енергетичні діаграми сформованих пристроїв А та Б

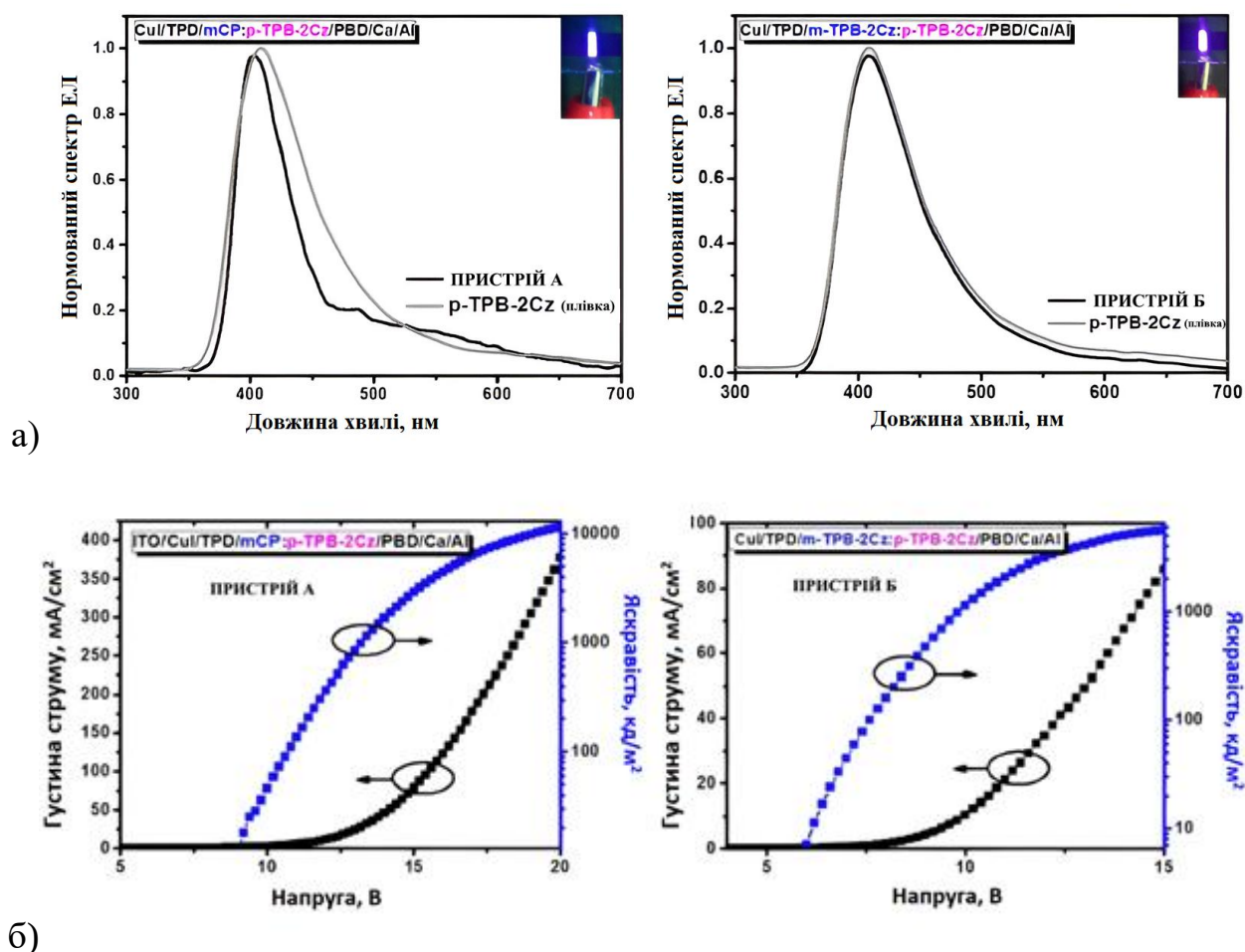


Рис. 2. Спектри електролюмінесценції та фотолюмінесценції пристроїв (а), та вольт-амперні і вольт-яскравісні характеристики розроблених пристроїв (б).

Таблиця 1. Електрофізичні параметри сформованих пристроїв.

Пристрій	Гостьова компонента	Напруга вкл., В	Яскравість, кд/м ²	Струмова ефективність, кд/А	Енерго-ефективність, лм/Вт	Зовнішня квантова ефективність, %	CIE 1931 (x,y)
А	mCP	8.4	11450	3.7	0.85	3.5	(0.25;0.23)
Б	m-TPB-2Cz	5.8	5500	11.1	4.2	14.1	(0.22;0.19)
В	m-TPB-2Cz	5.4	4800	9.8	8.0	10.8	(0.22;0.19)
Г	m-TPB-2Cz	6.0	8061	11.6	5.6	13.1	(0.22; 0.19)

Іншим з можливих варіантів реалізації затриманої флуоресценції є TADF ефект. З цією метою в роботі досліджено та технологічно імплементовано серію амбіполярих сполук з наявною затриманою флуоресценцією в

світловипромінювальних гетероструктурах синього та небесно-блакитного кольору з максимальною зовнішньою квантовою ефективністю та значеннями яскравості 9,0% і 43000 кд/м⁻² відповідно (рис. 3).

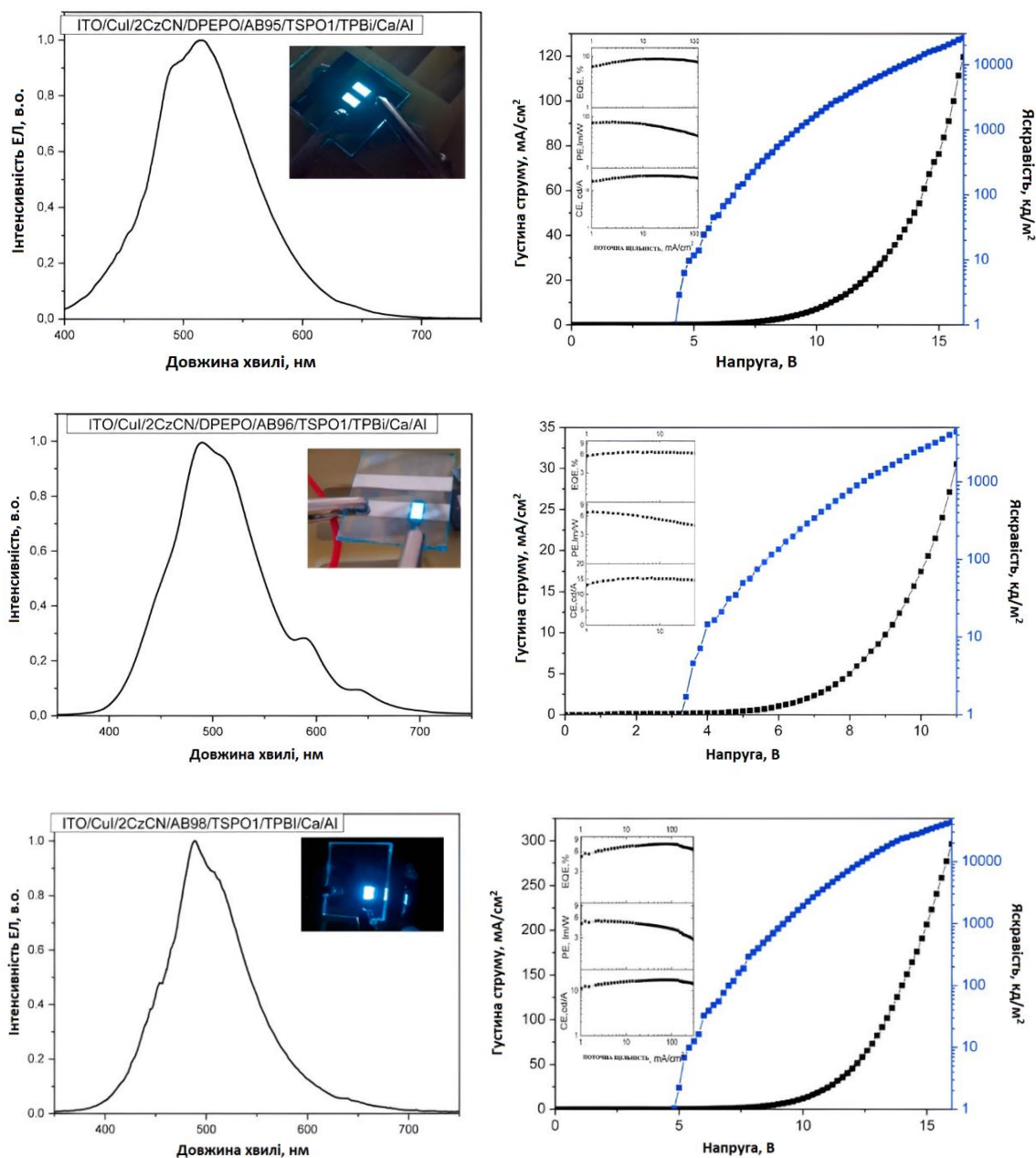


Рис. 3. Спектри електролюмінесценції і вольт-амперні та вольт-яскравісні характеристики розроблених пристроїв.

На основі комплексного вивчення фотофізичних характеристик досліджуваних емітерів (AB95, AB96, AB98) та аналізу електролюмінесцентних параметрів відповідних світлодіодів на їх основі, виявлено задіяння вібронних переходів у механізмі TADF за рахунок опосередкованої участі другого триплетного стану T₂ у процесі випромінювальної рекомбінації. Отримані електрофізичні параметри пристроїв можна порівняти з сучасними результатами в серії традиційних небесно-блакитних OLED.

У **третьому розділі** продемонстровані розроблені конструкторсько-технологічні методи реалізації міжмолекулярних донорно-акцепторних комплексів для отримання

затриманої флуоресценції в повноколірних світловипромінювальних структурах.

Загально відомо, що одним з основних ефективних підходів технологічного забезпечення TADF в OLED системах є міжмолекулярна активація триплетних емісійних станів на бінарній донорно-акцепторній молекулярній системі – ексіплексу, що уможливорює задіяння процесу зворотнього міжсистемного переходу (RISC) між молекулами донора та акцептора. З метою отримання наперед заданого максимуму ексіплексної емісії підбір донорної та акцепторної складової в роботі розраховувався зі співвідношенням 1:

$$\hbar\omega_{ex}^{max} \sim I_P^D - E_A^A - E_c \quad (1)$$

де I_p^D -потенціал іонізації донора, E_A^A - спорідненість до електрона акцептора, E_c -енергія електронно-діркового кулонівського взаємодії (0,35 еВ – типове значення для енергії зв'язку e-h в органічних матеріалах).

В роботі досліджена і впроваджена в гетероструктуру сполука 4, як емісійна компонента (A: ITO/MoO₃/4/Bphen/Ca:Al) та акцепторна частина ексіплексу в поєднанні з комерційною донорною складовою (ТСТА або m-MTDATA). Конструкторсько-технологічною особливістю розробленої структури було формування як інтерфейсного, так і об'ємного ексіплексу в одній гетероструктурі (B: ITO/m-MTDATA/ТСТА:4/Bphen/Ca:Al) (рис. 4, 5).

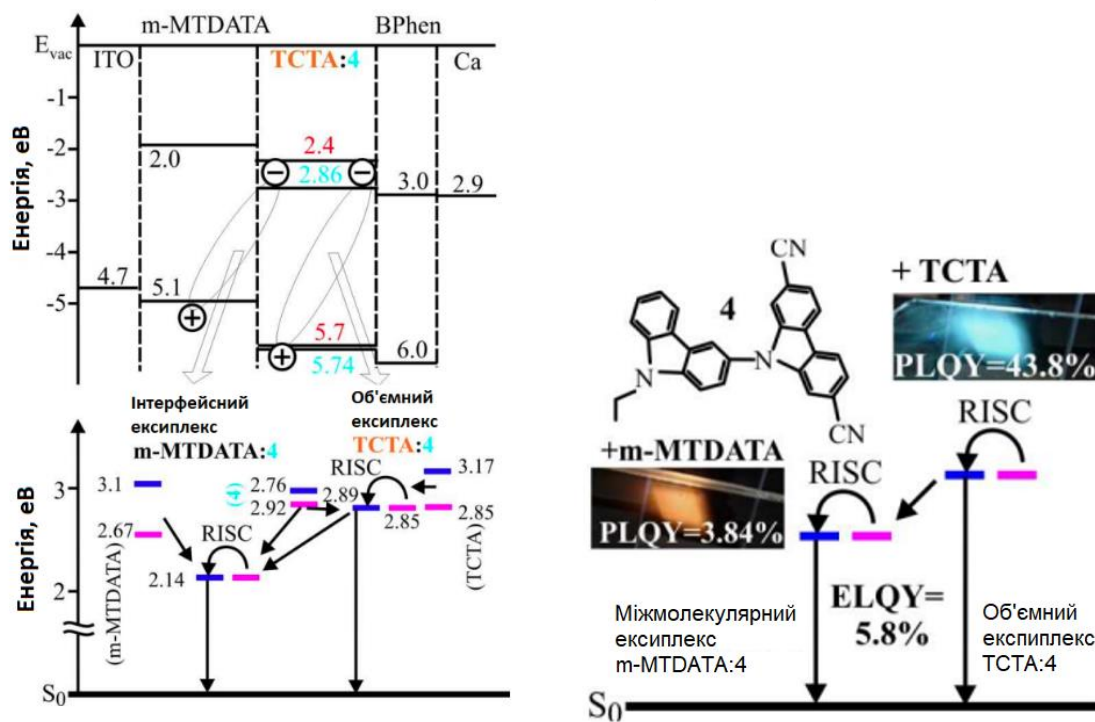


Рис. 4. Енергетична діаграма сформованих гетероструктур.

Спектр електролюмінесценції розроблених гетероструктур представлений на рис.5 і відповідає спектрам фотолюмінесценції сумішей ТСТА:4 та m-MTDATA:4, що свідчить про наявність ексиплексного випромінювання небесно-блакитного та жовтого кольору світіння.

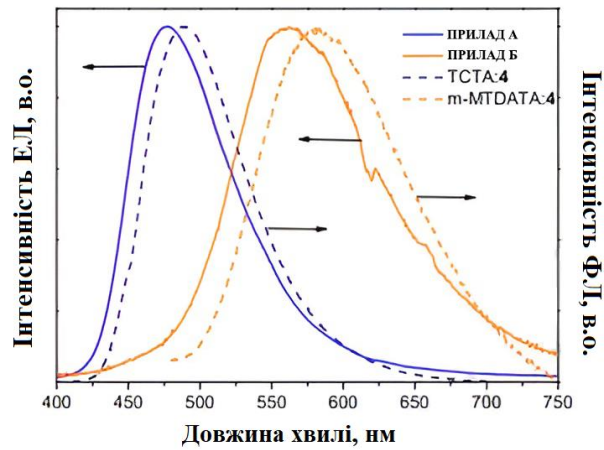


Рис. 5. Спектри фотолюмінесценції сполуки та суміші сполук і електролюмінесценції сформованих гетероструктур.

Фотофізичні дослідження сполуки 4 демонструють часи загасання фотолюмінесценції в наносекундному діапазоні (27 нс), тоді як для сумішей TCTA:4 і m-MTDATA (рис. 6) демонструють мікросекундні часи загасання фотолюмінесценції (193 нс і 305 нс), що є типовими часами загасання TADF ексіплексів через зворотний міжсистемний перехід (RISC) між синглетним та триплетним станами. RISC відбувається через невелике значення різниці синглет-триплетного рівнів (ΔE_{ST}) ексіплексу, яке, як було експериментально встановлено, становить 0,05 eV для TCTA:4 та 0,09 eV для m-MTDATA:4. Квантовий вихід фотолюмінесценції досліджуваних сумішей становить 43,8 % і 3,84 % відповідно для TCTA:4 та для m-MTDATA:4.

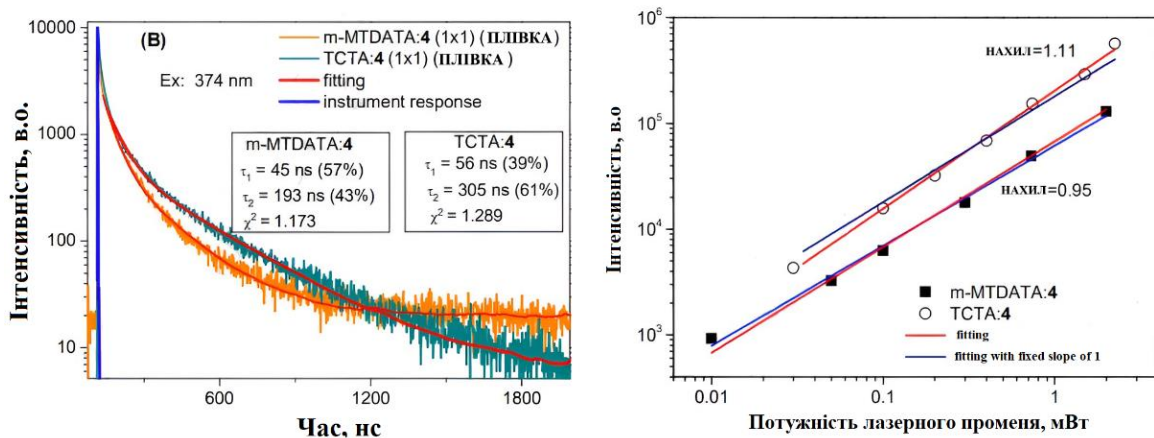


Рис. 6. Нормовані криві загасання фотолюмінесценції твердотільної плівки ексіплексних сумішей.

Показано, що еталонна світловипромінювальна гетероструктура на основі сполуки 4 (пристрій А) демонструвала електролюмінесценцію в синій області спектру з зовнішньою квантовою ефективністю 2,0 %, що є типовою для флуоресцентних OLED. При цьому, ексіплексна гетероструктура В демонструвала TADF емісію жовтого кольору з максимальною зовнішньою квантовою ефективністю 5,8 %. Максимум спектру емісії співпадає з максимумом фотолюмінесценції m-MTDATA:4 суміші. Незважаючи на низьку ефективність ексіплексу m-MTDATA:4, архітектура гетероструктури уможливила резонансну передачу енергії від об'ємного до

інтерфейсного ексіплексу (рис. 4).

Наступний технологічний підхід покращення параметрів світловипромінювальних гетероструктур, запропонований в роботі, полягав в імплементації ексіплексів як однієї зі складових багатоканальної емісії повноколірних OLED (WOLED).

На рис. 7 представлено енергетичну діаграму розроблених пристроїв на основі новосинтезованої донорно-акцепторної сполуки (PyPhDMAC). Особливістю структури є подвійне використання сполуки як синього TADF-емітера, так і акцепторної складової ексіплексу.

Розроблені два типи структур та комбінована світловипромінювальна гетероструктура з багатоканальною емісією:

A: ITO/CuI(8нм)/TPD(40нм)/PyPhDMAC(20нм)/TSPO1(4нм)/TPBi(40нм)/Ca(50нм)/Al(200нм)

B: ITO/CuI(8нм)/m-MTDATA(40нм)/PyPhDMAC(20нм)/TSPO1(4нм)/TPBi(40 нм)/Ca(50нм)/Al(200нм)

C: ITO/CuI(8нм)/m-MTDATA(40нм)/PyPhDMAC(20нм)/TSPO1(4нм)/m-MTDATA(40 нм)/TSPO1(4нм)/TPBi(40 нм)/Ca(50 нм)/Al(200нм)

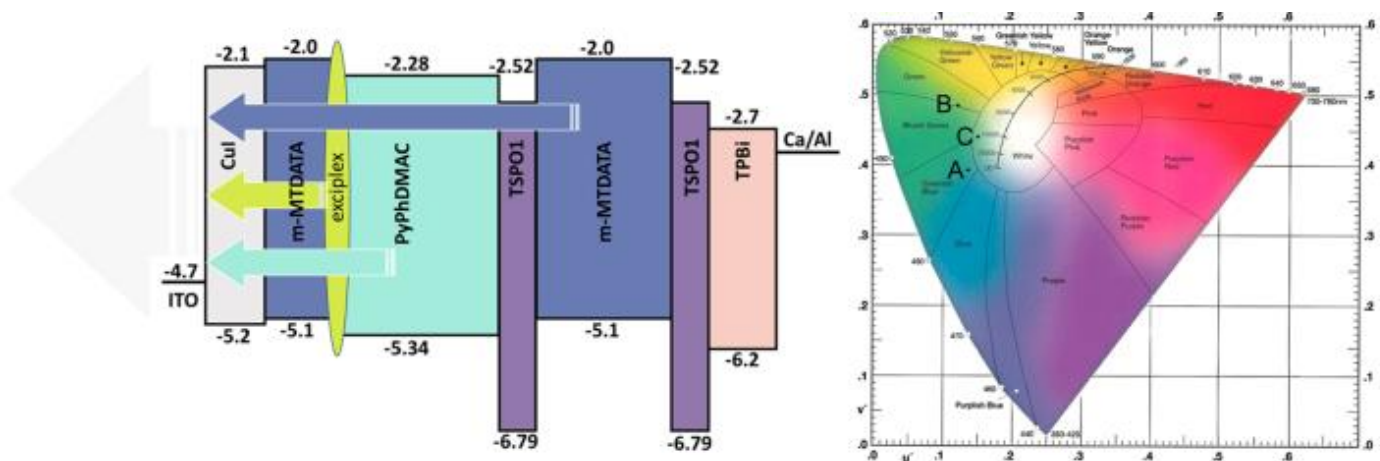


Рис. 7. Енергетична діаграма розроблених пристроїв та колірна діаграма з координатами колірності для світловипромінювальних гетероструктур.

Значення зовнішньої квантової ефективності для небесно-блакитного OLED (пристрій A) з одним емісійним шаром, для зелено-жовтого OLED (пристрій B) на основі випромінювання ексіплексу з 4,4',4''-трис[феніл(м-толіл)аміно]трифеніламіном (MTDATA) і для білого (комбінованого) OLED (пристрій C) становить 3,7%, 6,9% і 9,8% відповідно (рис. 8).

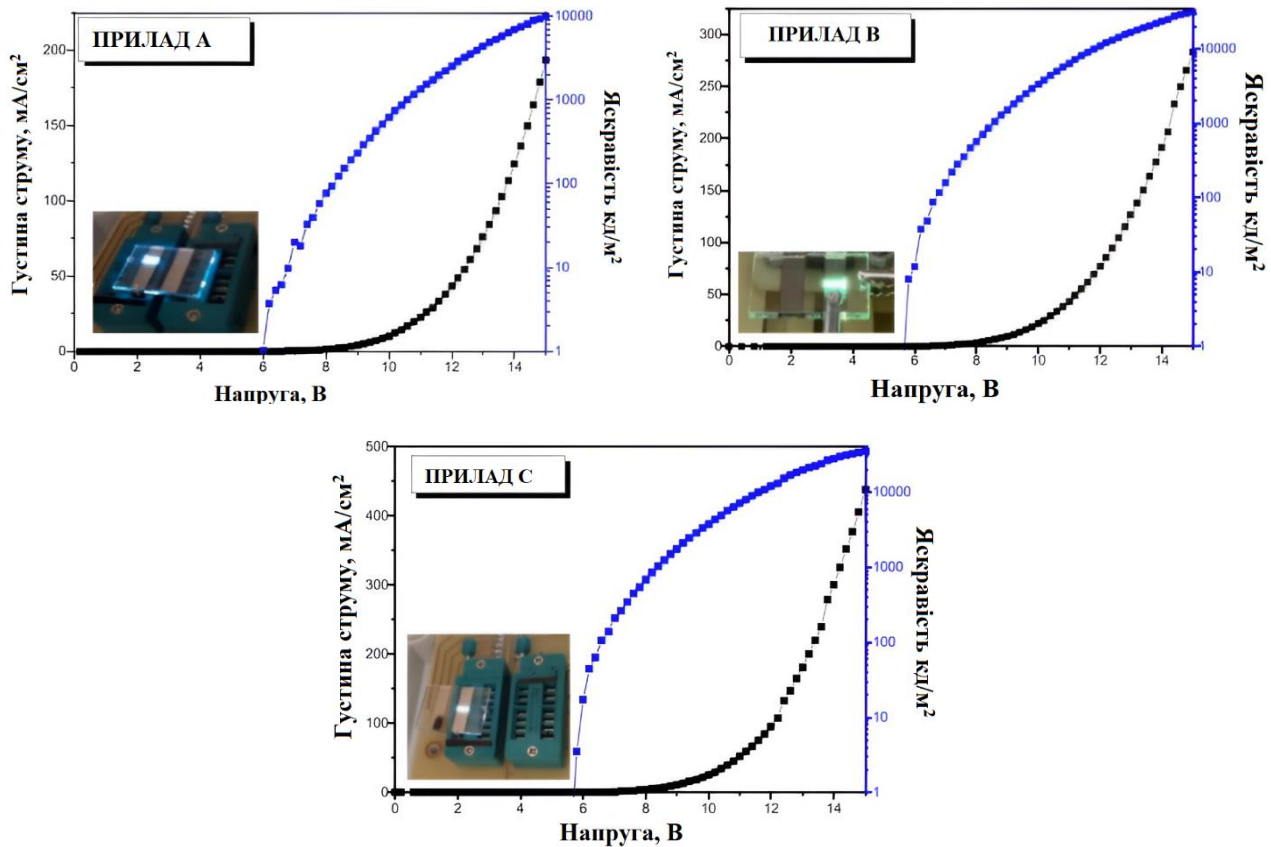


Рис. 8. Вольт-амперні та вольт-яскравісні характеристики розроблених пристроїв на основі новосинтезованих сполук.

Слід зауважити, що параметри розробленого WOLED відповідають значенням кращих європейських аналогів для повноколірних органічних пристроїв.

У роботі також продемонстровано конструктивне рішення щодо використання експлексної складової як матриці для підвищення ефективності флуоресцентної компоненти (гіперлюмінесценція).

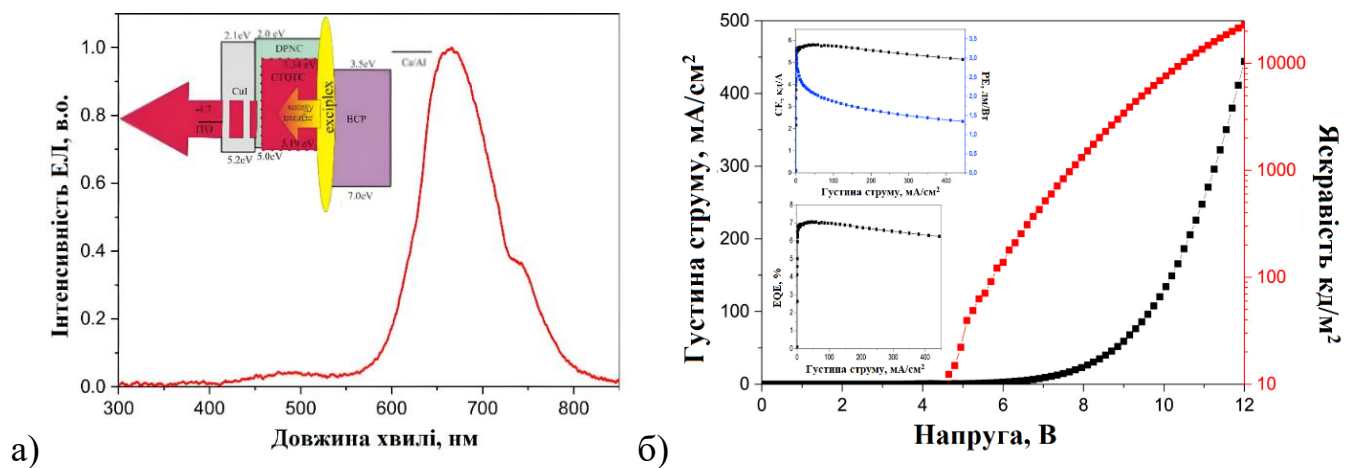


Рис. 9. Енергетична діаграма розробленого пристрою (всередині рис. 7а) та спектр електролюмінесценції приладу (а) та вольт-амперна та вольт-яскравісна характеристики пристрою(б), залежність квантової та струмової ефективності, енергоефективності від густини струму.

Для реалізації передачі енергії від ексиплексної матриці до червоного флуоресцентного емітера було використано підхід інтерфейсної технології. Пристрій на основі емітера CTQTC, допованого в ексиплекс DPNC/BCP сформовано методом контрольованого об'ємного осадження амбіполярної матриці DPNC та CTQTC емітера з пошаровим осадженням BCP як акцепторної складової ексиплексу та як електронно-транспортний шар: ITO/CuI/DPNC:CTQTC(15%)/BCP/Ca/Al (рис. 9).

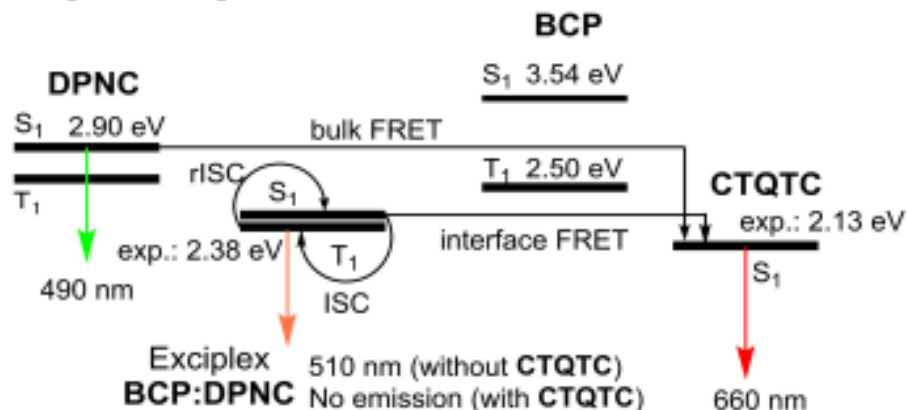


Рис. 10. Запропонована схема формування ексиплексу DPNC:BCP та прогнозовані шляхи резонансної передачі енергії (FRET) в легованому пристрої D (ITO/CuI/DPNC:CTQTC(15%)/BCP/Ca/Al).

Спектр електролюмінесценції легованого пристрою D, що містить спільно нанесений емісійний шар DPNC:BCP і CTQTC (рис. 9), відповідає спектру фотолюмінесценції емітера, що вказує на ефективну резонансну передачу енергії між ексиплексним хостом і CTQTC за допомогою механізму Ферстера (FRET) (рис. 10). Зовнішня квантова ефективність легованого пристрою у півтора раза вища порівняно з нелегованим пристроєм. Як видно з рис. 10, стан S_1 ексиплексу DPNC:BCP (2,38 eV) знаходиться в тісному резонансі зі станом S_1 емітера CTQTC (2,13 eV), що задовільняє умови для ефективного FRET. Стан T_1 ексиплексу DPNC:BCP майже вироджений із станом S_1 , що забезпечує фон для ефективного зворотного міжсистемного переходу (RISC) між станами T_1 та S_1 ексиплексу. Власне, цей канал RISC дозволяє залучати триплетні екситони до процесу випромінювання в пристрої, що сприяє підвищенню його загальної ефективності в порівнянні з нелегованим пристроєм. Порівняльний аналіз основних параметрів приладів C і D свідчить про значне покращення не тільки значення зовнішньої квантової ефективності для пристрою D, але й істотне підвищення яскравості ($>20\,000$ кд/м²) та струмової ефективності (5,8 кд/А).

У **четвертому розділі** продемонстровано результати експериментального дослідження багатоканальної електролюмінесценції розробленої повноколірної гетероструктури (ITO/CuI/TCTA/pCNBCzoCF₃/m-MTDATA/pCNBCzoCF₃/BCP/Ca/Al) в умовах парамагнітного резонансу. Представлено дослідження характеристик TADF-архітектури теплих білих OLED на основі внутрішньомолекулярного комплексу перенесення енергії від сполуки pCNBCzoCF₃, а також пристроїв на її основі та емісії ексиплексних станів, утворених між новосинтезованою акцепторною сполукою pCNBCzoCF₃ і комерційною донорною сполукою m-MTDATA.

З цією метою в роботі представлено сформовані методом осадження з розчину два види гетероструктур із різним складом емісійного шару. Перший пристрій

базується на донорно-акцепторній бінарній системі (ТСТА, pCNBCzoCF₃) (рис. 11). У цьому випадку екситони локалізуються на сполуці pCNBCzoCF₃ і характеризуються небесно-блакитним випромінюванням, як показано на відповідних спектрах електро- та фотолюмінесценції (рис. 11б). Майже ідентичні спектри фотолюмінесценції сполуки та електролюмінесценції пристрою свідчать про відсутність міжмолекулярного ексиплексу між ТСТА та pCNBCzoCF₃. Натомість ТСТА використовується як додатковий транспортний шар, що забезпечує баланс носіїв заряду в емісійному шарі пристрою А.

Емісійний шар другого пристрою містить донорно-акцепторну бінарну систему m-MTDATA та pCNBCzoCF₃ (рис. 11а), електролюмінесценція якого характеризується чітким зміщенням у довгохвильову область спектру по відношенню до вихідних m-MTDATA або pCNBCzoCF₃ сполук (рис. 11б). Ідентичне зміщення спектру спостерігається для плівок суміші m-MTDATA:pCNBCzoCF₃, що експериментально доводить утворення ексиплексного стану помаранчевого кольору гетероструктури.

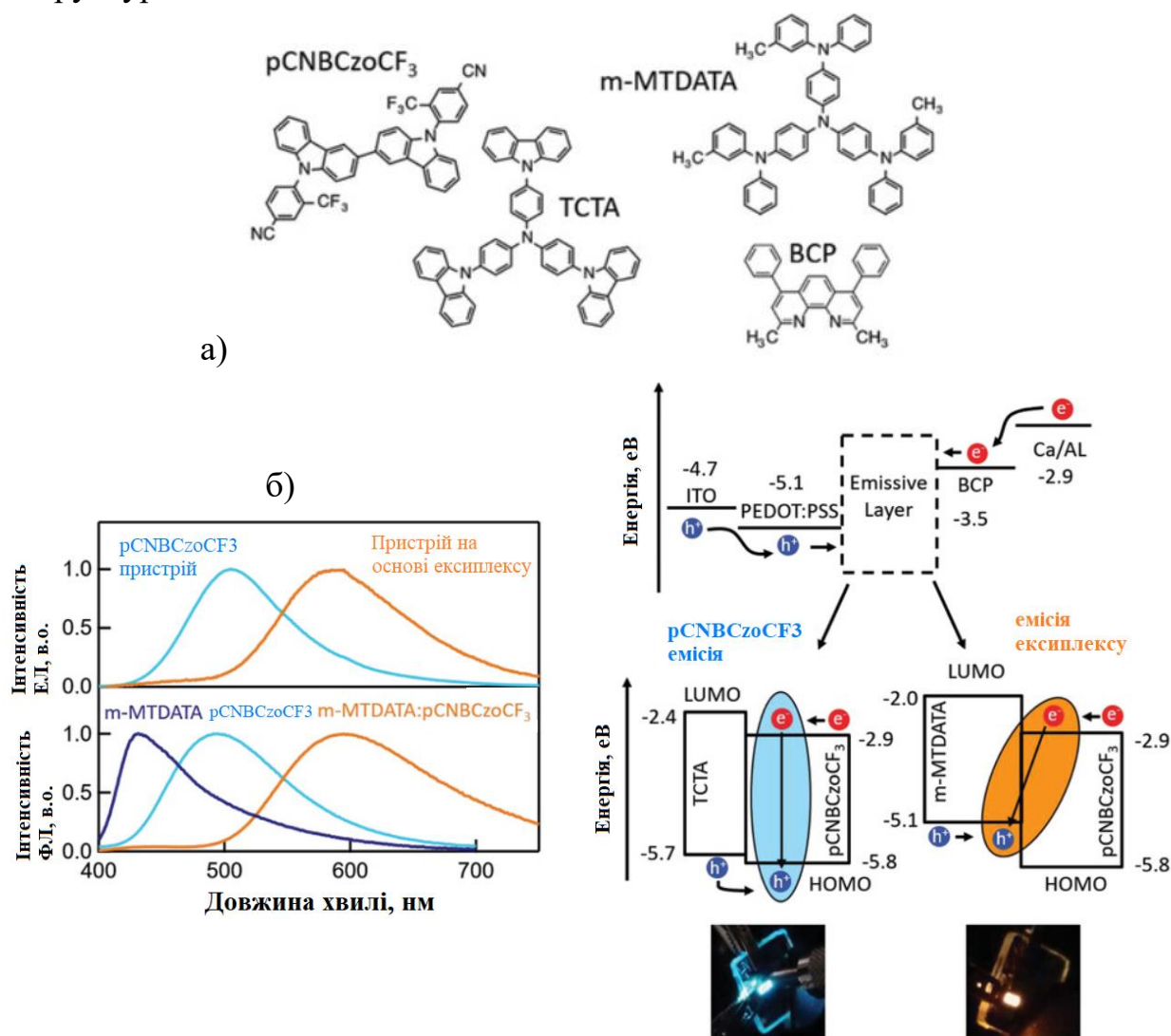


Рис. 11. Хімічні структури молекул застосованих для формування структур (а). Структура пристрою та енергетична діаграма досліджуваних OLED, спектри електролюмінесценції обох типів пристроїв і відповідні спектри фотолюмінесценції (б).

Наявне невелике плече на 420–500 нм як для спектрів фотолюмінесценції суміші, так і для електролюмінесценції пристрою, відповідає додатковому випромінюванню сполуки pCNBCzoCF₃ (рис. 11,б).

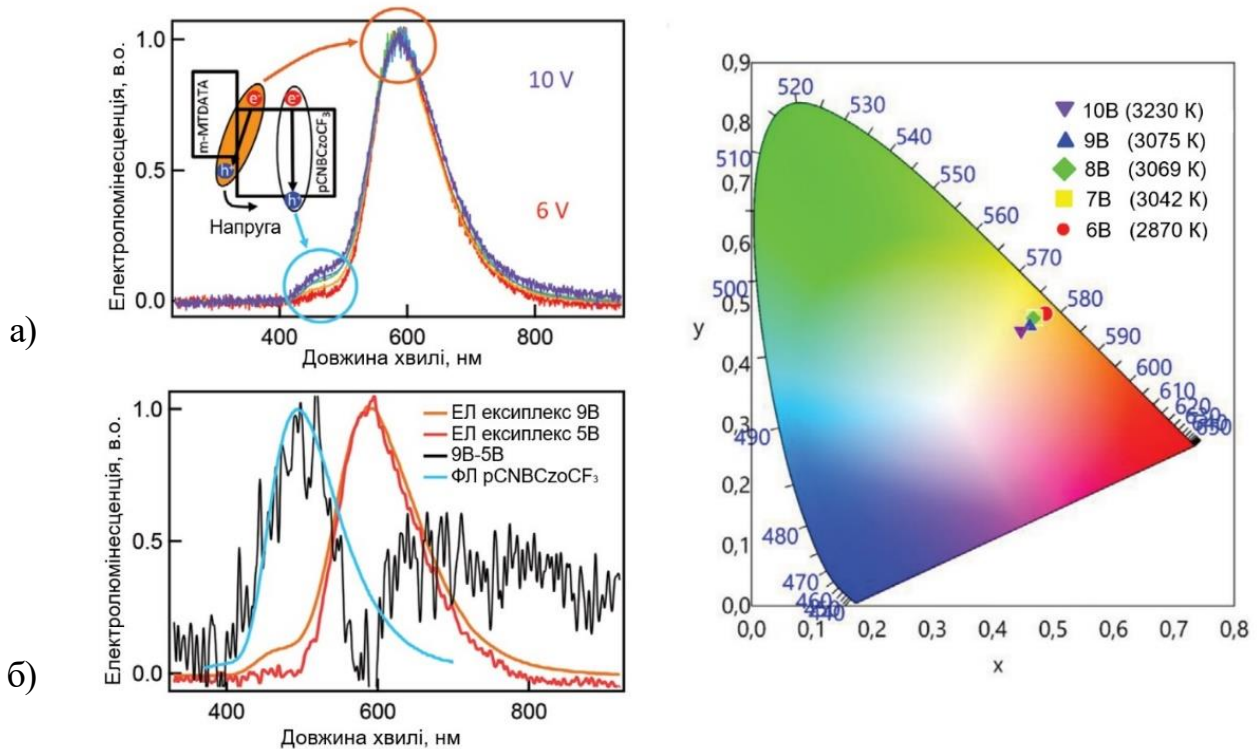


Рис. 12. Спектри електролюмінесценції пристрою при різних напругах живлення на основі ексиплексу pCNBCzoCF₃ і m-MTDATA (а). Порівняння спектру фотолюмінесценції pCNBCzoCF₃ та спектру електролюмінесценції пристрою на основі ексиплексу (б).

Виявлено напругозалежність спектральної чутливості високоенергетичної складової спектра випромінювання pCNBCzoCF₃ (рис. 10а). Колірна температура змінюється в діапазоні прикладених напруг 6-10 В від 2870 до 3230 К (рис. 12). Розроблена гетероструктура може бути використана для регульованого випромінювання між теплим і холодним білим кольорами змінюючи напругу живлення.

Щодо яскравості, то вона може контролюватися незалежно за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Ця концепція є бажаною, оскільки сучасні дисплеї смартфонів уже використовують зміну колірної температури (так званий «нічний режим»), і це також затребувано для майбутніх програм освітлення приміщень. На даному етапі розвитку технології WOLED це можна реалізувати лише шляхом поєднання кількох OLED різного кольору, а не в одному пристрої.

Беручи до уваги, що сполука pCNBCzoCF₃ характеризується як внутрішньо-, так і міжмолекулярними станами перенесення енергії (СТ), для неї можна застосувати спін-чутливі методи діагностики – дослідження електролюмінесценції в умовах парамагнітного резонансу. Метод дослідження вже був застосований для вивчення міжмолекулярних ексиплексних OLED, але вперше використаний для внутрішньомолекулярного TADF - емітера та багатоканальної емісії на його основі.

Ці вимірювання дозволили визначити властивості триплетних станів, які беруть участь у механізмах генерації світла гетероструктурами, а дослідження

температурної залежності електролюмінесценції дозволило розрахувати енергію активації TADF- ефекту для досліджуваної сполуки та ексіплексу на її основі.

Ідея експерименту ELDMR полягає в дослідженні ЕЛ, одночасно застосовуючи статичне магнітне поле B , яке індукує зєєманівське розщеплення триплетних станів та резонансних мікрохвиль, внаслідок чого виконується умова резонансу (рис. 13а). Під час вимірювання ELDMR застосовуються мікрохвилі з фіксованою частотою $\nu_{MW} = 8$ ГГц, при цьому змінюється магнітне поле B . Під час цієї розгортки виявляється мікрохвильова зміна електролюмінесценції ΔEL .

При цьому відбувається гасіння електролюмінесценції:

$$h\nu_{MW} = g\mu_B\Delta m_s \pm D \left(\cos^2\theta - \frac{1}{3} \right) \quad (2)$$

де h — постійна Планка, ν_{MW} — мікрохвильова частота, $g = 2,002$ — g -фактор спінової системи, μ_B — магнетон Бора, $\Delta m_s = 1$ — допустима зміна магнітного квантового числа, D — дипольна взаємодія, а θ — кут між напрямком зовнішнього магнітного поля і вектор, що з'єднує два спіни триплетного стану.

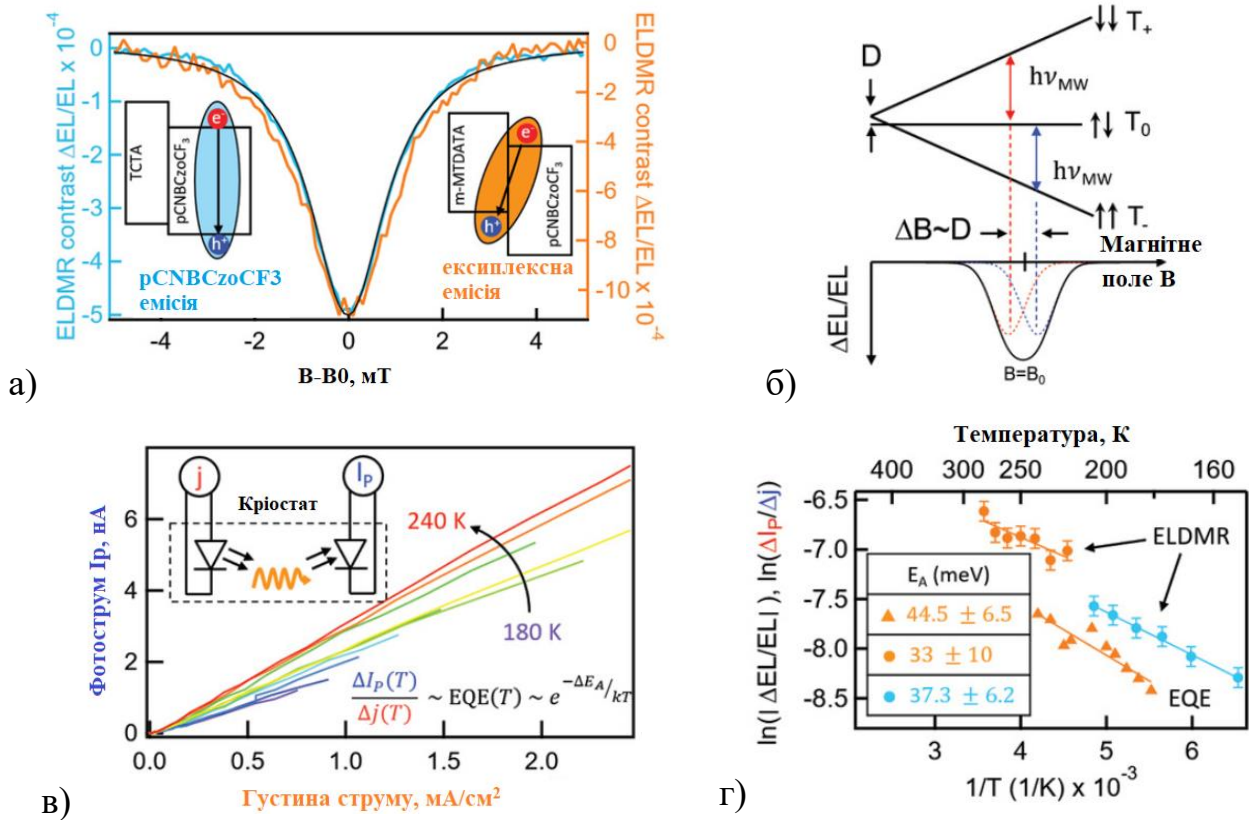


Рис. 13. Спектри електролюмінесценції в умовах магнітного резонансу пристрою на основі pCNBCzoCF₃ і пристрою на основі ексіплексу, записані при 245 К (а). Ілюстрація спектрів магнітного резонансу (б). Інтенсивність випромінювання OLED (IP) в залежності від густини струму пристрою (j) для різних температур (в). На вставці показано схематичне зображення використовуваної установки кріостата. Графік Арреніуса нахилів кривих I_P – j та інтегрованих спектрів ELDMR (г).

Точне значення не може бути отримане виключно з ширини лінії, оскільки інші механізми поширення, такі як нерозв'язані надтонкі взаємодії з сусідніми ядрами,

також вносять свій внесок. Натомість повну ширину максимуму (FWHM) можна розглядати як верхню межу для 2D. Ця оцінка дозволяє розрахувати нижню межу для ступеня триплетної хвильової функції, тобто відстані r_{e-h} між електроном і діркою триплетного стану:

$$r_{e-h}[nm] = \sqrt[3]{\frac{2.785}{D[mT]}} nm \quad (3)$$

Метод дає можливість отримати r_{e-h} в одиницях нм, використовуючи D в одиницях мТл.

Зі значення повної ширини на половині максимуму спектрів ELDMR (рис. 11б), можна побачити, що $2D \leq 3$ мТл, а значення r_{e-h} згідно з формулою становить більше 1,2 нм. Такі числа відповідають делокалізованим триплетним станам, де значення відстані між електроном і діркою є значним.

Проведені дослідження спектрів ELDMR при різних значеннях температур для обох типів пристроїв (рис. 13в). В обох випадках форма сигналу залишається однаковою, а інтенсивність зменшується зі зниженням температури. Кількісний аналіз інтенсивності сигналу можна здійснити за допомогою графіка Арреніуса, який дозволяє отримати значення енергії активації E_A досліджуваного ефекту, як показано на рис. 13в, г.

Для пристрою на основі TADF сполуки pCNBCzoCF3 енергія активації становить $37,3 \pm 6,2$ меВ, а для пристрою на основі ексиплексу – відповідно 33 ± 10 меВ. Обидва типи гетероструктур мають E_A , співмірну з тепловою енергією при кімнатній температурі, що типово для затриманої флуоресценції.

На основі проведених досліджень у роботі запропоновано і реалізовано конструкторсько-технологічний спосіб поєднання двох каналів затриманої флуоресценції в гетероструктурі теплого білого кольору емісії з високими показниками ефективності. Так, для реалізації світловипромінювальних гетероструктур як емітер використовувалася сполука pCNBCzoCF3, що характеризується надзвичайно малим значенням ΔE_{ST} . Як видно з рис.14, спектр флуоресценції (477,0 нм) і спектр фосфоресценції (479,0 нм) твердої плівки pCNBCzoCF3 характеризуються майже однаковими положеннями максимумів. Незначне значення енергетичної щілини ΔE_{ST} (0,011 еВ), сприяє ефективності TADF - ефекту.

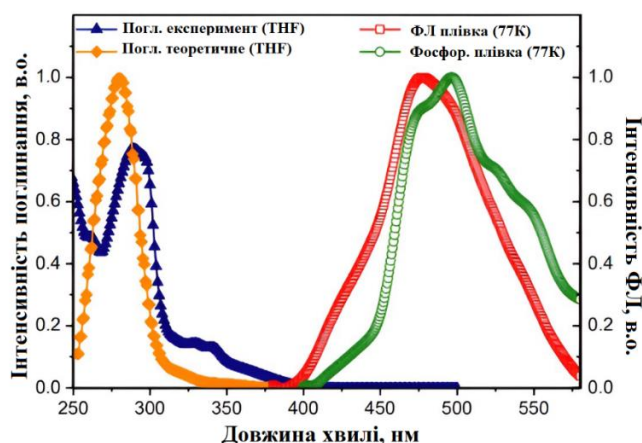


Рис. 14. Спектри поглинання, фотолюмінесценції та фосфоресценції досліджуваної сполуки.

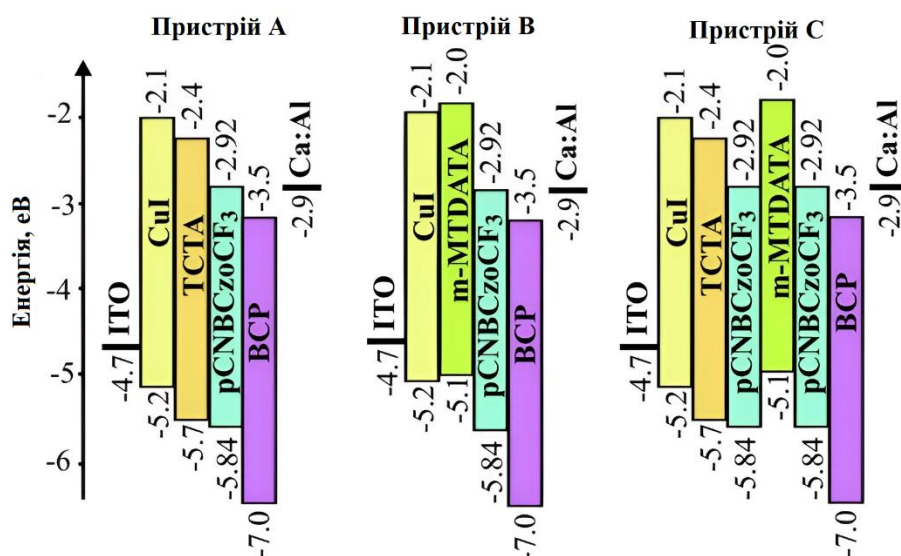


Рис. 15. Енергетичні діаграми сформованих пристроїв А-С.

Розроблений зелено-блакитний пристрій на основі чистої електролюмінесценції сполуки pCNBCzoCF₃ демонструє порівняно високі характеристики з максимальною зовнішньою квантовою ефективністю 6,2%. Для того щоб підвищити ефективність пристрою та розширити спектр електролюмінесценції на весь видимий діапазон, було поєднано зелено-блакитну електролюмінесценцію TADF-сполуки pCNBCzoCF₃ з випромінюванням ексиплексного типу інтерфейсу m-MTDATA/pCNBCzoCF₃ (рис.15). Отриманий пристрій характеризувався випромінюванням теплого білого кольору свічення та такими світловими характеристиками як: яскравістю 40 900 кд/м² (при 15 В), струмовою ефективністю 53,8 кд/А та енергоефективністю 19,3 лм/Вт, зовнішньою квантовою ефективністю 18,8%. Слід зазначити, що ці показники наближені до значень білих OLED серійного виробництва.

В **п'ятому розділі** розглянуто технологічну імплементацію квантових неорганічних наноструктур як альтернативу використанню низькомолекулярних органічних емітерів для покращення колірних параметрів світловипромінювальних пристроїв. Крім того, запропонована модель перенесення енергії від органічної компоненти до неорганічної гостьової компоненти в світловипромінювальних композитних гетероструктурах на їх основі.

Вперше запропоновано та апробований метод «сухого розпилення» у вакуумі (dry spray process) нанопорошку цирконату барію в технологічному процесі виготовлення гібридної світловипромінювальної структури на його основі: ITO/TCTA(30 nm)/ BaZrO₃ /Vphen (30 nm)/Ca (50 nm)/Al (200 nm).

Особливістю цієї структури є перенесення енергії від ексиплексної складової (TCTA/Vphen) до неорганічного емітера – нанопорошку BaZrO₃. Для оцінки ефективності передачі енергії від ексиплексу до наночастинок BaZrO₃ застосовувалась модель Форстера для диполь-дипольного перенесення енергії з урахуванням взаємного перекриття спектру випромінювання ексиплексу та спектру поглинання наночастинок BaZrO₃ (рис. 16).

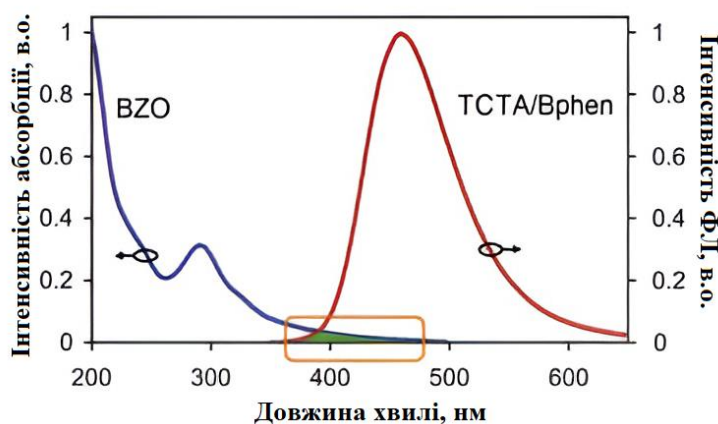


Рис. 16. Перекриття спектрів поглинання BaZrO_3 та фотолюмінесценції суміші TCTA/Bphen.

На рис. 17 показано спектр фото- та електролюмінесценції твердотільної плівки BaZrO_3 при кімнатній температурі. Спектр електролюмінесценції подібний до вже відомого спектру випромінювання фотолюмінесценції BaZrO_3 , що типово для багатофоновної та багаторівневої системи, в якій випромінювальна релаксація відбувається декількома шляхами, що включають участь багатьох станів усередині забороненої зони матеріалу.

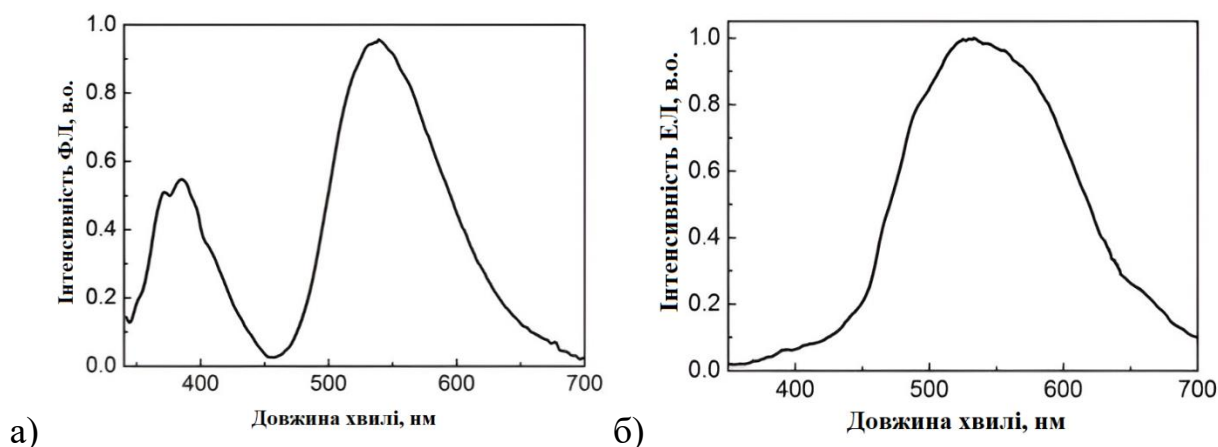


Рис. 17. Спектр фотолюмінесценції BaZrO_3 (а) та спектр електролюмінесценції сформованого пристрою (б).

Така поведінка пов'язана зі структурним розподілом BaZrO_3 і підтверджує наявність додаткових електронних рівнів у забороненій зоні, що контролюються комплексними кластерами:



BaZrO_3 наночастинки сферичної форми (діаметром менше 50 нм) хаотично розташовані на інтерфейсі TCTA/Bphen у пристрої згідно даних СЕМ (рис. 16). Рентгенограма структури TCTA/ BaZrO_3 /Bphen доводить наявність кристалічної фази BaZrO_3 і відповідає даним XRD для нанодисперсного порошку BaZrO_3 , описаних у літературі.

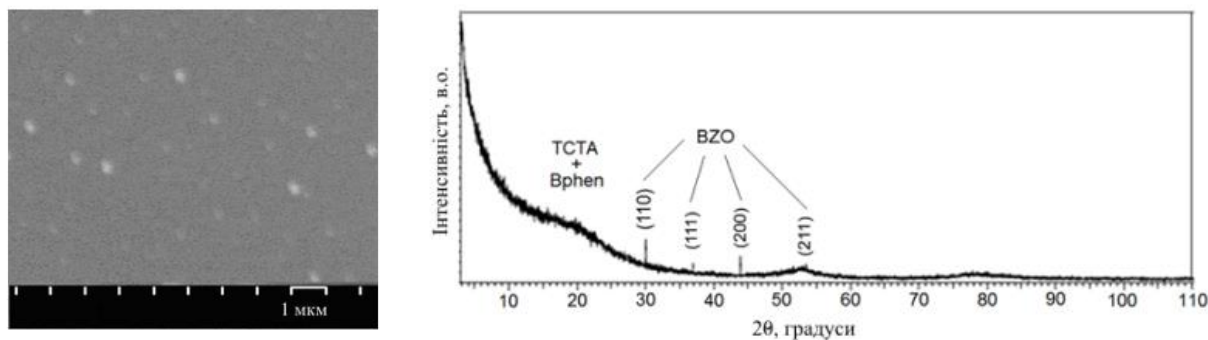


Рис. 18. СЕМ зображення сформованої структури та рентгеноструктурний аналіз гетероструктури.

Смуга з максимумом 540 нм (рис. 17) повністю збігається зі спектром флуоресценції плівки BaZrO_3 , що характеризує резонансну передачу енергії від ексиплексу до неорганічного емітера.

Іншим прикладом гібридної світловипромінюючої структури є реалізація технології виготовлення пристрою QLED на основі комерційно доступних CdTe/CdS ядро/оболонка 2-6 нм наночастинок. Розроблений пристрій демонструє нетипову багатоканальну електролюмінесценцію, яка принципово відрізняється від фотолюмінесценції тієї ж багаточислової системи, а також від спектрів фотолюмінесценції квантових точок.

Існує фундаментальна різниця між явищами електро- та фотолюмінесценції ядра/оболонки квантових точок CdTe/CdS через різні шляхи заселення відповідних збуджених станів, відповідальних за процес випромінювання. У цьому випадку спектр електролюмінесценції є більш широкосмуговим, ніж спектр фотолюмінесценції, і містить три смуги різної природи походження, що важливо для розширення спектру випромінювання в синій та червоній області спектру порівняно з односмуговою темно-помаранчевою фотолюмінесценцією квантових точок як у водних розчинах, так і в твердих плівках.

Загальна схема для побудованого QLED :

ITO/ MoO_3 (10 нм)/QD (20 нм)/TPBi(50 нм)/Ca(20 нм)/Al(150 нм).

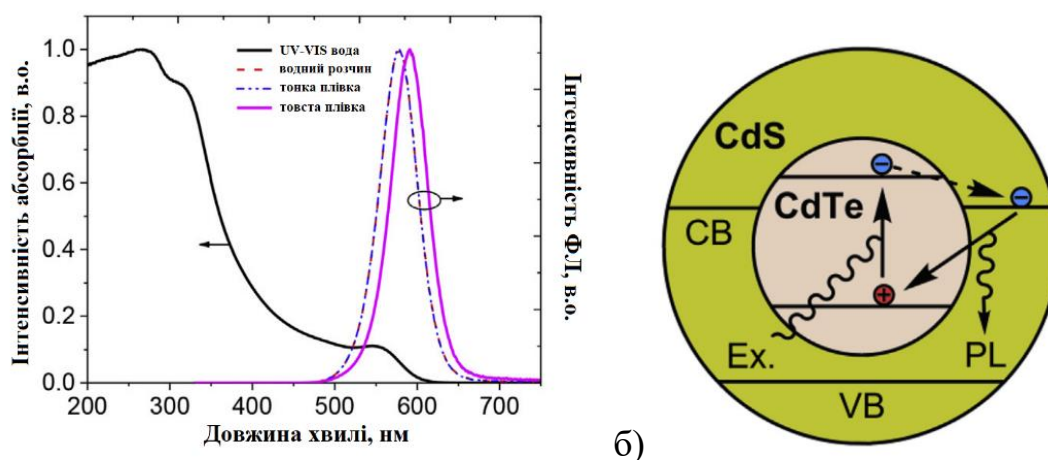


Рис. 19. Спектр поглинання КТ ядро/оболонки CdTe/CdS у водному розчині та спектри фотолюмінесценції (ФЛ) розчину КТ і тонких/товстих плівок (а), що відповідає структурі КТ II типу (б).

Спектри фотолюмінесценції водного розчину КТ ядра/оболонки CdTe/CdS і товстої плівки містять лише одну смугу випромінювання приблизно на 580 і 590 нм відповідно (рис. 19а). Зсув спектру на 10 нм можна пояснити ефектом агрегації при утворенні суцільної товстої плівки порівняно зі спектрами водного розчину та тонкої плівки. Спектри випромінювання розчину і плівок залишаються однаковими при різних довжинах хвиль збудження. Слід також зазначити, що спектри фотолюмінесценції тонкої плівки та водного розчину ідентичні (рис. 19а). Квантовий вихід фотолюмінесценції для водного розчину КТ ядра/оболонки CdTe/CdS дорівнює 39%, а для тонкої плівки з осажденої з розчину – 17%.

Добре відомий факт, що квантові точки(КТ) CdTe/CdS ядро/оболонка можна розділити на дві категорії на основі їхніх потенційних структур: типу I та типу II (рис. 19б). У КТ типу I електрони та дірки обмежені одним і тим же простором у ядрі CdTe, тобто електронно-діркова рекомбінація відбувається лише в ядрі. Однак у КТ типу II дірки та електрони просторово розділені через вирівнювання смуг типу II (дірки знаходяться в ядрі CdTe, тоді як електрони - в оболонці CdS). Це є причиною того, що виникає люмінесценція КТ CdTe/CdS ядро/оболонка типу II через рекомбінацію електронів із зони провідності (CB) оболонки CdS та дірок валентної зони (VB) ядра CdTe (рис. 19б). Тим самим, забезпечується характерний зсув у червону область спектру основної смуги емісії для системи ядро/оболонка CdTe/CdS у порівнянні з КТ такого ж розміру CdTe без оболонки.

Враховуючи досить товсту оболонку CdS (0,5 нм) навколо ядра CdTe (2,3 нм), досліджувані квантові точки CdTe/CdS відповідають системі типу II. Таким чином, як для водного розчину, так і для тонкої твердої плівки випромінювання при 580 нм (рис. 19б) пояснюється рекомбінацією електронів із зони провідності оболонки CdS і дірок із валентної зони ядра CdTe, перенесення електрону від зони провідності CdTe до зони провідності оболонки CdS (пунктирна стрілка на рис. 19б).

Загальна схема конструкції та енергетична діаграма виготовленого QLED представлені на рис. 20.

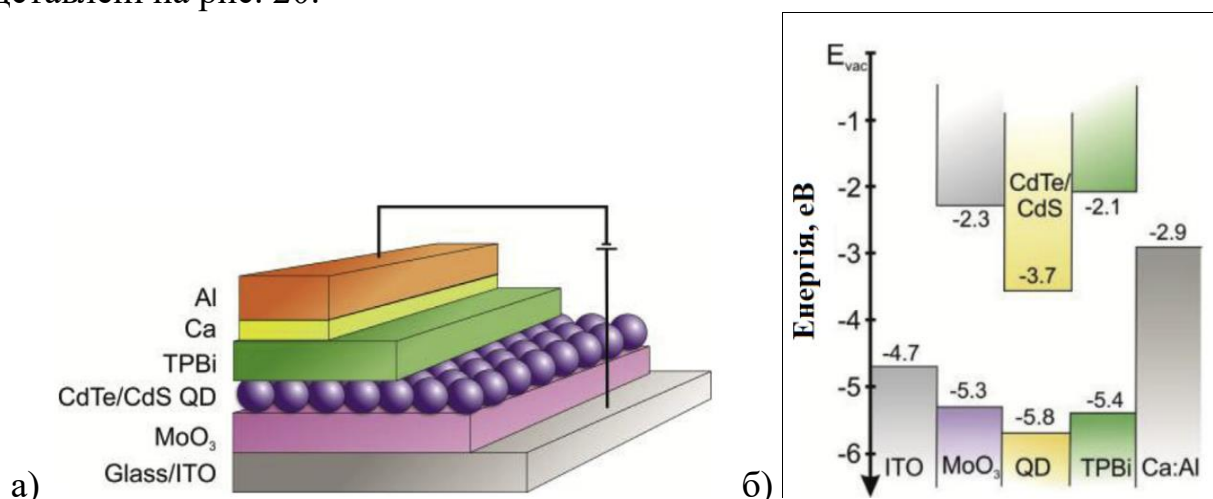


Рис. 20. Схематичне зображення структури (а), енергетична діаграма (б) розробленої структури.

Як видно з діаграми колірності CIE1931 (рис. 21б), виготовлений пристрій має зелений колір свічення, який відповідає спектру електролюмінесценції (ЕЛ),

представленому на рис. 21а (чорна лінія).

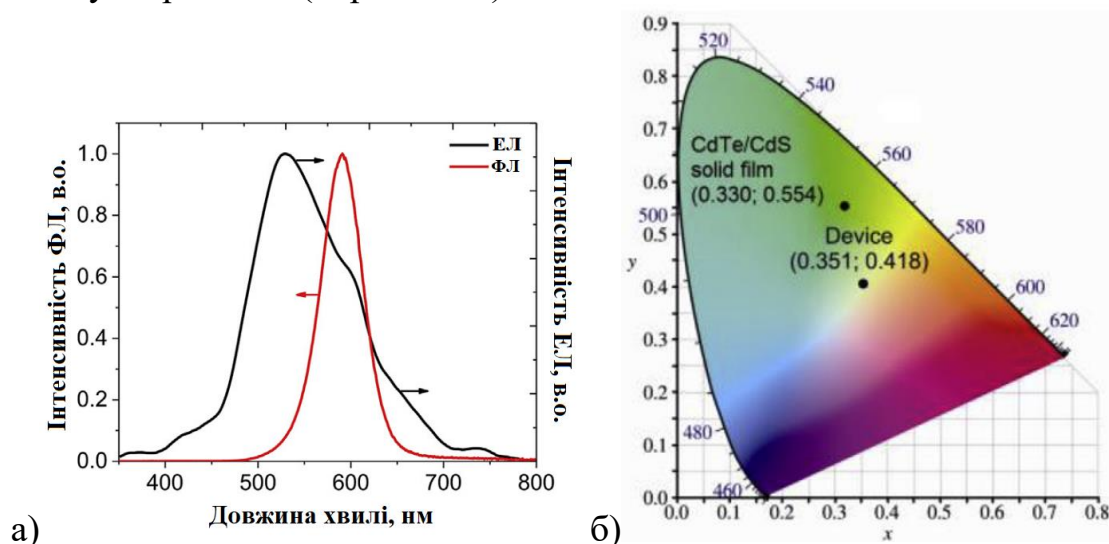


Рис. 21. Спектр ЕЛ (при 15 В) виготовленого пристрою в порівнянні зі спектром ФЛ твердої плівки КТ CdTe/CdS ядро/оболонка (а) та колірна діаграма з нанесеними колірними координатами розробленої структури (б).

Спектр електролюмінесценції (ЕЛ) можна пояснити змішаною поведінкою двох типів I та II КТ CdTe/CdS ядро/оболонка при збудженні через інжекції дірок та електронів в активні шари квантових точок (рис. 19б). Найбільш інтенсивна смуга ЕЛ при 530 нм (стрілка 1 на рис. 19б) відповідає випромінювальній рекомбінації дірок і електронів в ядрі CdTe, що характерно для квантових точок I типу ядро-оболонка. Прикладена напруга індукує перенесення носіїв заряду в ядро, долаючи бар'єр між зоною провідності оболонки CdS і ядром CdTe (рис. 19б). Наступна смуга електролюмінесценції при 595 нм (стрілка 2 на рис. 19б) відповідає характерній смузі в спектрі фотолюмінесценції КТ II типу CdTe/CdS ядро/оболонка. Це означає, що деяка частина електронів, інжектованих з катода, все ще локалізована в оболонці CdS, викликаючи рекомбінацію з дірками з ядра CdTe (поведінка типу II). Слабка смуга електролюмінесценції при 420 нм (рис. 19б) швидше за все відповідає випромінюванню екситонів оболонки CdS разом із випромінюванням локалізованих на поверхні пасток.

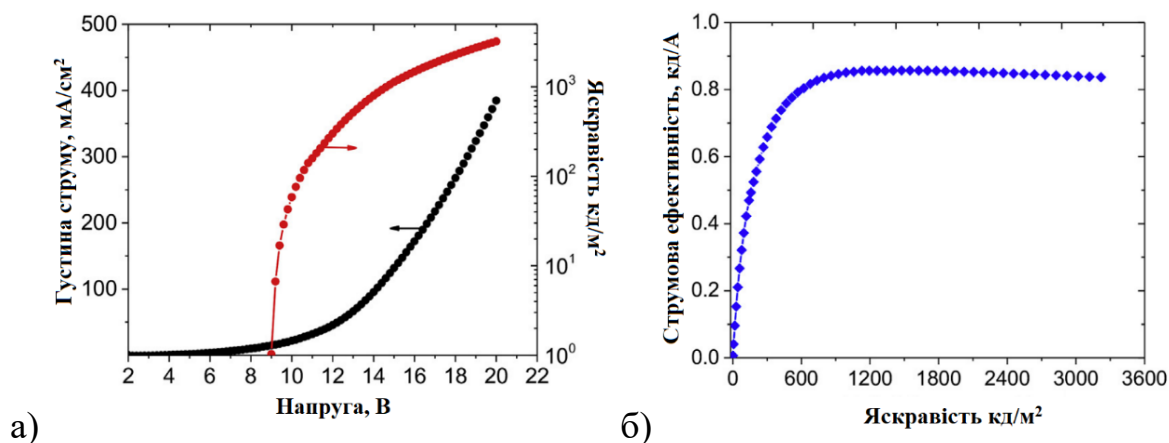


Рис. 22. Вольт-амперна та вольт-яскравісна характеристики (а) та залежність струмової ефективності від яскравості свічення гетероструктури.

QLED демонструє досить високу напругу включення 9В і максимальну яскравість 3100 кд/м² при 20 В (рис. 22). Високу напругу включення пристрою можна пояснити наявністю значного бар'єру для транспортування дірок між дірково-транспортним і емісійним шаром квантових точок.

Крім того, струмова ефективність та енергоефективність практично не залежать від густини струму в діапазоні від 30 до 350 мА/см², що також свідчить про високу стабільність побудованого QLED щодо електроокислення активного шару квантових точок з подальшою електродеградацією всього пристрою. Важливо відзначити, що виготовлений пристрій демонструє змішану поведінку типу I та типу II квантових точок CdTe/CdS ядро-оболонка при електрозбудженні, що дозволяє значно розширити спектр електролюмінесценції у зелено-блакитну область.

У **шостому розділі** наведено механохромні, агрегаційні та конформаційні властивості новосинтезованих 2D та карбазоловмісних сполук, архітектурний дизайн і технологічний підхід їх впровадження в гетероструктурах для розроблення багатofункціональних світловипромінювальних пристроїв.

Властивість сполуки реагувати на механічний вплив (такі як подрібнення, обробка розчинником і плавлення), зміною довжини хвилі випромінювання фотолюмінесценції робить її перспективною для застосування в приладах органічної електроніки, таких як оптичні індикатори тиску та оптичні пристрої збереження інформації. Механічно отримана (шляхом подрібнення) аморфна фаза сполуки при фіксованій довжині хвилі збудження демонструє помітне зміщення випромінювання у червону область спектру (рис. 23). Після обробки аморфної фази парами дихлорметану протягом 3 хвилин спектр випромінювання відновився вихідного спектру.

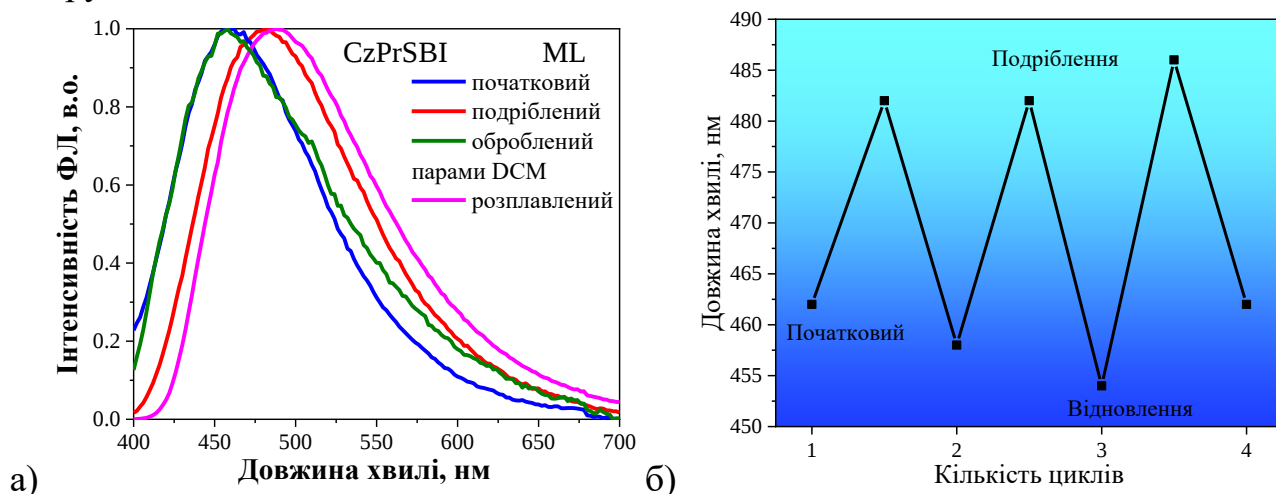


Рис. 23. Спектри фотолюмінесценції різних фаз та оборотність процесів фотолюмінесценції(максимумів) сполуки CzPrSBI після чотирьох циклів подрібнення/відновлення.

Механохромність люмінесцентної сполуки CzPrSBI пояснюється переходом між різними мікрокристалічними фазами. Оборотність механочутливої емісії також перевірялася шляхом послідовного повторення процесів подрібнення-випаровування. Після проведення чотирьох циклів подрібнення-відновлення CzPrSBI сполука демонструвала зворотність фотолюмінесценції (рис. 23б).

Досліджено електролюмінесценцію новосинтезованої донорно-акцепторної сполуки та запропонована технологія виготовлення двох типів пристроїв: CuI/TPD/CzPrSBI/TSPO1/TPBi/Ca/Al. Особливістю даних пристроїв було їх формування в одному технологічному циклі методом термовакуумного осадження з використанням двох різних типів підкладок – скляної та гнучкої (ПЕТ).

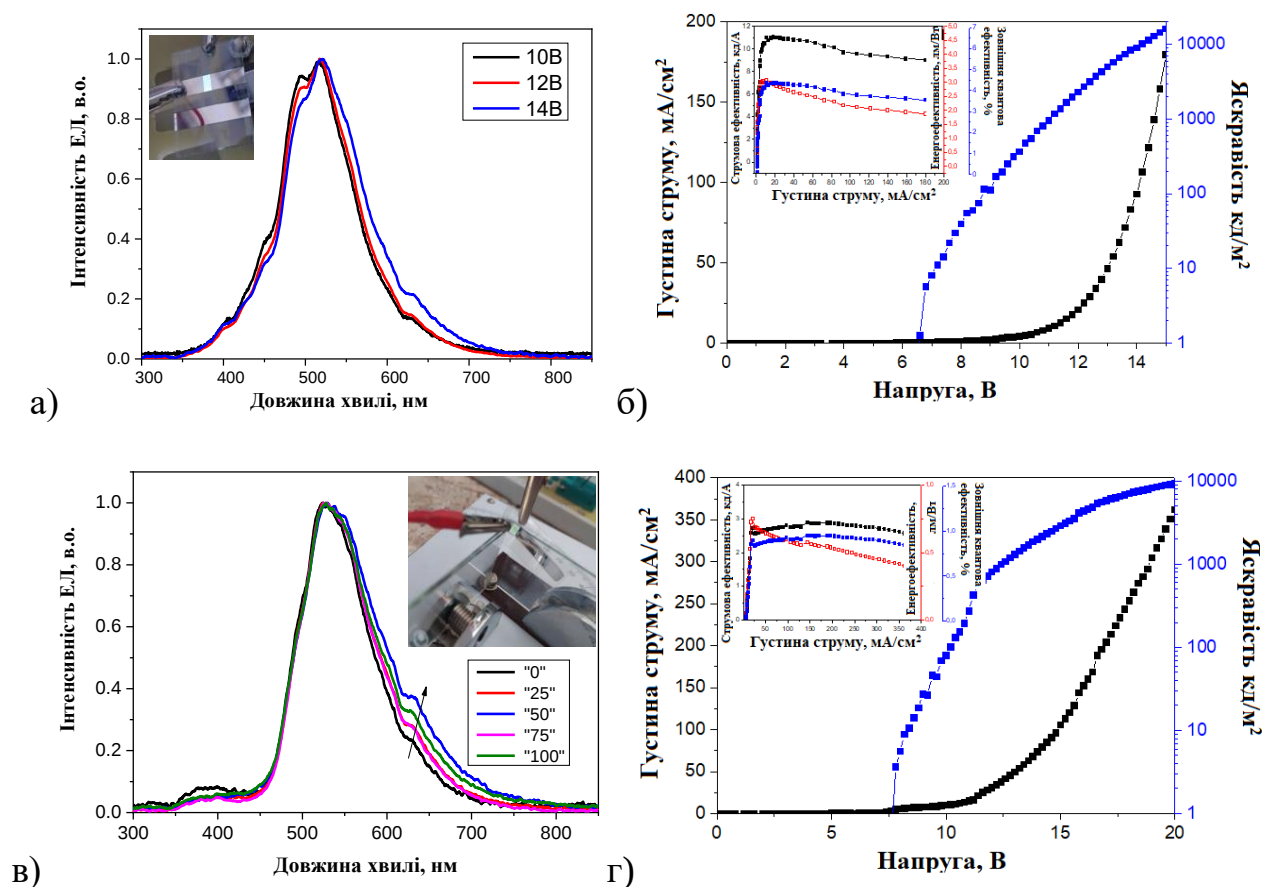


Рис. 25. Спектр електролюмінесценції приладів при різній напрузі (а) і різному куті вигину (в); густина струму-напруга та яскравість-напруга, енергоефективність – густина струму, струмова ефективність – густина струму та зовнішня квантова ефективність – густина струму залежності сформованих пристроїв (б - скляна підкладка, г - гнучка підкладка).

Випромінювання в основному генерується безпосередньо емітером, оскільки спектри електролюмінесценції пристрою на скляній підкладці ідентичні спектру фотолімінесценції (рис. 25а, 25в) з максимумами випромінювання в діапазоні 490–504 нм. Показано, що відносна інтенсивність максимуму в 630 нм в довгохвильовій області збільшується зі збільшенням кута вигину гнучкої структури OLED, як показано на рис. 23в. При зміні кута вигину гнучких зразків інтенсивність максимуму явно зростає до кута 50° та демонструє оборотний характер при збільшенні кута вигину гетероструктури. Механохромна електролюмінесцентна поведінка пристроїв на гнучких підкладках, ймовірно, індукована переходом між мікрокристалічною фазою та аморфною фазою.

Таблиця 2. Електрофізичні характеристики OLED на основі скла та гнучкої підкладки

Прилад	Напруга вкл. , В	Макс. яскравість, кд/м ⁻²	Струмова ефективність, кд/А ⁻¹	Енергоефективність, лм/Вт ⁻¹	Зонішня квантова ефективність, %
			при 1000/макс.кд*м ⁻²		
Скляна підкладка	6.4	16000	11.0/9.0	3.0/1.8	4.3/3.5
Гнучка підкладка	7.4	9000	2.6/2.5	0.6/0.4	0.8/0.9

Пристрій на основі скляної підкладки демонструє кращі характеристики з вищою максимальною струмовою ефективністю (CE), енергоефективністю (PE) і зовнішньою квантовою ефективністю (EQE): 11,0 кд/А, 3,0 лм/Вт і 4,3 % відповідно (табл. 2). Зворотна деформаційна чутливість електролюмінесценції також робить цей матеріал перспективним в області неруйнівного контролю, що стосується способу виявлення ударних ушкоджень конструкції (авіа- та авто- промисловість).

В роботі також представлена розроблена технологія застосування новосинтезованої флуоресцентної сполуки для різнотипних OLED, у яких Em1 сполука була використана як гостьовий емітер (пристрій А), акцепторна частина експлексного емітера (пристрій В) і матриця для квантових наноточок CdSeS/ZnS, що використовувалася як емітер (прилад С).

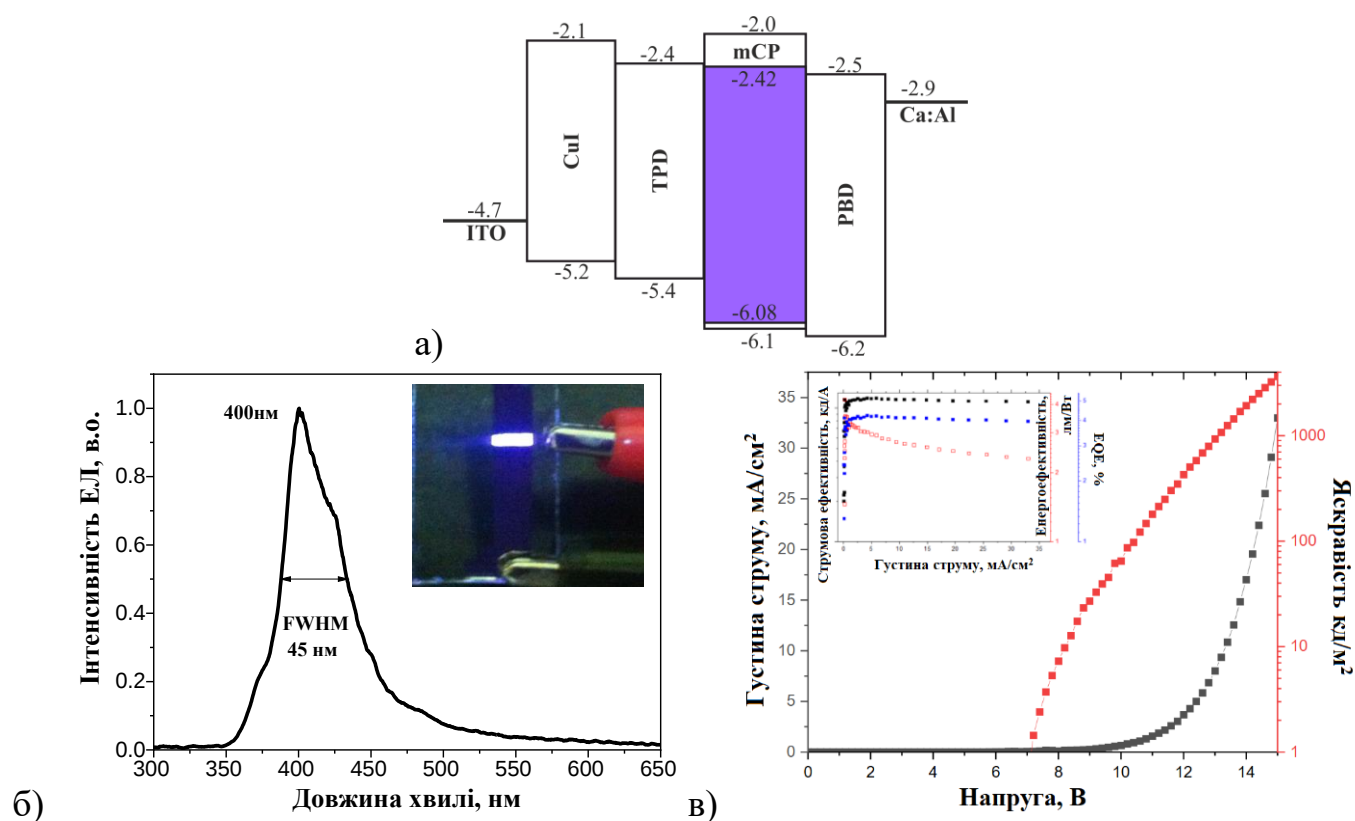


Рис. 26. Схеми приладу А: енергетична діаграма (а); відповідний нормований спектр електролюмінесценції (б), а також вольт-яскравісна характеристика; характеристики залежності струмової ефективності/енергоефективності/EQE від густини струму (в, вставка).

Пристрої А–С характеризуються загальними значеннями зовнішньої квантової ефективності, як для чисто флуоресцентних OLED (до теоретичної межі 5%), але ці пристрої демонструють низькоефективне спадання електролюмінесценції в широкому діапазоні густин струму. Архітектура пристрою та енергетична діаграма наведені на рис. 26. Загальна схема і товщини шарів виготовленого OLED: ITO/CuI (8 нм)/TPD (40 нм)/mCP:Em1(20 нм, 7%)/PBD (40 нм)/Ca (50 нм)/Al (200 нм) (пристрій А).

Пристрій А продемонстрував зовнішню квантову та струмову ефективність електролюмінесценції на рівні 4,2%, 11,5 кд/А при густині струму 12,5 мА/см². Слід зазначити, що такі значення наближаються до теоретичного максимального ліміту EQE у 5%, очікуваного для флуоресцентного OLED. Пристрій характеризується стабільністю струмової ефективності, енергоефективності та зовнішньої квантової ефективності в широкому діапазоні значень густин струму (рис. 26в, вставка). Максимальна яскравість 3600 кд/м² була досягнута при напрузі 15 В.

В роботі наступним етапом вивчені ексіплексні властивості новосинтезованої сполуки Em1 і технологічно реалізована в світловипромінювальній гетероструктурі: ITO/CuI (8 нм)/m-MTDATA (20 нм):Em1 (20 нм)/TSPO1 (10 нм)/TPBI (30 нм)/Ca (50 нм)/Al (200 нм). Енергетична діаграма пристрою В показана на рис. 27а.

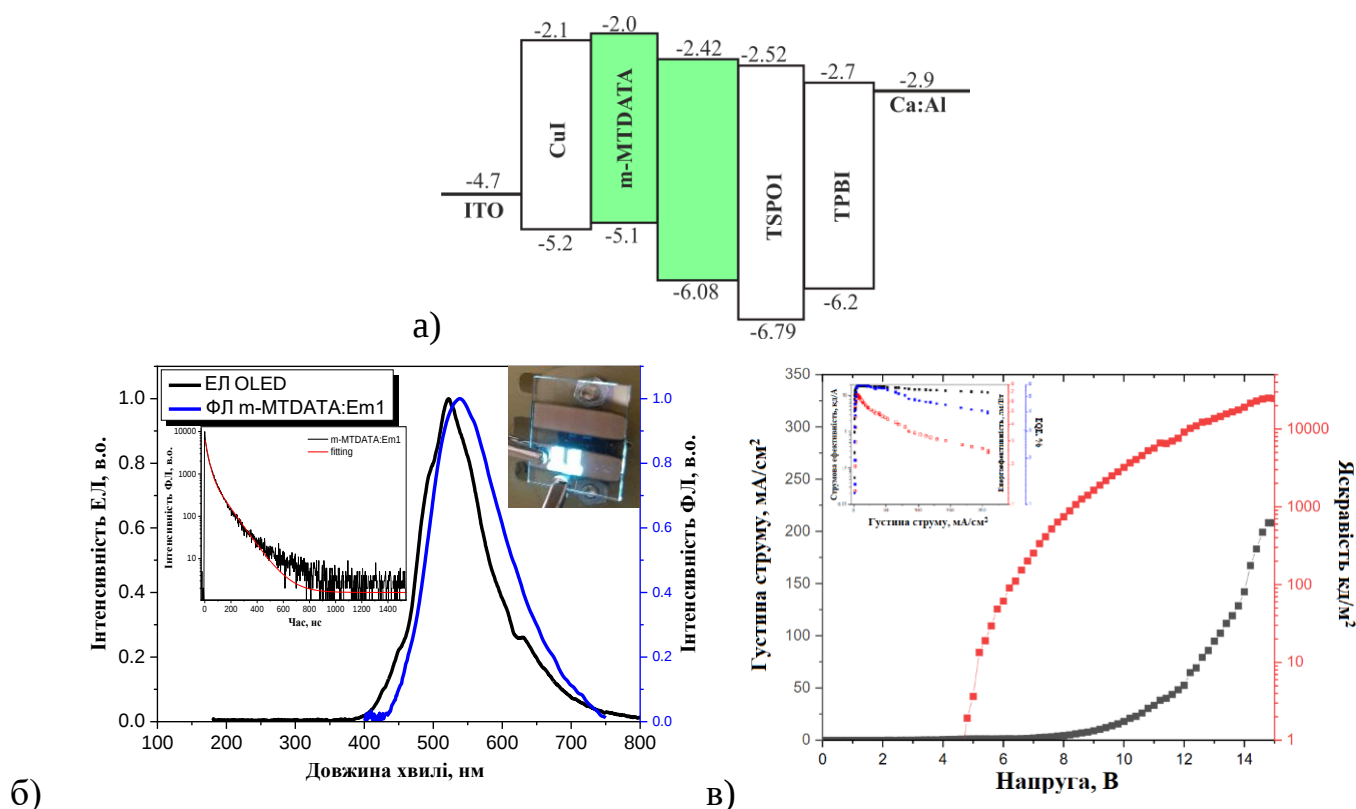


Рис. 27. Схеми приладу Б: енергетична діаграма (а); відповідний нормований спектр електролюмінесценції, а також яскравість/густина струму – напруга (б); залежність струмової ефективності/енергоефективності/EQE від густини струму (в).

Сполука m-MTDATA використовувалася як ефективний дірково-транспортний матеріал та донорний компонент ексіплексної емісійної суміші, Em1 використовувався як акцептор для ексіплексу. Завдяки наявності таких високих

енергетичних інтерфейсних бар'єрів Em1 і m-MTDATA відбувається висока локалізація носіїв заряду. В результаті реалізується перехресний зв'язок електронів на LUMO Em1 і дірок на HOMO m-MTDATA, і відповідні стани переносу заряду відповідають за електролюмінесценцію пристрою В.

Спектр електролюмінесценції пристрою В з максимумом близько 520 нм аналогічний спектру фотолюмінесценції плівки молекулярної суміші Em1 і m-MTDATA (рис. 27б). Стабільність спектрів електролюмінесценції вказують на відсутність ефектів конформаційного розладу, які можуть виникнути при різних напругах живлення. OLED характеризується зовнішньою квантовою ефективністю (EQE) 5,3%, що трохи вище теоретичної межі для флуоресцентних OLED.

Пристрій на основі квантових точок (QLED) має наступну структуру (рис. 28а): ITO/CuI (8 нм)/ Em1: CdSeS/ZnS (мас. %, QD = 15 %) (40 нм)/TSPO1 (10 нм)/TPBI (40 нм)/Ca/Al. CuI і TPBI використовували як дірково-транспортний і електронно-транспортний матеріали відповідно; TSPO1 – екситоноблокуючий шар.

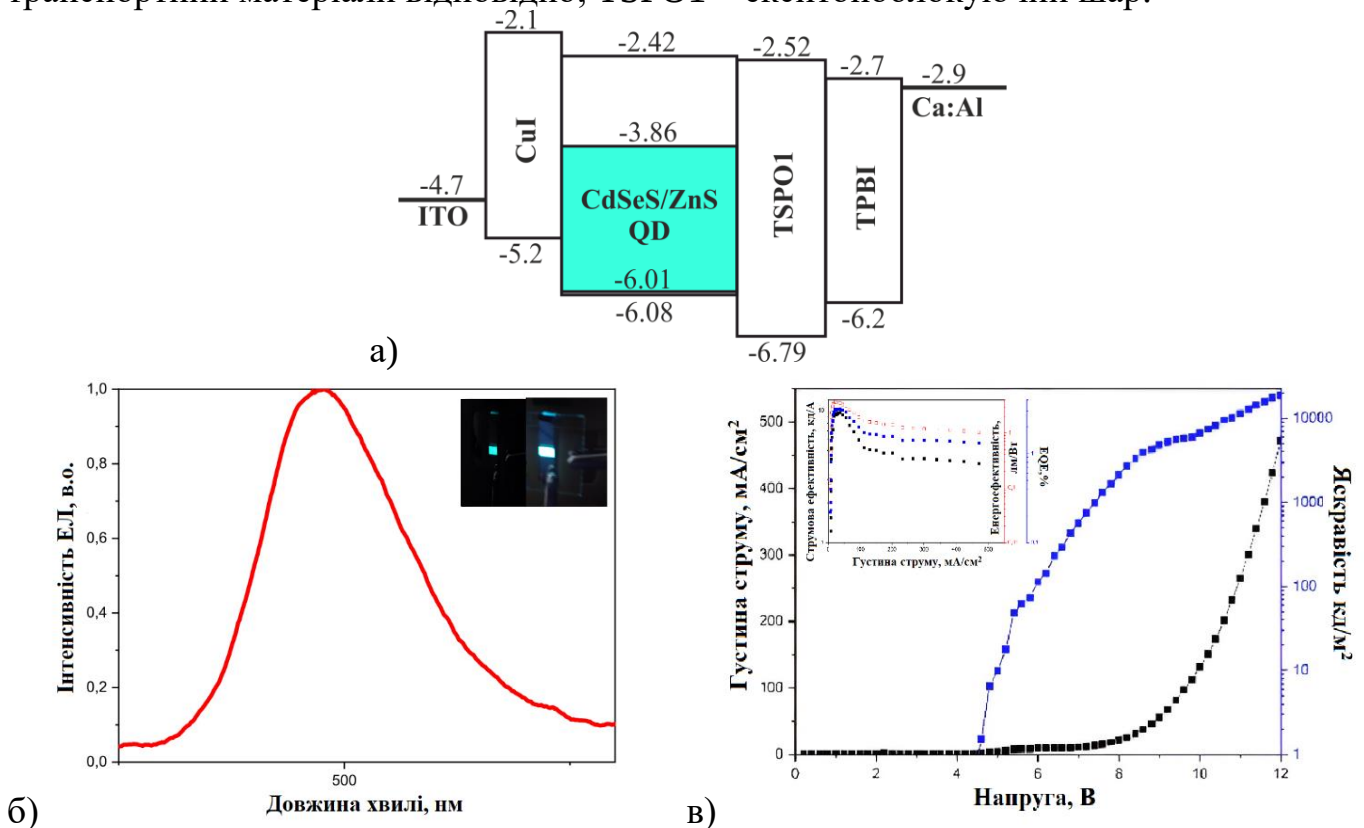


Рис. 28. Енергетична діаграма пристрою (а); відповідний нормований спектр електролюмінесценції, а також залежності яскравість/густина струму струму–напруга (б); струмова ефективність/енергоефективності/EQE-густина струму (в).

Архітектура QLED розроблена з метою локалізації екситонів в емісійному шарі системи «гість-господар» Em1 і CdSeS/ZnS (рис. 28а). При виборі матричної компоненти системи «гість-господар» враховувався коагуляційний поріг наночастинок та енергетичні параметри складових системи.

QLED показав максимальну інтенсивність електролюмінесценції при 491 нм (рис. 28б). Колірні координати пристрою С згідно CIE 1931 ($x = 0,24$, $y = 0,37$) відповідають колірним координатам фотолюмінесценції квантових точок CdSeS/ZnS. Криві залежностей густини струму–напруги та напруги–яскравості QLED наведені на

рис. 26в. Пристрій С показує максимальну яскравість $18\,700\text{ кд/м}^2$ при 12 В (рис. 28в). Таким чином, розроблені конструктивно-технологічні підходи уможливили застосування новосинтезованої сполуки Em1 в якості різних складових емісійного шару.

Беручи до уваги, що комерційне використання OLED дисплеїв з активною матрицею конструктивно передбачає підключення OLED пікселя до витоку n-канального польового транзистора інтегральної плати з друкованим TFT, виникає необхідність створення інвертної світловипромінювальної гетероструктури. Використання комбінації різних технологій осадження та можливість різного функціонального застосування транспортних і емісійних шарів дало можливість отримання як прямої, інвертної світловипромінювальних гетероструктур, так і гібридної гетероструктури на основі квантових точок.

Типова (пряма) структура світловипромінювального пристрою на основі емітера 4 була виготовлена за допомогою тільки термовакuumного осадження органічних сполук і металевих електродів. Для формування інвертного OLED використано наночастинки напівпровідникового оксиду цинку n-типу (ZnO), який формувався на поверхні аноду ІТО методом осадження з розчину. Слід підкреслити, що плівка ZnO, осаджена з розчину, широко використовується як електронно-інжекційний шар в IOLED. Наступним етапом формування інвертної структури було пошарове нанесення інших функціональних шарів методом термовакuumного осадження.

Структура виготовлених пристроїв відповідає наступній схемі (рис. 29):

- 1) Типовий OLED: (An+)ITO/CuI/4/TPBi/Ca/Al(Cat-).
- 2) Інвертний OLED: (Cat-)ITO/ZnO/TPBi/4/MoO₃/Al(An+).

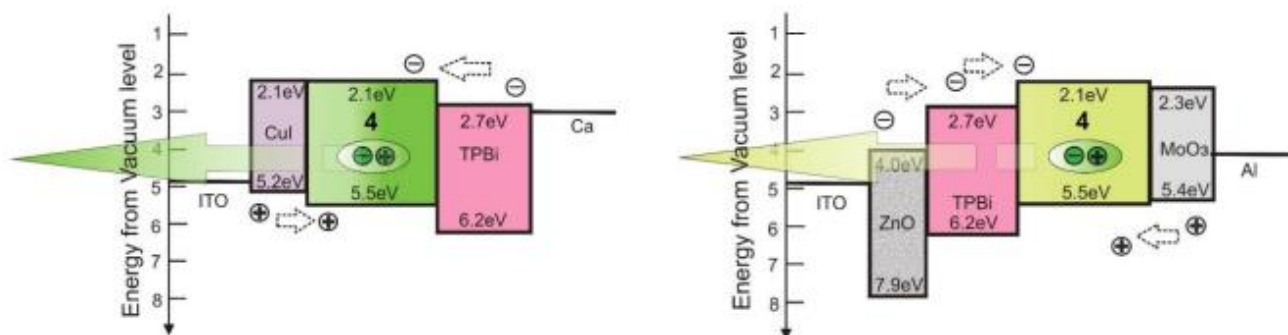


Рис. 29. Енергетичні діаграми типового(прямого) (ліворуч) і інвертного (праворуч) OLED.

Спектр електролюмінесценції пристрою IOLED подібний до спектру фотолюмінесценції двошарової структури ZnO/4. Порівнюючи типову та інвертну гетероструктури, спостерігається основна смуга випромінювання приблизно на 515 нм і слабовиражена смуга при 650 нм. Однак, порівнюючи спектри ФЛ плівки нелегованої сполуки 4 і структури ZnO/4, спостерігається істотна різниця в інтенсивності довгохвильової смуги при 650 нм. Причиною гасіння цієї ексимерної смуги в плівці ZnO/4, швидше за все, є передача енергії від сполуки 4 до шару ZnO, що фактично зменшує ймовірність утворення ексимеру в плівці нелегованої сполуки.

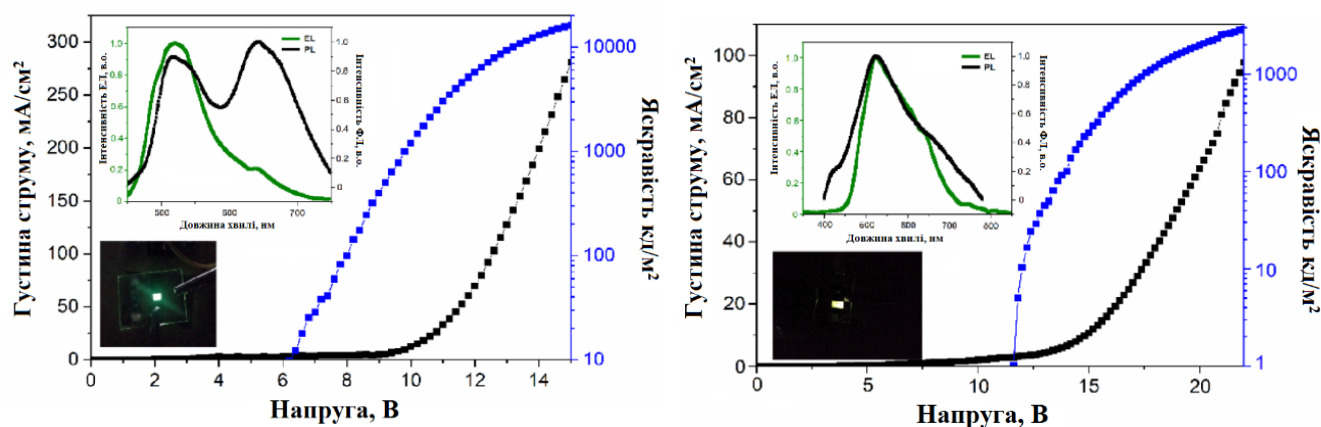


Рис. 30. Характеристики залежності густини струму/яскравості та напруги звичайних (ліворуч) і інвертованих (праворуч) OLED на основі емітер 4.

Спектри ЕЛ OLED та спектри ФЛ твердотільної плівки 4 (ліворуч) і ZnO/4 гетероструктури (праворуч) представлені у вставках (рис. 30). Більша інтенсивність ексимерного випромінювання під впливом більших значень прикладеної напруги зміщення в інвертній структурі (порівняно з типовою) пояснюється квадратичним ефектом Штарка. Електрофізичні характеристики типових та інвертних OLED представлені в таблиці 3.

Таблиця 3. Електрофізичні характеристики сформованих пристроїв.

Пристрій	Напруга вкл., В	Яскравість, кд/м^2	Стумова ефективність, кд/А	Енергоефективність, лм/Вт	Зовнішня квантова ефективність, %
типовий	5.8	16 000	10.0	3.2	3.3
інвертний	11.7	2800	3.0.	0.5	1.1

Також наведено технологічне застосування новосинтезованої сполуки в гібридній світловипромінювальній гетероструктурі QLED. Отриманий пристрій має наступну архітектуру: ITO/CuI/4/QD/TSPO1/TPBI/Ca/Al (енергетична діаграма, представлена на рис. 31). Для формування QLED використовували технологічні підходи: метод осадження колоїдного розчину наночастинок CdSeS/ZnS та термовакuumне осадження органічних функціональних шарів і металічного катоду. Отриманий QLED характеризується спектрально чистою емісією червоного кольору з максимумом електролюмінесценції в 630 нм і FWHM спектру електролюмінесценції – 30 нм. Спектр електролюмінесценції ідентичний спектру фотолімінесценції CdSeS/ZnS легованих квантових точок, розчинених в толуолі ($\lambda_{\text{em}} = 630 \text{ нм}$, FWHM = 30 нм).

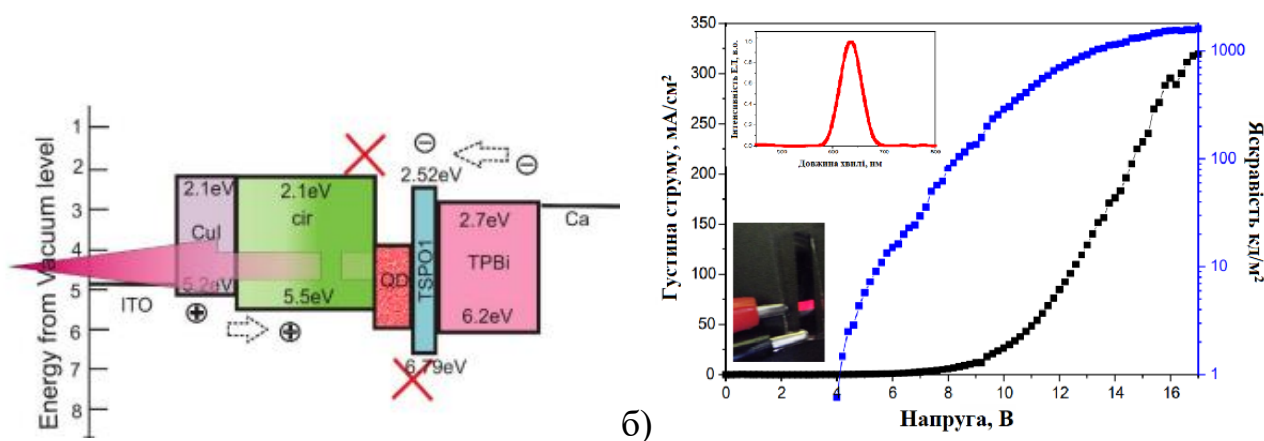


Рис. 31. Енергетична діаграма QLED (а). Вольт-яскравісна характеристика для QLED, включаючи спектр електролюмінесценції пристрою (у вставці) у порівнянні з еталонним максимумом фотолюмінесценції для червоно-емісійних CdSeS/ZnS легованих квантових точок (б).

Ефективне перенесення носіїв заряду в емісійний шар забезпечує використання сполуки 4 як дірково-транспортного шару, а TSP01 і TPBi – як екситон-блокуючий та електронно-транспортний шари відповідно. Яскравість пристрою складає 1600 кд/м² і зовнішня квантова ефективність (EQE) 1,4% (рис. 31).

Враховуючи відносно високі значення флуоресцентних властивостей, в роботі новосинтезовані карбазолопохідні сполуки були використані для розробки технології світловипромінювальних гетероструктур та органічного лазера з бездзеркальним принципом оптичного зворотного зв'язку. Новосинтезовані сполуки використовувалися як емітери в OLED, а також як барвник для виготовлення холестеричного рідкокристалічного лазера. Розчини сполук 1a і 1b показали високий квантовий вихід фотолюмінесценції 35 і 43% відповідно. Було виявлено, що квантові виходи фотолюмінесценції твердих плівок для обох сполук становить лише 9% і 13%, що зумовлено гасінням високої концентрації за рахунок π - π стекінгу взаємодії між сусідніми ароматичними фрагментами в твердому стані. Інші досліджені сполуки, тобто 2a,b і 3a,b, показали зворотну поведінку.

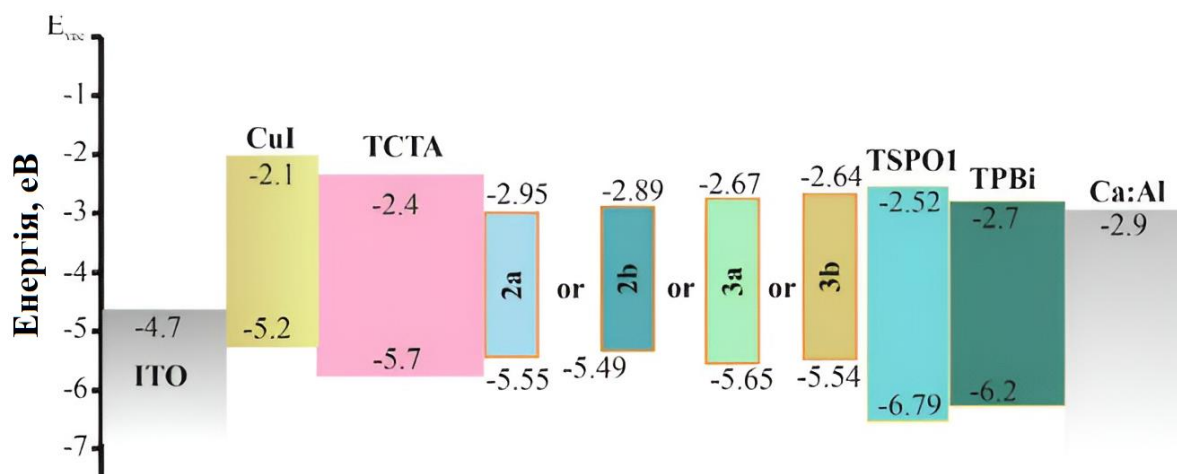


Рис. 32. Енергетична діаграма нелегованих OLED.

Значення квантових виходів фотолюмінесценції розведених розчинів сполук 2a,b і 3a,b виявилися нижчими за 1%. Однак у твердому стані, сполуки 2a,b і 3a,b показали квантові виходи фотолюмінесценції 35,23% і 29,27%, відповідно. Беручи до уваги високі значення квантових виходів фотолюмінесценції в твердому стані сполук 2a,b, 3a,b їх використали світловипромінюючі шари у нелегованих OLED. Енергетична діаграма пристроїв наведена на рис. 32. Структура виготовлених OLED: ITO/CuI(10 нм)/TCTA(30 нм)/світловипромінюючий шар (60 нм)/TSPO1(8 нм) /TPBi(30 нм)/Ca/Al.

Спектри електролюмінесценції розроблених гетероструктур виявилися подібними до спектрів фотолюмінесценції плівок, що використовуються як світловипромінювальні шари. Невеликі відмінності можна пояснити або різними способами збудження (оптичними та електричними), що використовувалися, або міжмолекулярними взаємодіями (утворення агрегатів) сполуки. Спектри електролюмінесценції виготовлених OLED були практично однаковими при різних напругах, що вказує на те, що зона рекомбінації екситонів не була зміщена від світловипромінюючого шару під дією сильного електричного поля. Прилади 2a і 2b характеризувалися небесно-блакитним кольором електролюмінесценції з координатами кольору CIE 1931(0,23, 0,44) і (0,22, 0,40) відповідно (рис. 33, табл. 4).

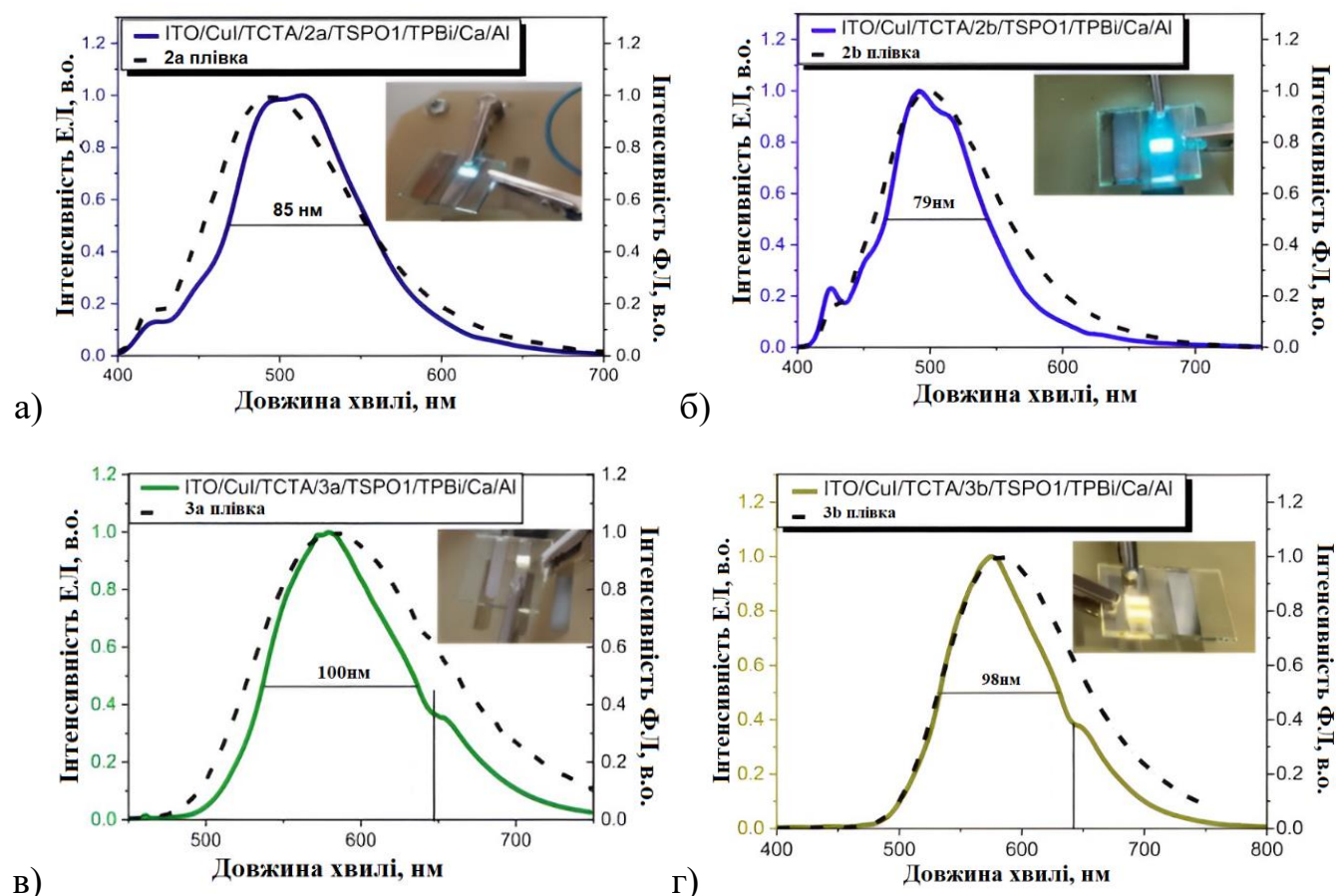


Рис. 33. Спектри електролюмінесценції OLED та спектри фотолюмінесценції плівок новосинтезованих сполук (а-г).

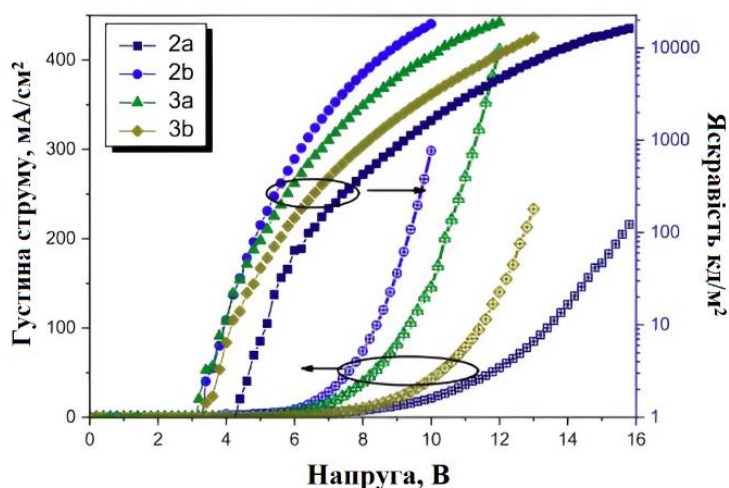


Рис. 34. Залежності густини струму/яскравість від напруги для розроблених пристроїв.

Значення FWHM показали, що електролюмінесценція пристроїв 3a і 3b характеризується меншою чистотою кольору порівняно з приладами 2a і 2b. З іншого боку, пристрої 3a і 3b характеризуються широкими спектрами електролюмінесценції з координатами CIE 1931, близькими до тепло-білого кольору свічення.

Виготовлені пристрої продемонстрували відносно високу яскравість до 18 000 кд/м² за рахунок збалансованої рухливості дірок і електронів та високого квантового виходу фотолімінесценції світловипромінюючих шарів чистих сполук (рис. 34, табл. 4). Було досягнуто максимальної струмової ефективності 8,5 кд/А для пристрою 3b. Пристрої характеризуються відносно низьким спаданням ефективності. Максимальні зовнішні квантові ефективності 2–3% , що є типовими для флуоресцентних пристроїв.

Таблиця 4. Електрофізичні характеристики сформованих пристроїв.

Пристрій	Напруга вкл., В	Макс. яскравість, кд/м ²	Макс. струмова ефективність, кд/А	Макс. зовнішня квантова ефективність, %	CIE координати
2a	5.2	16 000	8.1	3.0	(0.23;0.44)
2b	3.2	18 000	7.4	2.8	(0.22;0.40)
3a	3.0	18 800	6.3	2.0	(0.47;0.44)
3b	3.2	13 000	8.5	2.6	(0.44;0.47)

Беручи до уваги розчинність сполуки 2a, а також спектри фотолімінесценції, часи загасання фотолімінесценції та квантові виходи фотолімінесценції у твердому стані, ця сполука була обрана для виготовлення лазерів на основі холестеричного рідкокристалічного зворотного зв'язку ChLClaser. На рис. 35 представлено спектр відбивання із спектральним діапазоном фотонної забороненої зони для досліджуваних рідкокристалічних комірок, спектр збудження лазера накачування

(пік ліворуч при 352 нм на рис. 35), а також спектр лазерного випромінювання.

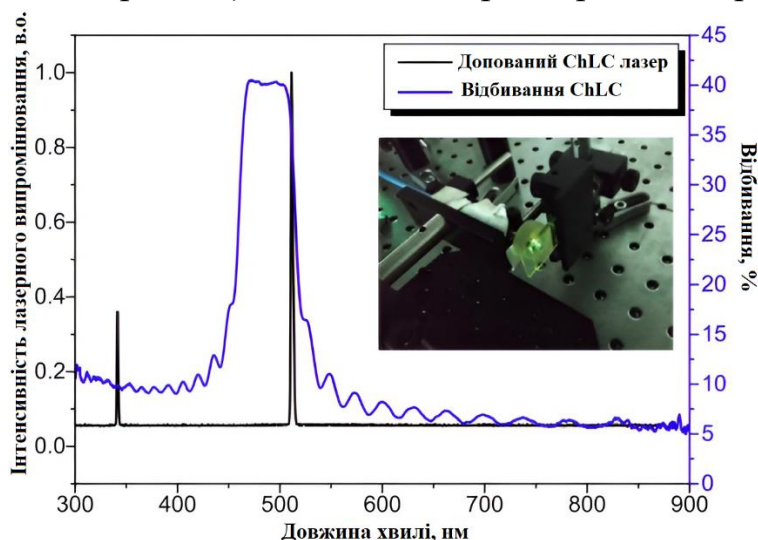


Рис. 35. Спектри відбиття холестеричної рідкокристалічної комірки та холестеричного рідкокристалічного випромінювання лазера на основі сполуки 2a відповідно при ультрафіолетовому лазерному накачуванні. На вставці показано зелене випромінювання сполуки 2a під дією ультрафіолетового лазерного накачування.

Випромінювання, генероване виготовленою рідкокристалічною коміркою, на основі холестеричного рідкого кристалу, легованого сполукою 2a (рис. 35). Холестеричний рідкий кристал використовується як періодичні структури для створення зворотного зв'язку (брегівські ґратки), тоді як сполука 2a використовувалася як лазерний барвник. Сполука 2a добре розчиняється у даній холестеричній суміші KET 90700 (від Jiangsu Hecheng Chemical Materials Co., Ltd (HCCN)), при безпосередньому змішуванні в ізотропній фазі холестеричного рідкого кристалу без виявленої агрегації або седиментації, в тому числі при лазерній накачці. Відомо, що KET 900 має широкий діапазон температур, холестерична фаза якого з температурою переходу в ізотропну фазу $\approx 80^\circ\text{C}$, холестеричний крок є практично незалежним від температури.

Продемонстровано лазерну генерацію для суміші холестеричного рідкого кристала та сполуки 2a на довгохвильовому краю спектру відбивання холестерико-нематичної суміші, а саме на довжині хвилі 515 нм (рис. 35). Цей результат підтверджує, що оптичний зворотний зв'язок дійсно був отриманий завдяки холестеричному рідкому кристалу. Ширина генерованого лазерного піку становила приблизно 3,5 нм відповідно до спектру генерації спектрометром з роздільною здатністю 1 нм. Слід зазначити, що спектр лазерного променя накачування (пік ліворуч при 352 нм на рис. 35) був виміряний для відбитого променя від скляної пластини, але не з передньої сторони рідкокристалічної комірки. Це пояснює, чому інтенсивність пучка збудження була нижчою, ніж інтенсивність пучка, отриманого рідкокристалічним лазером.

В **сьомому розділі** наведено нові конструкторські та технологічні рішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності флуоресцентних високоефективних OLED RGB-системи на основі новосинтезованих сполук. Зокрема,

вирішено проблему створення високоефективних синіх емітерів як одного з базових кольорів RGB для повноколірних дисплейних технологій.

На основі новосинтезованого матеріалу (похідних нафтиліндолу та бензо[бі]карбазолу) розроблена технологія виготовлення нелегованих органічних світлодіодів темно-синього кольору свічення поетапним термовакuumним нанесенням нанорозмірних функціональних шарів:

Пристрій А : ITO/CuI(8nm)/69N(50nm)/PBD(20nm)/Cs₂CO₃(2nm)/Al(80nm)

Пристрій В : ITO/CuI(8nm)/70N(50nm)/Bphen(20nm)/Cs₂CO₃(2nm)/Al(80nm)

У пристроях А та В CuI використовувався як дірково-інжекційний шар. 2-(4-біфеніл)-5-(трет-бутилфеніл)-1,3,4-оксадіазол (PBD) і BPhen (батофенантролін) використовували як електронно-транспортні шари для пристроїв А і В відповідно. Cs₂CO₃ використовувався як додатковий електронно-інжекційний шар, а Al – катод. Товщини цих шарів були оптимізовані таким чином, щоб отримати нижчу напругу включення, що додатково підвищило вихідну продуктивність пристроїв А і В. Різні матеріали для електротранспортних шарів були обрані з врахуванням різних значень рухливості електронів сполук 2 і 4. Рухливість електронів BPhen становить близько 10^{-4} см²/В·с, тоді як у PBD коливається від 2×10^{-5} до 4×10^{-5} см²/В. Рис. 33 демонструє вихідні характеристики нелегованих OLED.

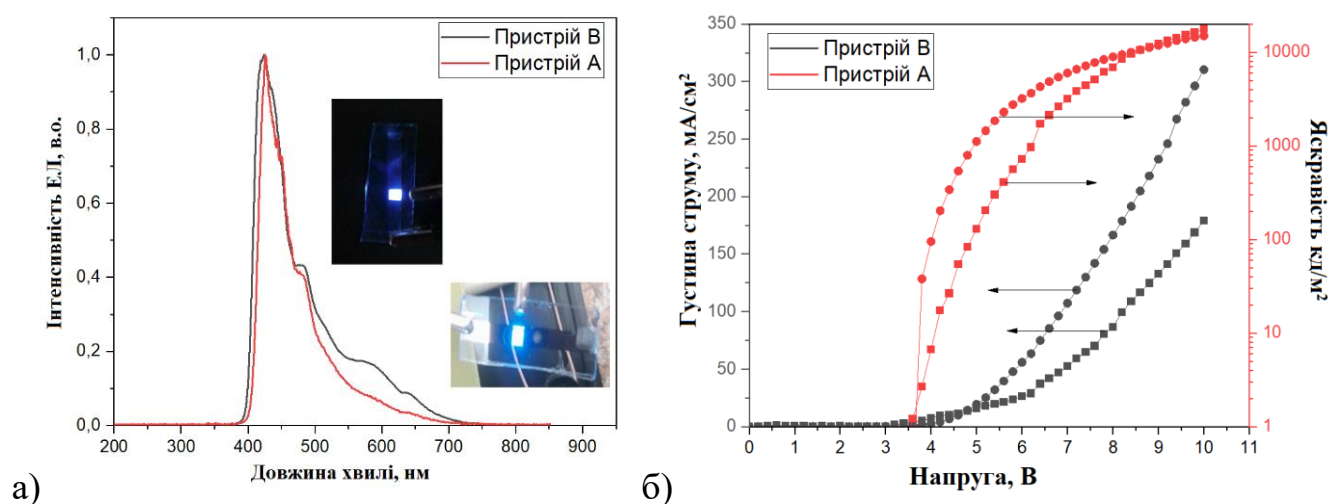


Рис. 36. Спектри електролюмінесценції приладів А і В(а), (б); графіки залежності густини струму та яскравості від напруги для пристроїв А і В (б).

Спектри електролюмінесценції розроблених пристроїв характеризуються вузькою емісією з півшириною по піввисоті 50 нм, максимумом емісії в 425 нм та кольорними координатами CIE1931 (0.21, 0.16). Максимальна зовнішня квантова ефективність – 3,4% близька до теоретично можливого максимуму ефективності флуоресцентних OLED. Пристрої демонструють відносно низькі значення напруги включення та високу яскравість, яка досягає 17 700 кд/м². Вищу яскравість і зовнішню квантову ефективність пристрою А можна пояснити низькими енергетичними бар'єрами між вибраними функціональними шарами, більш збалансованим співвідношенням дірок і електронів у світловипромінюючих шарах і високим квантовим виходом фотоліумінесценції сполуки.

В якості наступної складової RGB-системи розроблено світловипромінювальні гетероструктури зеленого кольору свічення на основі новосинтезованих сполук, колірні координати яких максимально наближені до стандартів RGB CIE 1931.

Пристрій (А): ITO/CuI/1/TCz₁/Ca:Al

Пристрій (В): ITO/CuI/1/Alq₃/Ca:Al

Пристрій (С): ITO/CuI/2/TCz₁/Ca:Al

Пристрій (D): ITO/CuI/2/Alq₃/Ca:Al



Наведені спектри електролюмінесценції OLED структур (рис. 38а) подібні до спектрів фотолюмінесценції твердих плівок 1 і 2 відповідно. Враховуючи значення енергетичних рівнів HOMO та LUMO (рис. 37а), TCz₁ використовувався як електронно-інжекційний шар, а також матеріал для блокування дірок у пристроях А і С. Пристрої В і D, що містять шари Alq₃, характеризуються широкими смугами випромінювання з батохромними зсувами порівняно зі спектрами флуоресценції вакуумно нанесених плівок 1 і 2.

Виявлено, що електролюмінесценція пристроїв В і Д є міксуванням смуг випромінювання 1 або 2 зі смугами випромінювання Alq_3 . Електронно-діркова рекомбінація відбувається в об'ємі шарів 1 або 2 і Alq_3 , який забезпечує збуджені стани в цих шарах під дією зовнішнього електричного поля.

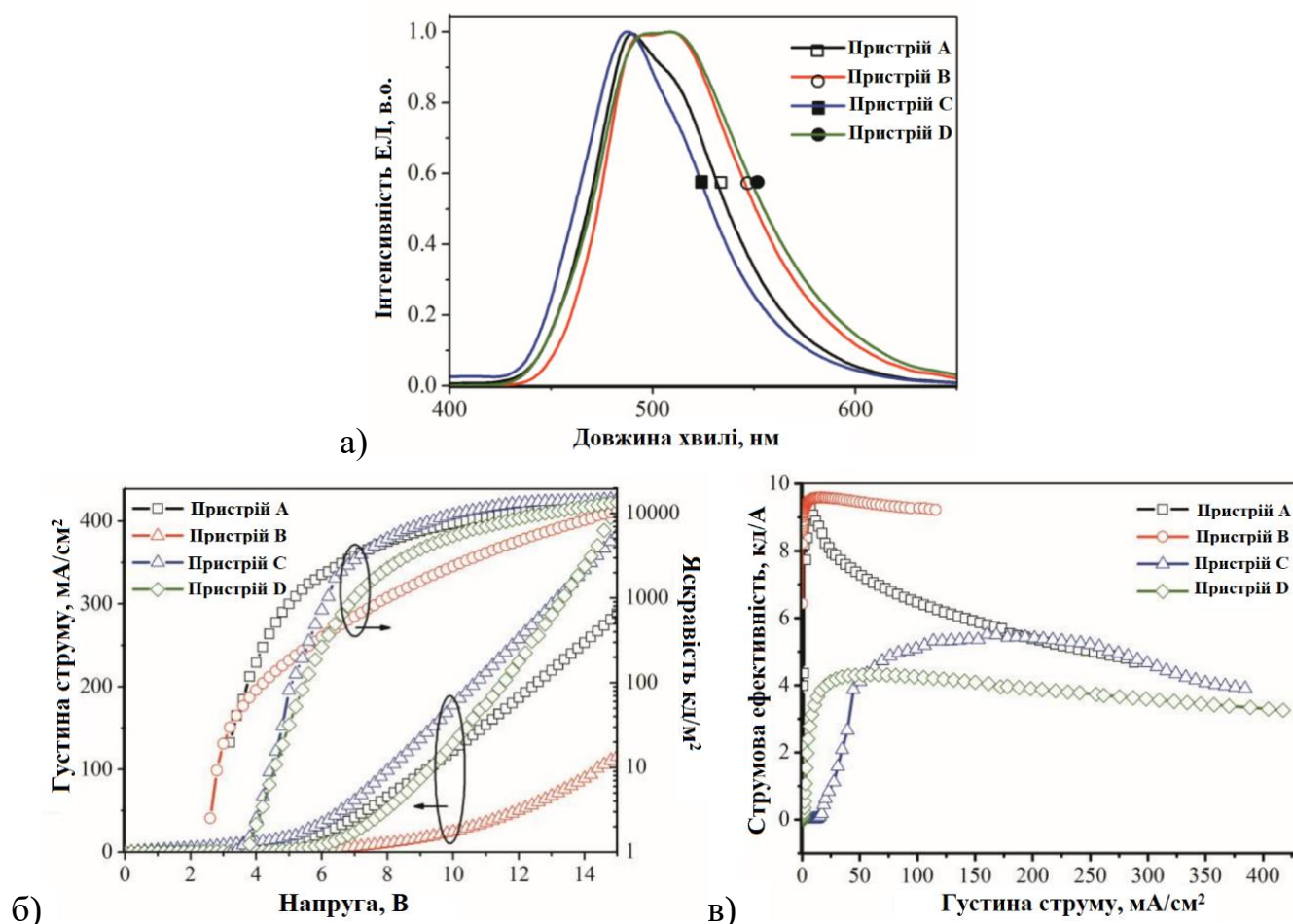


Рис. 38. Спектри електролюмінесценції OLED (а) та залежності густини струму від напруги та яскравісні характеристики (б) і залежності струмової ефективності від густини струму (в) для OLED.

Усі прилади продемонстрували відносно високі показники ефективності для флуоресцентних OLED (рис. 38в). Зона рекомбінації розташована на органічно-органічному інтерфейсі, віддалена від контактів ІТО та Са, що сприяє зменшенню гасіння електролюмінесценції. Пристрої характеризуються низькими напругами включення (приблизно 3,0-3,5 В), що свідчить про відсутність високих енергетичних бар'єрів як для дірок, так і для електронів у гетероструктурах.

В роботі було також продемонстровано ефективність використання новосинтезованого матеріалу з найнижчим потенціалом іонізації у вигляді екситонно-блокуючого шару з високим значенням триплетного рівня для підвищення ефективності та стабільності фосфоресцентної гетероструктури зеленого кольору світіння RGB стандарту. Вирішено проблему низької зовнішньої квантової ефективності фосфоресцентних пристроїв завдяки використанню екситонно-блокуючих шарів, що мінімізують триплет-триплетну анігіляцію (TTA), триплет-поляронне гасіння люмінесценції (TPQ) або дисоціацію екситонів на вільні носії.

З цією метою на основі новосинтезованих сполук були виготовлені два типи електролюмінесцентних пристроїв: без (А) і з (В) екситонно-блокуючим шаром з використанням термовакуумного осадження органічних напівпровідникових шарів і металевих електродів. Пристрої були виготовлені шляхом поетапного осадження та

спільного осадження «гість-господар» TCTA та Ir(ppy)₃ (EML) системи.

Енергетична діаграма пристроїв А і В показана на рис. 37, має наступну структуру:

(А) ITO/m-MTDATA (10 nm)/TCTA:Ir(ppy)₃ (10%, 60 nm)/Bphen (10 nm)/Ca/Al

(В) ITO/m-MTDATA(7 nm)/2 (3 nm)/TCTA:Ir(ppy)₃ (10%, 60 nm)/ Bphen (10 nm)/Ca/Al

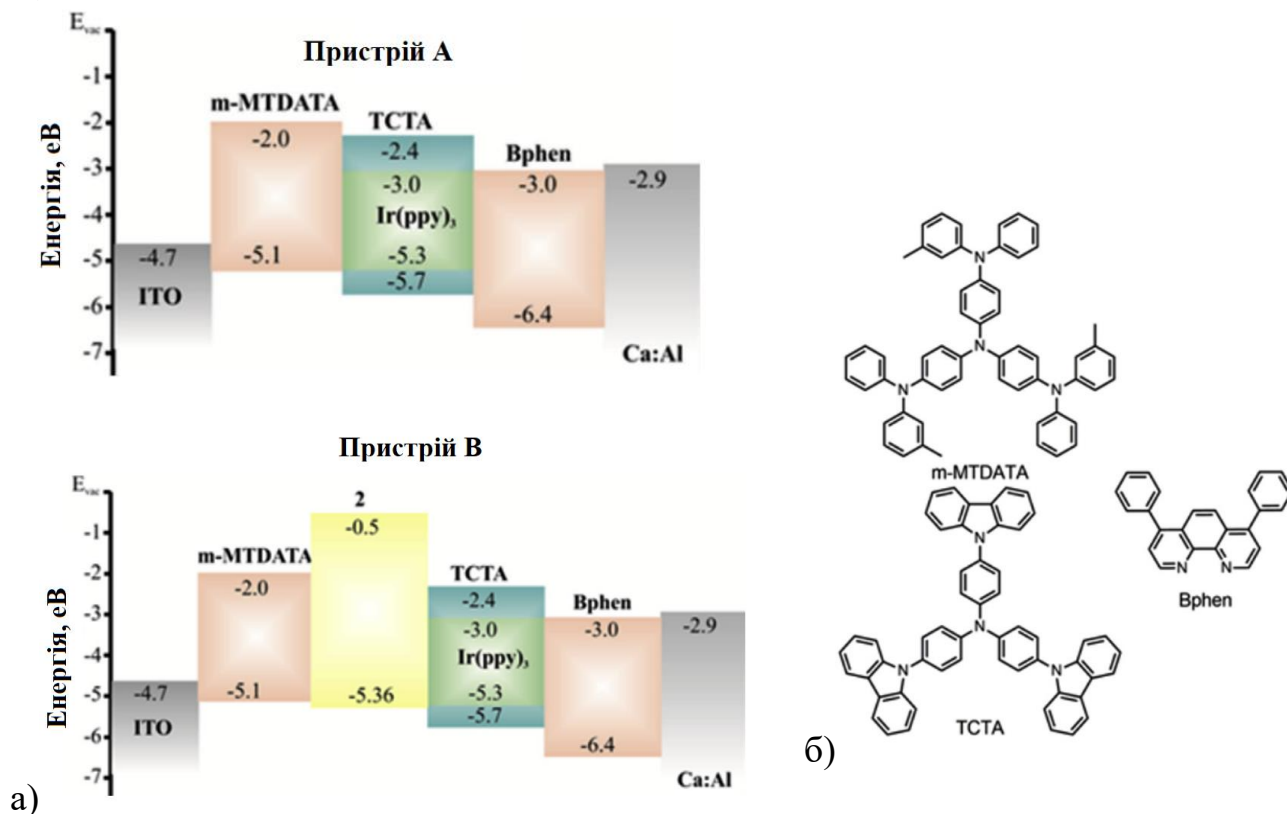


Рис. 39. Енергетичні зонні діаграми пристроїв А і В (а) та хімічні структури матеріалів, що використовуються в OLED (б).

Як показано на рис. 40, спектри електролюмінесценції для двох пристроїв, характеристики приладів А і В ідентичні. Однак напруга включення приладу В з електронно-блокуючим шаром при яскравості 1 кд/м² вище, ніж у пристрою А (тобто 3,5 В і 4,0 В відповідно).

Максимальна струмова та енергоефективність пристрою В становили – 80,1 кд/А і 31,4 лм/Вт, відповідно, що відповідає приблизно 50% збільшенню порівняно з стандартним пристроєм А без електронно-блокуючого шару (41,8 кд/А і 16,7 лм/Вт) (рис. 38). Максимальна зовнішня квантова ефективність (EQE) пристрою В досягає 23,2%, що набагато вище, ніж у еталонного пристрою В (12,1%). Важливо зазначити, що максимум EQE пристроїв А і В досягають при яскравості 4100 - 5500 кд/м² відповідно, і низькій густині струму 10-20 мА/см².

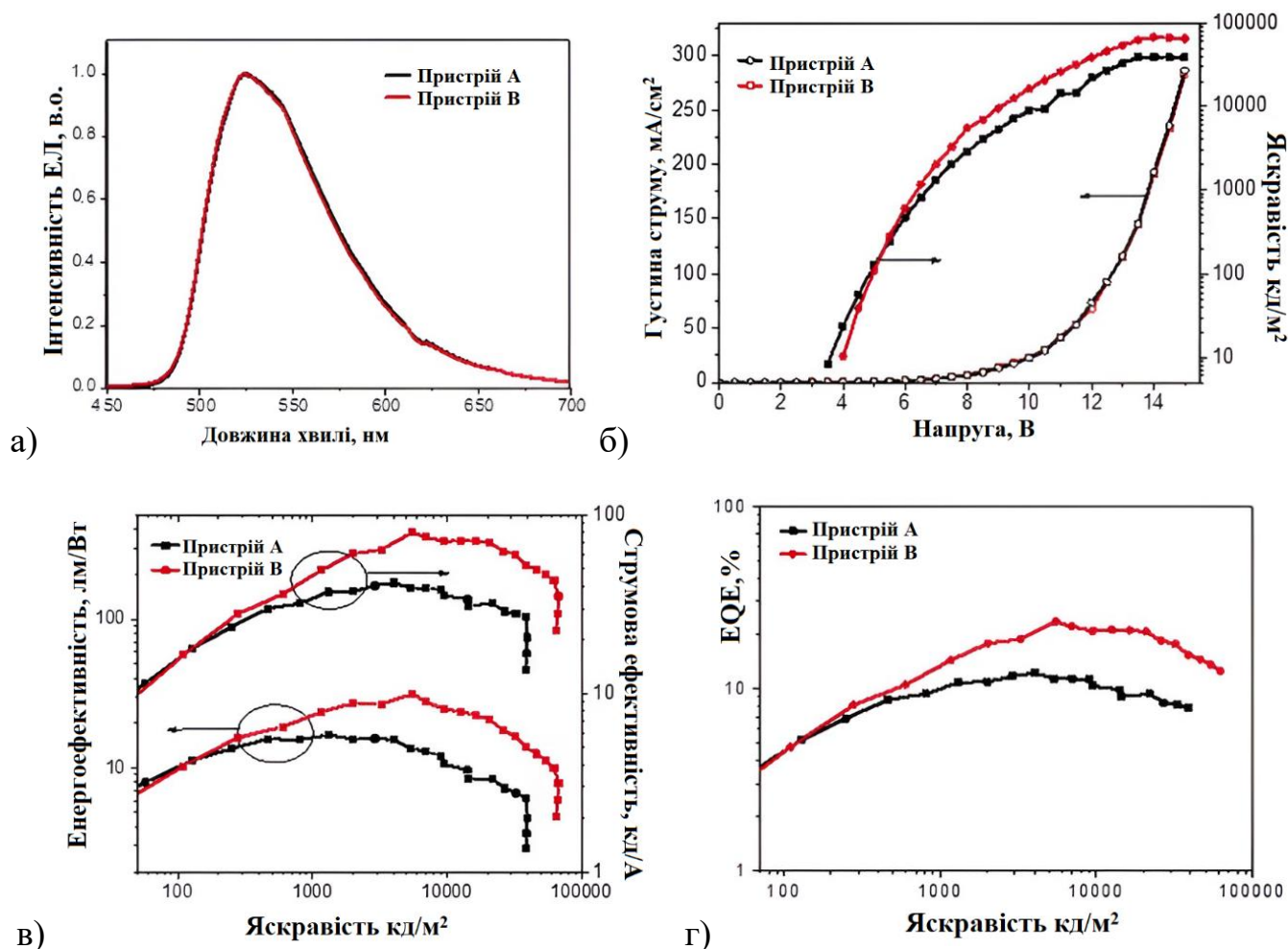


Рис. 40. Нормовані спектри електролюмінесценції (а), вольт-яскравісна характеристика (б), залежність струмoeфективності та енергоефективності від яскравості (в) і залежність зовнішньої квантової ефективності від яскравості свічення пристроїв (г).

Як можна зауважити з рис. 39 наявність екситонно-блокуючого шару підвищує ефективність пристрою при високих густинах струму за рахунок локалізації триплетних екситонів в емітерному шарі.

Наступним і останнім з RGB-моделі є розроблення OLED червоного кольору свічення. Враховуючи пригнічену агрегацію новосинтезованих сполук (похідних BODIPY) у твердому стані та прийнятні стоківські зсуви, які запобігають реабсорбції світла та самогасінню флуоресценції, ці сполуки були імплементовані як емісійні шари для легованих і нелегованих червоних OLED з вузькими спектрами електролюмінесценції, що задовольняють умови RGB системи. Енергетична діаграма сформованих гетероструктур наведена на рис. 41.

Враховуючи значення квантового виходу фотолумінесценції у твердій плівці (1 - 5%, 2 - 7%, 3 - 9%, 4 - 2%) і положення рівнів LUMO і HOMO, були сформовані гетероструктури на основі сполук 2 (пристрої А, С) та 3 (прилади В, D). Нелеговані гетероструктури були оптимізовані з використанням CBP сполуки як матриці для утримання екситонів гостьової компоненти BODIPY 2 і 3 (пристрої С і D відповідно) в емісійному шарі.

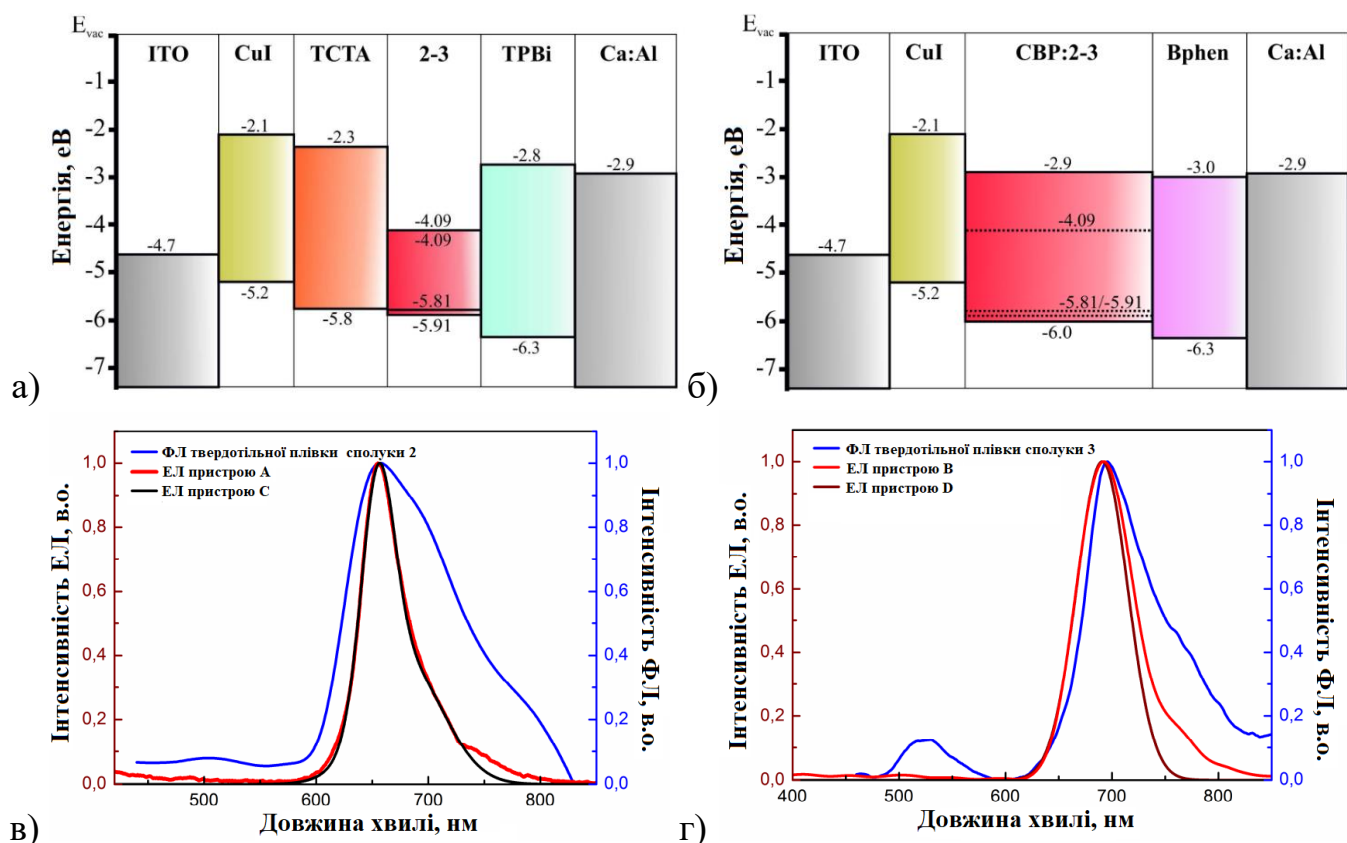


Рис. 41. Енергетичні діаграми виготовлених OLED A, B (а) і C, D (б). Спектри фотолюмінесценції тонких плівок сполук 2 і 3 зі спектрами електролюмінесценції приладів A-D (в, г).

Пристрої A і C характеризуються «чистим» червоним випромінюванням з максимумом електролюмінесценції при 655 нм і повною шириною на половині максимуму (FWHM), що дорівнює лише 45 нм. Слід зауважити, що для пристроїв B і D компонента «господар» вибрана з урахуванням ступеня полярності для забезпечення спектрального зсуву випромінювання гостьової компоненти в довгохвильову область спектру. Таким чином, пристрої характеризуються спектром емісії, близьким до інфрачервоного випромінювання (максимум ЕЛ при 695 нм) і FWHM близько 60 нм, що робить їх перспективними гетероструктурами для біомедичного застосування.

Основна відмінність у спектральній ширині електролюмінесценції та фотолюмінесценції зумовлена підвищеною молекулярною жорсткістю сполук 2 і 3 у тонких термовакuumно нанесених плівках пристрою A, що впливає на придушення випромінюючих вібронних флуоресцентних переходів.

На спектрах фотолюмінесценції спостерігається додаткова смуга близько 525 нм (рис. 41 в, г), яка швидше за все, відповідає випромінюванню агрегатів досліджуваних сполук, які утворюються в твердій плівці.

Яскравісні параметри та параметри ефективності виготовлених пристроїв представлені на рис. 41, а також узагальнені в таблиці 6. Розроблені OLED демонструють стабільну яскравість у широкому діапазоні густин струму. Нелеговані пристрої A і B характеризуються високою напругою включення, однак оптимізовані (леговані) пристрої B і D очікувано демонструють зниження напруги включення (табл. 6). Крім того, використання СВР як матриці збільшує зовнішню квантову

ефективність і яскравість легованих пристроїв С і D порівняно з нелегованими (рис. 42, табл. 6).

Таблиця 6. Електрофізичні характеристики сформованих пристроїв.

Пристрій	Напруга вкл., В	Яскравість, кд/м ² при 15 В /макс	Струмова ефективність, кд/А при 100/1000 кд/ м ²	Зовнішня квантова ефективність, % при 100/1000 кд/ м ²	CIE 1931 (x,y)
A	6.6	1900/1900	0.45/0.47	1.3 / 1.3	(0.55;0.28)
B	9.0	700/3900	0.7/1.0	1.0 /1.5	(0.42;0.28)
C	6.2	2200/2200	0.7/0.6	2.0 /1.9	(0.55;0.28)
D	5.2	3800/3800	1.49/1.55	2.2 /2.3	(0.42; 0.28)

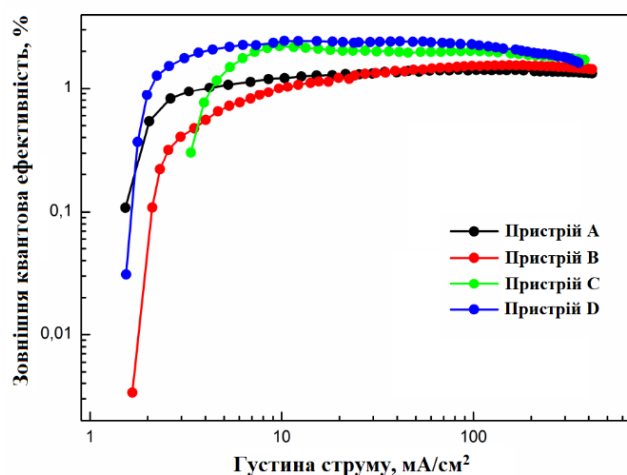


Рис. 42. Залежність зовнішньої квантової ефективності від густини струму для пристроїв A-D.

Одним з технологічних підходів формування фосфоресцентних гетероструктур є використання системи «гість-господар», що забезпечує максимальне задіяння триплетних екситонів у випромінювальній рекомбінації. Підбір матриці, а також її енергетичні, люмінесцентні, термічні та інші властивості відіграють важливу роль в побудові ефективної архітектури пристрою. З цією метою в роботі вивчений вплив морфологічних властивостей матричної компоненти, що безпосередньо залежать від технології нанесення плівок, на ефективність емісійного шару та всієї гетероструктури в цілому.

В роботі використано два новосинтезовані біполярні матеріали-господарі для зелених і червоних PhOLED на основі карбазолу як акцептора та фенотіазину, як донорних фрагментів (рис. 43):

ITO/CzBisPhen:Ir(ppy)₃(45nm)/Bphen(35nm)/Ca:Al(deviceIA);

ITO/CzMonoPhen:Ir(ppy)₃(45 nm)/Bphen (35 nm)/Ca:Al (device IB);

ITO/m-MTDATA (30 nm)/CzBisPhen:Ir(ppy)₃ (20 nm)/Bphen (30 nm)/Ca:Al (device ІІА);

ITO/m-MTDATA (30 nm)/CzMonoPhen:Ir(ppy)₃ (20 nm)/Bphen (30 nm)/Ca:Al (device IIB);

ITO/m-MTDATA (30 nm)/CzBisPhen:Ir(piq)₂(acac) (20 nm)/ Bphen (30 nm)/Ca:Al (device IIIA);

ITO/m-MTDATA (30 nm)/CzMonoPhen:Ir(piq)₂(acac) (20 nm)/Bphen (30 nm)/Ca:Al (device IIIB).

Спектри електролюмінесценції виготовлених пристроїв характеризуються випромінюванням у зеленій та червоній області спектру і відповідають спектрам фотолюмінесценції фосфоресцентних емітерів Ir(ppy)₃ та Ir(piq)₂(acac), що підтверджує, що електролюмінесценція структури відповідає емісії гостьової компоненти. Смути випромінювання m-MTDATA та Bphen не спостерігаються в спектрах електролюмінесценції приладів.

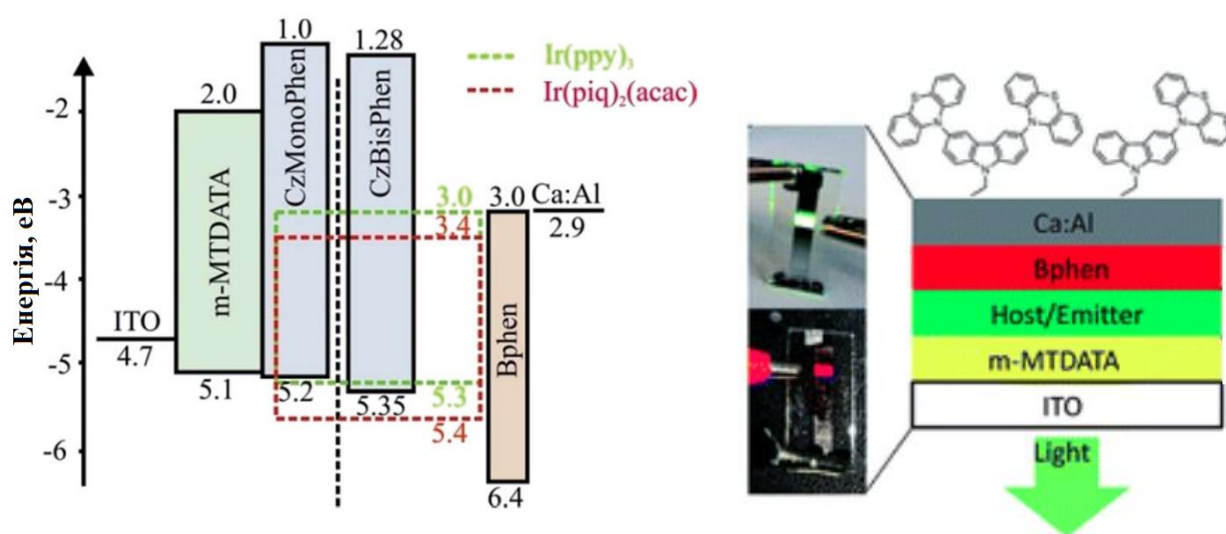


Рис. 43. Енергетичні схеми приладів.

Енергетичні діаграми, показані на рис. 43, вказують на ефективну інжекцію дірок від хостів CzBisPhen і CzMonoPhen до легуючих домішок Ir(ppy)₃ і Ir(piq)₂(acac). Рис. 44 демонструє залежність густини струму від напруги і графіки залежності яскравості від напруги виготовлених пристроїв. Для приладів ІА і ІВ спостерігалися значення 2,5 В напруги включення ($V_{\text{вкл.}}$), тоді як $V_{\text{вкл.}}=3,8\text{В}$ були зареєстровані для пристроїв без шару mMTDATA (ІА та ІВ). Цей результат підтверджує покращення балансу носіїв заряду в емісійному шарі після введення додаткового дірково-транспортного шару m-MTDATA, який зменшив потенційний бар'єр для дірок у пристроях ІА та ІВ. Встановлено, що використання додаткового шару m-MTDATA також покращує інші характеристики пристроїв, зокрема максимальні яскравості свічення 27 262 кд/м² і 58 974 кд/м² (при 7,5 В) становлять для приладів ІА і ІВ відповідно, тоді як яскравості 2698 і 3235 кд/м² спостерігалися для приладів ІА і ІВ при однаковій напрузі відповідно (рис. 44).

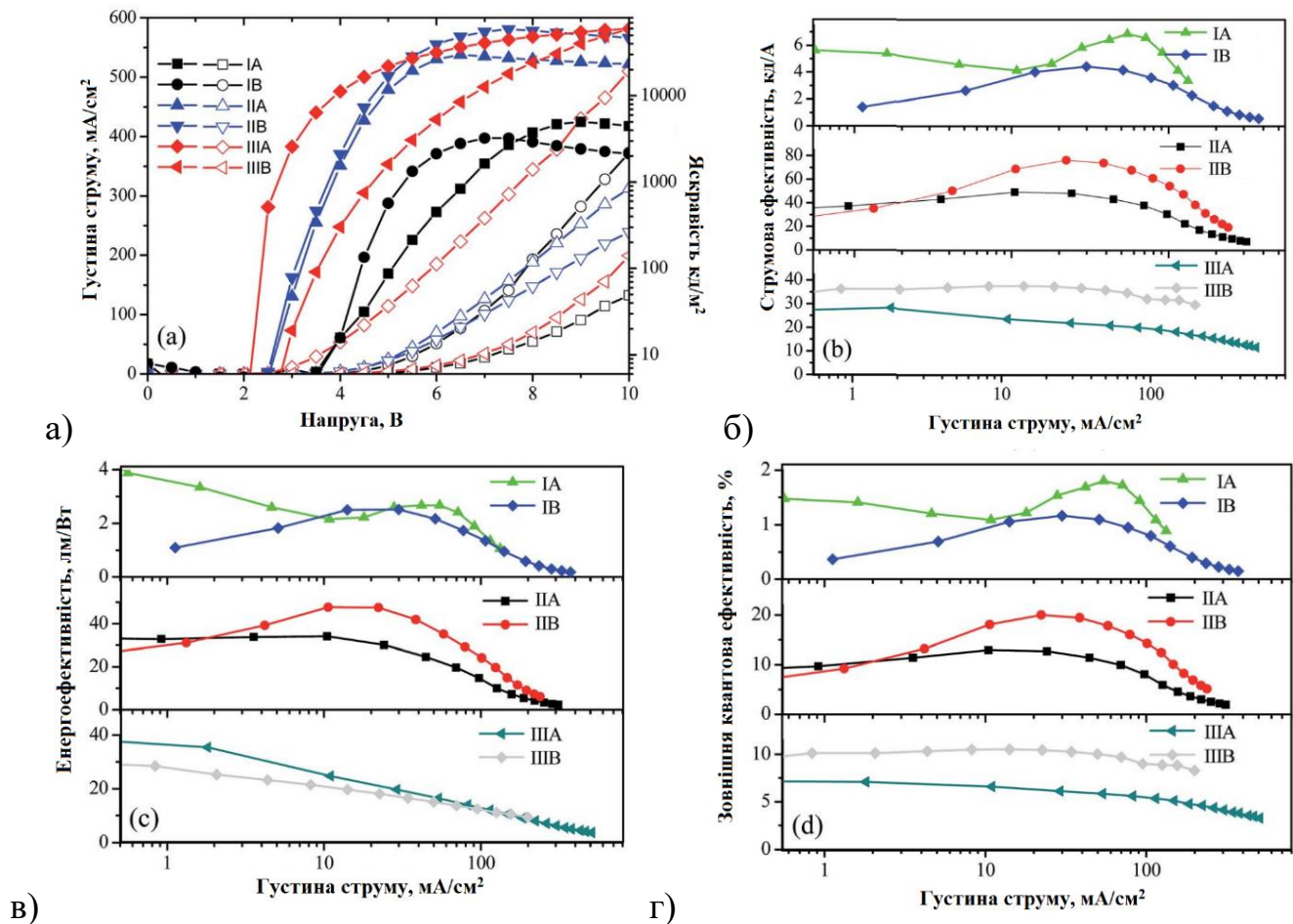


Рис. 44. Характеристики PhOLEDs: залежність густини струму від напруги та яскравості від напруги (а), залежність струмової ефективності від густини струму (б), залежність енергоефективності від густини струму (в), залежність зовнішньої квантової ефективності від густини струму (г).

Таблиця 7. Електрофізичні параметри сформованих структур.

Пристрій	Напруга вкл., В	Макс. яскравість, кд/м²	Макс. струмова ефективність, кд/А	Макс. енергоефективність, лм/Вт	Макс. зовнішня квантова ефективність, %
IA	3.5	4995 (9.0В)	6.89	5.4	1.8
IB	3.5	3235 (7.5В)	4.45	2.5	1.16
IIA	2.5	29 913 (6.5В)	49.4	34.1	12.9
IIB	2.5	58 974 (7.5В)	74.1	47.5	20.0
IIIA	2.5	59 558 (10.0В)	28.2	40.6	7.2
IIIB	3.0	59 110 (10.0В)	37.4	29.6	10.5

Показано, що для пристроїв IIIA та IIIB напруга включення 2,5 В і максимальна яскравість – 59 558 кд/м² і 59 110 кд/м² (рис. 44а). Максимальна струмова ефективність 74,1 кд/А та енергоефективність 47,5 лм/Вт спостерігалися для пристрою IIB (рис. 44в, табл.7).

Досліджено вплив морфології осаджених методом термовакuumного нанесення шарів «гість-господар» (CzBisPhen та CzMonoPhen) та Ir комплексів методом атомно-силової мікроскопії (АСМ). На рис. 45а показано АСМ 3D топографічне зображення шару CzBisPhen:Ir(ppu)₃, отримане в повітрі за допомогою контактного режиму. На рис. 45б показано топографію поверхні шару CzMonoPhen:Ir(ppu)₃, який значно відрізняється від шару CzBisPhen:Ir(ppu)₃.

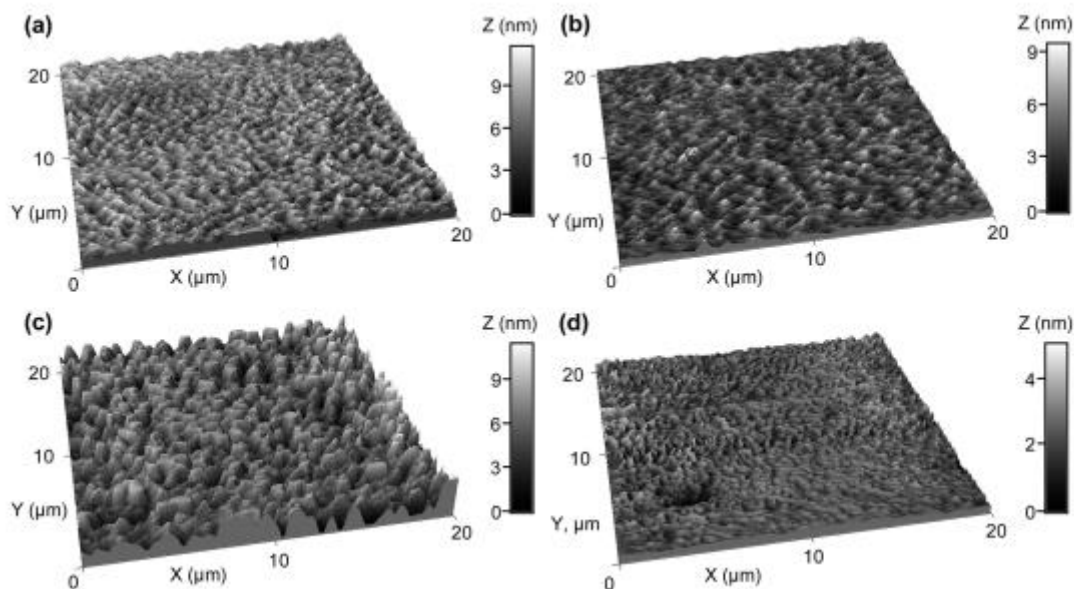


Рис. 45. Характеристики АСМ 3D топографічних зображень із нормованою віссю Z у нм (а) CzBisPhen:Ir(ppu)₃, (б) CzMonoPhen:Ir(ppu)₃, (в) CzBisPhen:Ir(piq)₂(acac) та (г) шари CzMonoPhen:Ir(piq)₂(acac).

Результати аналізу АСМ свідчать про те, що нижчі значення шероховатості Rq досягаються з матрицею CzMonoPhen. Слід зауважити, що сполуки CzBisPhen і CzMonoPhen характеризуються подібними властивостями, такими як рухливість носіїв заряду, енергетичними положеннями синглетних і триплетних рівнів і термічними властивостями, однак виявлено значний вплив морфології емітерних шарів CzBisPhen:Ir(III) і CzMonoPhen:Ir(III) на яскравість і ефективність досліджуваних PhOLED (рис. 44 і табл. 7). Упакування молекул «гість-господаря» під час процесу осадження залежить від відмінностей у морфологічних властивостях поверхні матричної сполуки. Шорохуватість поверхні та межі розділу є критичним фактором, відповідальним за властивості електричних пристроїв. Показано, що в PhOLED з використанням CzMonoPhen, що має низьке значення Rq, покращує інжекційний струм між шарами і тим самим сприяє балансу дірок/електронів. Як результат, отримано значно вищі значення параметрів PhOLED при однакових напругах живлення.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В дисертації наведені актуальні рішення глобальних науково-прикладних проблем покращення яскравості, ефективності та якості кольору приладів сучасних дисплейних технологій та систем дифузного освітлення, шляхом впровадження нових концептуальних конструкторсько-технологічних рішень формування мультифункціональних світловипромінювальних органічних та гібридних

гетероструктур на основі новосинтезованих донорно-акцепторних низькомолекулярних органічних та нанорозмірних неорганічних і металоорганічних напівпровідників.

За результатами дисертації зроблені такі висновки:

1. Вперше розроблені органічні світловипромінювальні структури на основі новосинтезованих амбіполярих карбазоловмісних напівпровідників, що демонструють наближені до рекордних значень зовнішню квантову ефективність органічних електролюмінесцентних пристроїв RGB колірної системи (від 9 % до 14,1 %) за рахунок розроблених архітектурних та технологічних рішень. Такий підхід дозволив мінімізувати енергію синглет-триплетного розщеплення в світловипромінювальних гетероструктурах до значень, при яких теплової енергії при кімнатній температурі достатньо для активації зворотного інтеркомбінаційного переходу сприяючи, таким чином, перетворенню триплетів у синглетний стан і як результат до значного підвищення ефективності та яскравісних параметрів структур.

2. Вперше експериментально досліджено внутрішньомолекулярну та міжмолекулярну затриману флуоресценцію методом електролюмінесцентного парамагнітного резонансу для гетероструктури (ITO/CuI/TCTA/pCNBCzoCF3/m-MTDATA/pCNBCzoCF3/BCP/Ca/Al) з метою оптимізації технології формування WOLED з багатоканальною емісією. На основі експериментальних даних розраховано екситонний радіус ($\geq 1,2$ нм) та значення енергетичних щілин між першим збудженими синглетним та триплетним станами для внутрішньомолекулярного та міжмолекулярного екситонів (ΔE_{ST} в межах 33-45 meV).

3. Вперше, на основі новосинтезованого бікарбазолу та комплексних експериментальних досліджень, розроблено архітектуру та запропоновано технологічні рішення формування вискоефективного WOLED (53,8 кд/А, 19,3 лм/Вт, 17,0 %) з багатоканальною емісією, що генерує «теплий» білий колір електролюмінесценції, характеристики якого є перспективними для застосування в новітніх системах дифузного освітлення.

4. Вперше, на основі новосинтезованих матричних та гостьових органічних напівпровідників досліджено технологічний вплив концентрації емітерної домішки, природи дипольного моменту компонент, швидкості осадження функціональних плівок системи “господар-гість” та використання додаткових екситон-блокуючих шарів на мінімізацію процесу «гасіння» триплетних екситонів в умовах високого енергоспоживання OLED. Як наслідок, вдалося досягти підвищення ефективності та яскравості свічення розроблених гетероструктур на більше ніж 50%.

5. Розроблено конструкції та технології отримання гнучких механолюмінісцентних органічних електролюмінесцентних гетероструктур та ефективних гнучких OLED, оптимізація їх структури шляхом імплементації додаткових функціональних шарів. Розроблена гетероструктура характеризується відтворюваною деформаційною чутливістю електролюмінесценції в діапазоні згину від 0° до 50°.

6. Проведено модифікації плівок нанорозмірних органічних та неорганічних напівпровідників шляхом варіювання технологічних умов їх осадження у вакуумі та з розчину, що забезпечило керування спектральним складом випромінювання (від 100 нм до 3,5 нм) та способом інтеграції OLEDs як піксельного

елемента системи відображення інформації з активною матрицею.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Статті у періодичних виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science, віднесених до першого і другого квартилів (Q1 і Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports:

1. Stanitska, M., Pokhodylo, N., Lytvyn, R., Urbonas, E., Volyniuk, D., Kutsiy, S., Ivaniuk, K., Kinzhybalov, V., Stakhira, P., Keruckiene, R., Obushak, M., & Grazulevicius, J. V. (2024). Effects of electron-withdrawing strengths of the substituents on the properties of 4-(carbazolyl-R-benzoyl)-5-CF₃-1H-1,2,3-triazole derivatives as blue emitters for doping-free electroluminescence devices. *ACS Omega*, 9(12), 14613–14626. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01077> (Scopus, Q2)
2. Danyliv, I., Ivaniuk, K., Danyliv, Y., Helzhynskyy, I., Andruleviciene, V., Volyniuk, D., Stakhira, P., Baryshnikov, G., & Grazulevicius, J. V. (2023). Derivatives of 2-pyridone exhibiting hot-exciton TADF for sky-blue and white OLEDs. *ACS Applied Electronic Materials*, 5(8), 4174–4186. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c00443> (Scopus, Q1)
3. Danyliv, Y., Ivaniuk, K., Danyliv, I., Bezvikonnyi, O., Volyniuk, D., Sych, G., Lazauskas, A., Skhirtladze, L., Ågren, H., Stakhira, P., Karaush-Karmazin, N., Ali, A., Baryshnikov, G., & Grazulevicius, J. V. (2023). Carbazole-σ-sulfobenzimide derivative exhibiting mechanochromic thermally activated delayed fluorescence as emitter for flexible OLEDs: Theoretical and experimental insights. *Dyes and Pigments*, 208, 110841. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2022.110841> (Scopus, Q1)
4. Jatautiene, E., Simokaitiene, J., Sych, G., Volyniuk, D., Ivaniuk, K., Stakhira, P., Fitio, V., Petrovska, H., Savaryn, V., Nastishin, Y., & Grazulevicius, J. V. (2021). Adjustment of electronic and emissive properties of indolo-carbazoles for non-doped OLEDs and cholesteric liquid crystal lasers. *Applied Materials Today*, 24, 101121. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101121> (Scopus, Q1)
5. Bunzmann, N., Krugmann, B., Weissenseel, S., Kudriashova, L., Ivaniuk, K., Stakhira, P., Cherpak, V., Chapran, M., Grybauskaite-Kaminskiene, G., Grazulevicius, J. V., Dyakonov, V., & Sperlich, A. (2021). Spin- and voltage-dependent emission from intra- and intermolecular TADF OLEDs. *Advanced Electronic Materials*, 7(3), 2000702. <https://doi.org/10.1002/aelm.202000702> (Scopus, Q1)
6. Bucinskas, A., Ivaniuk, K., Baryshnikov, G., Bezvikonnyi, O., Stakhira, P., Volyniuk, D., Minaev, B., Ågren, H., Zhydashchuk, Y., & Grazulevicius, J. V. (2020). Can attachment of tert-butyl substituents to methoxycarbazole moiety induce efficient TADF in diphenylsulfone-based blue OLED emitters? *Organic Electronics*, 86, 105894. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105894> (Scopus, Q1)
7. Ivaniuk, K., Pidluzhna, A., Stakhira, P., Baryshnikov, G., Kovtun, Y. P., Hotra, Z., Minaev, B. F., & Ågren, H. (2020). BODIPY-core 1,7-diphenyl-substituted derivatives for photovoltaics and OLED applications. *Dyes and Pigments*, 175, 108123. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.108123> (Scopus, Q1)
8. Ledwon, P., Motyka, R., Ivaniuk, K., Pidluzhna, A., Martyniuk, N., Stakhira, P., Baryshnikov, G., Minaev, B. F., & Ågren, H. (2020). The effect of molecular structure

- on the properties of quinoxaline-based molecules for OLED applications. *Dyes and Pigments*, 173, 108008. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.108008> (Scopus, Q1)
9. Pidluzhna, A., Ivaniuk, K., Stakhira, P., Hotra, Z., Chapran, M., Ulanski, J., Tynkevych, O., Khalavka, Y., Baryshnikov, G., Minaev, B., & Ågren, H. (2019). Multi-channel electroluminescence of CdTe/CdS core-shell quantum dots implemented into a QLED device. *Dyes and Pigments*, 162, 647–653. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.10.074> (Scopus, Q1)
 10. Keruckienė, R., Volyniuk, D., Bezvikonnyi, O., Masimukku, N., Ivaniuk, K., Stakhira, P., & Grazulevicius, J. V. (2018). Benzo[b]carbazole and indole derivatives as emitters for non-doped deep-blue organic light-emitting diodes. *Dyes and Pigments*, 154, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.02.049> (Scopus, Q1)
 11. Grybauskaite-Kaminskiene, G., Ivaniuk, K., Bagdziunas, G., Turyk, P., Stakhira, P., Baryshnikov, G., Volyniuk, D., Cherpak, V., Minaev, B., Hotra, Z., Ågren, H., & Grazulevicius, J. V. (2018). Contribution of TADF and exciplex emission for efficient “warm-white” OLEDs. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(6), 1543–1550. <https://doi.org/10.1039/C7TC05392D> (Scopus, Q1)
 12. Kukhta, N., Matulaitis, T., Volyniuk, D., Ivaniuk, K., Turyk, P., Stakhira, P., Grazulevicius, J. V., & Monkman, A. (2017). Deep-blue high-efficiency TTA OLED using para- and meta-conjugated cyanotriphenylbenzene and carbazole derivatives as emitter and host. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 8(24), 6199–6205. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.7b02867> (Scopus, Q1)
 13. Ivaniuk, K., Cherpak, V., Stakhira, P., Baryshnikov, G., Minaev, B., Hotra, Z., Turyk, P., Zhydashchuk, Y., Volyniuk, D., Aksimentyeva, O., Penyukh, B., Lazauskas, A., Tamulevičius, S., Grazulevicius, J. V., & Ågren, H. (2017). BaZrO₃ perovskite nanoparticles as emissive material for organic/inorganic hybrid light-emitting diodes. *Dyes and Pigments*, 145, 399–403. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.06.020> (Scopus, Q1)
 14. Skuodis, E., Tomkeviciene, A., Reghu, R., Peciulyte, L., Ivaniuk, K., Volyniuk, D., Bezvikonnyi, O., Bagdziunas, G., Gudeika, D., & Grazulevicius, J. V. (2017). OLEDs based on the emission of interface and bulk exciplexes formed by cyano-substituted carbazole derivative. *Dyes and Pigments*, 139, 795–807. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.01.016> (Scopus, Q1)
 15. Bagdziunas, G., Surka, M., & Ivaniuk, K. (2017). High triplet energy exciton blocking materials based on triphenylamine core for organic light-emitting diodes. *Organic Electronics*, 41, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.12.002> (Scopus, Q1)
 16. Cekaviciute, M., Simokaitiene, J., Sych, G., Grazulevicius, J. V., Jankauskas, V., Volyniuk, D., Stakhira, P., Cherpak, V., & Ivaniuk, K. (2016). Diphenylethenyl- and methylphenylethenyl-substituted triphenylamines as effective hole transporting and emitting materials. *Dyes and Pigments*, 134, 593–600. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2016.08.007> (Scopus, Q1)
 17. Bagdziunas, G., Grybauskaite, G., Kostiv, N., Ivaniuk, K., Volyniuk, D., & Lazauskas, A. (2016). Green and red phosphorescent organic light-emitting diodes with ambipolar hosts based on phenothiazine and carbazole moieties: Photoelectrical properties, morphology and efficiency. *RSC Advances*, 6(66), 61544–61554. <https://doi.org/10.1039/C6RA12692H> (Scopus, Q2)
 18. Baryshnikov, G., Gawrys, P., Ivaniuk, K., Witulski, B., Whitby, R., Al-Muhammad,

A., Minaev, B., Cherpak, V., Stakhira, P., Volyniuk, D., Wiosna-Salyga, G., Luszczynska, B., Lazauskas, A., Tamulevicius, S., & Grazulevicius, J. V. (2016). Nine-ring angular fused bis-carbazoloanthracene displaying a solid-state based excimer emission suitable for OLED application. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(24), 5795–5805. <https://doi.org/10.1039/C6TC01469K> (Scopus, Q1)

Статті у фахових наукових виданнях України:

19. Ivaniuk, K., & Lesko, P. (2024). Multifunctional application of planar 2D molecule for light-emitting heterostructures. *Technology Audit & Production Reserves*, 3(77), 6–10. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.306820> (Категорія Б)
20. Ivaniuk, K., Kutsiy, S., Shchetinin, M., Bulavinets, T., & Yaremchuk, I. (2024). Application of carbazole derivatives as a multifunctional material for organic light-emitting devices. *Technology Audit & Production Reserves*, 2, 31–36. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.302968> (Категорія Б)

Патенти:

21. Патент на корисну модель МПК G12B 3/00. Герметичне перекриття вакуумних об'ємів: пат. 91488 Україна. Патентовласник: Національний університет «Львівська політехніка». Авт.: Готра З.Ю., Іванюк Х.Б., Черпак В.В., Стахіра П.Й., Гельжинський І.І. № u 2014 00034; заявл.: 08.01.2014 ; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13. 2 с.
22. Патент на корисну модель МПК H01L 27/28. Спосіб виготовлення органічного світлодіода: пат. 104276 Україна. Патентовласник: Національний університет «Львівська політехніка». Авт.: Стахіра П.Й., Черпак В.В., Готра З.Ю., Іванюк Х.Б., Чапран М.М., Гельжинський І.І. № u201505804; заявл. 12.06.2015 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2. 2 с.
23. Патент на корисну модель Портативний пристрій для визначення вольт-амперних характеристик та яскравісних характеристик органічних світлодіодів / Х.Б. Іванюк, П.Й. Стахіра, М.С. Івах, О.С. Дом'янич; заявл. Національний університет «Львівська політехніка»; – u202004580; заявл. 20.07.2020.

Монографії:

24. Баришніков Г.В. Елементи та пристрої органічної електроніки: колективна монографія / Г.В. Баришніков, І.І. Гельжинський, З.Ю. Готра, Х.Б. Іванюк, Б.П. Мінаєв, П.Й. Стахіра. – Львів: «Простір – М», 2020. – 224 с.
25. Баришніков Г.В. Органічні світловипромінювальні структури: колективна монографія / Г.В. Баришніков, І.І. Гельжинський, З.Ю. Готра, Х.Б. Іванюк, Б.П. Мінаєв, П.Й. Стахіра. – Львів: Видавництво «Львівської політехніки», 2020. – 236 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

26. Chapran, M., Ivaniuk, K., Cherpak, V., Stakhira, P., Wiosna-Salyga, G., Luszczynska, B., & Ulanski, J. (2016, May 23–27). *The tandem white organic light-emitting diode (WOLED) based on blue and orange exciplex emissions* [Conference abstract]. 10th

- Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-10), Ternopil, Ukraine, p. 40.
27. Lytvyn, R., Bagdziunas, G., Ivaniuk, K., Daitukaityte, D., Danyliv, Y., Hladka, I., Volyniuk, D., Kostiv, N., & Grazulevicius, J. V. (2016, May 23–27). *3-carbazolyl-4-phenylquinolin(on)es as new potential emitters for blue organic light emitting diodes* [Conference abstract]. 10th Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-10), Ternopil, Ukraine, p. 120.
 28. Volyniuk, D., Grybauskate-Kaminskiene, G., Bagdziunas, G., Ivaniuk, K., Cherpak, V. V., Stakhira, P. Y., & Grazulevicius, J. V. (2016, September 21–24). *3,3'-bicarbazole derivative and its mixtures with donor and acceptor molecules for TADF OLEDs* [Conference abstract]. Baltic Polymer Symposium, Klaipeda, Lithuania, p. 16.
 29. Grybauskate-Kaminskiene, G., Bagdziunas, G., Ivaniuk, K., Cherpak, V. V., Stakhira, P. Y., Volyniuk, D., & Grazulevicius, J. V. (2016, September 21–24). *New efficient 3,3'-bicarbazole derivatives for light-emitting devices: Photophysical, photoelectrical and electroluminescent properties* [Conference abstract]. Baltic Polymer Symposium, Klaipeda, Lithuania, p. 90.
 30. Deksnys, T., Simokaitiene, J., Keruckas, J., Volyniuk, D., Cherpak, V., Stakhira, P., Ivaniuk, K., Helzhynskyy, I., Baryshnikov, G. V., Minaev, B. F., & Grazulevicius, J. V. (2016, September 21–24). *(Dimethoxydiphenylamino)-9-(1-naphthyl)carbazole as bipolar emitter for electroluminescent devices* [Conference abstract]. Baltic Polymer Symposium, Klaipeda, Lithuania, p. 94.
 31. Ivaniuk, K., Dupliak, I. Y., Helzhynskyy, I., Stakhira, P. Y., Xiaofen, T., Volyniuk, D., & Grazulevicius, J. (2018, September 25–26). *High-efficiency WOLED based on double exciplex emission* [Conference abstract]. International Scientific Conference "Molecular Engineering and Computational Modelling for Nano- and Biotechnology", dedicated to the 75th anniversary of Professor Boris Minaev, Cherkasy, Ukraine, pp. 52–53.
 32. Pidluzhna, A. Y., Ivaniuk, K., Chapran, M., Tynkevych, O., Khalavka, Y., & Stakhira, P. (2018, September 25–26). *Electroluminescent properties of heterostructures based on CdTe/CdS quantum dots* [Conference abstract]. International Scientific Conference "Molecular Engineering and Computational Modelling for Nano- and Biotechnology", Cherkasy, Ukraine, pp. 103–104.
 33. Boyko, O., Holyaka, R., Hotra, Z., Fechan, A., Ivaniuk, K., Chaban, O., Zyska, T., & Shedreyeva, I. (2018). *Functionally integrated sensors of thermal quantities based on optocoupler*. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018* (Vol. 10808, pp. 1080812-1–1080812-6). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2501550>
 34. Grazulevicius, J., Grybauskaite-Kaminskiene, G., Matulaitis, T., Kukhta, N., Pashazadeh, R., Skuodis, E., Tomkeviciene, A., Volyniuk, D., Pander, P., Dias, F., Ivaniuk, K., & Stakhira, P. (2018, May 21–25). *Donor-acceptor molecular materials as emitters and hosts for efficient organic light-emitting diodes* [Conference abstract]. 11th International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials", Ivano-Frankivsk, Ukraine, p. 9.
 35. Ivaniuk, K., Turyk, P., Dupliak, I. Y., Helzhynskyy, I., Stakhira, P., Tan, X., Volyniuk, D., & Grazulevicius, J. (2018, May 21–25). *High-efficiency WOLED based on double*

- emission layers* [Conference abstract]. 11th International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials", Ivano-Frankivsk, Ukraine, p. 208.
36. Ivaniuk, Kh., Kutsiy, S., Helzhynskyy, I., Fechan, A., Stakhira, P., & Hotra, Z. (2019). *Deep Blue Fluorescence Organic Light-emitting Diode*. Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 3–5 жовтня 2019 р., Чернівці, Україна, 37.
 37. Ivaniuk, Kh., Kutsiy, S., Helzhynskyy, I., Kuchniy, G., Stakhira, P., & Hotra, Z. (2019). *New Interface Engineering Method is Demonstrated for the Preparation of An Efficient White Organic Light-emitting Diode (WOLED)*. Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 3–5 жовтня 2019 р., Чернівці, Україна, 38.
 38. Pokhodylo, N., Lytvyn, R., Stanicka, M., Tupyshak, M., Pitkovych, Kr., Bezvikonnyi, O., Urbonas, E., Volyniuk, D., Kutsiy, S., Ivaniuk, K., Kinzhybalo, V., Stakhira, P., Grazulevicius, J.V., & Obushak, M. (2019). *Design, synthesis and studies of carbazole and triazole based materials for OLED applications*. XXV Українська конференція з органічної та біоорганічної хімії: матеріали (Луцьк, 16–20 вересня 2019 р.), 11.
 39. Volyniuk, D., Mahmoudi, M., Sych, G., Guzauskas, M., Tan, X., Kutsiy, S., Ivaniuk, K., Helzhynskyy, I., Stakhira, P., & Grazulevicius, J.V. (2020). *Exploiting Exciplex-Based Emitters in Structure of White Light Emitting Diodes*. Baltic Polymer Symposium 2020 (Zoom).
 40. Ivaniuk, Hr., Kutsiy, S., Helzhynskyy, I., Tan, X., Stakhira, P., & Grazulevicius, J. (2020). *Blue and yellow light electroluminescence in a multilayer WOLED using Ir complexes*. Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020): Abstract Book International Research and Practice Conference, 26–29 August 2020, Lviv, Ukraine, 105.
 41. Volyniuk, D., Tan, X., Simokaitiene, J., Bucinskas, A., Matulaitis, T., Jatautiene, E., Ivaniuk, Kh., Helzhynskyy, I., Stakhira, P., & Grazulevicius, J.V. (2019). *Development of new multicolor-excimer emitters utilizing diphenylsulfone/ditolylsulfone and phenothiazine/phenoxathiine/xanthene moieties for white electroluminescent devices*. Sustainable Industrial Processing Summit, 11, 143-144.
 42. Ivaniuk Kh., Stakhira P., Helzhynskyy I., Kutsiy S., Hotra Z., Deksnys T., Volyniuk D., Grazulevicius J. V., Gorbolic V. (2020). *Contribution of fluorescence and excimer emission into efficient white OLED*. Proceedings - 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020, TCSET 2020 Lviv-Slavske, 25–29 February 2020, 821-824.
 43. Dupliak, I., Liang, Y., Yan, G., Li, F., & Ivaniuk, Khrystyna. (2020). *Picosecond laser processing of stainless steel for superhydrophobic surface fabricating*. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials: Abstracts of the XII International Conference, 1–5 June 2020, Kamianets-Podilskyi, 199.
 44. Grazulevicius, J., Kukhta, N., Pashazadeh, R., Skuodis, E., Tomkeviciene, A., Keruckiene, R., Simokaitiene, J., Cekaviciute, M., Tan, X., Ivaniuk, Khrystyna, Stakhira, Pavlo, Volyniuk, Dmytro. (2020). *Organic bipolar emitters for OLEDs and*

- oxygen sensor. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials: Abstracts of the XII International Conference, 1–5 June 2020, Kamianets-Podilskyi, 206.
45. Horbenko, Y., Glazunova, V., Ivaniuk, K., Matkivska, G., Starykov, H., Aksimentyeva, O., & Vistak, M. (2020). *Structure, optical and sensory properties of poly-3,4-ethylenedioxythiophene films doped with graphene oxide*. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials: Abstracts of the XII International Conference, 1–5 June 2020, Kamianets-Podilskyi, 320.
 46. Ivaniuk H., Aksimentyeva O., Starykov H. Horbenko Yu. (2020). *Electrochromic properties of electrodeposited PEDOT/GO films on flexible substrates*. Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2020): Abstract Book International Research and Practice Conference, 26–29 August 2020, Lviv, Ukraine, 110.
 47. Tupyshak, M., Pitkovych, K., Bezvikonnyi, O., Urbonas, E., Volyniuk, D., Kutsiy, S., Ivaniuk, K., Tomkeviciene, A., Grazulevicius, J.V., Obushak, M., Pokhodylo, N., Lytvyn, R., Stanicka, M., Kinzhybalo, V., & Stakhira, P. (2020). *New carbazole-p-bridge-triazole compounds for OLED applications*. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials: Abstracts of the XII International Conference, 1–5 June 2020, Kamianets-Podilskyi, 256.
 48. Dupliak, I., Bucinskas, A., Ivaniuk, Kh.B., Petrovskaya, G.A., Stakhira, P.Y., Grazulevicius, J.V., Volyniuk, D., & Fitio, V.M. (2020). *Green photoluminescence of N-annelated perylenes in a distributed feedback cavity*. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials: Abstracts of the XII International Conference, 1–5 June 2020, Kamianets-Podilskyi, 321.
 49. Ivaniuk, K., Stakhira, P., Yaremchuk, I., Kutsiy, S., Melnykov, S., Bulavinets, T., Volyniuk, D., Klymenko, I., Such, G., Karaush-Karmazin, N., & Ali, A. (2023). *(Tetrafluorovinylphenyl) carbazole as a multifunctional material for OLED applications*. Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2023): Abstract Book of International Research and Practice Conference, 16–19 August 2023, Bukovel, Ukraine, 501.
 50. Butkute, B.R., Cekaviciute, M., Simokaitiene, J., Volyniuk, B.D., Ivaniuk, K., & Grazulevicius, J.V. (2023). *Synthesis and properties of phenylethenyl-based derivatives for OLEDs*. Advanced Materials and Technologies: Book of Abstracts of 25th International Conference-School, 21–25 August 2023, Palanga, Lithuania, 93.
 51. Stanitska, M., Pokhodylo, N., Lytvyn, R., Urbonas, E., Volyniuk, D., Ivaniuk, K., Stakhira, P., Kerutskiene, R., Obushak, M., & Grazulevicius, J.V. (2023). *A very simple host-free organic light-emitting diode with blue emitting layer of the derivative of 1H-1,2,3-triazole reaching external quantum efficiency of 4.6%*. Advanced Materials and Technologies: Book of Abstracts of 25th International Conference-School, 21–25 August 2023, Palanga, Lithuania, 85.
 52. Iliuin, O.V., Smachylo, Y., Mysiuk, Y., Hladun, M., Ivaniuk, K., Bulavinets, T., Fitio, V., & Yaremchuk, I. (2024). *Silver nanoparticles for surface-enhanced Raman spectroscopy application*. Nanotechnology and Nanomaterials, NANO-2024: Abstract Book of International Research and Practice Conference, 21–24 August 2024, Uzhhorod, 537.

АНОТАЦІЯ

Іванюк Х.Б. Фізико-технологічні основи формування органічних та гібридних світловипромінювальних структур із заданими спектрально-енергетичними характеристиками – Кваліфікаційна робота у вигляді наукової доповіді.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

Дисертація спрямована на вирішення глобальних науково-прикладних проблем покращення яскравості, ефективності та якості кольору приладів сучасних дисплейних технологій та систем дифузного освітлення. Досліджено механізми затриманої флуоресценції (TADF та TTA) в сполуках з внутрішньомолекулярними донорно-акцепторними комплексами перенесення енергії з метою їх застосування як емітерів в високоефективних органічних світловипромінювальних структурах. На основі новосинтезованих досліджених сполук розроблено архітектурний дизайн гетероструктур з міжмолекулярними донорно-акцепторними комплексами для отримання затриманої флуоресценції в повноколірних світловипромінювальних структурах. Експериментально досліджено багатоканальну електролюмінесценцію повноколірної гетероструктури (WOLED) в умовах парамагнітного резонансу, що дозволило в свою чергу основі експериментальних даних розрахувати екситонний радіус та значення енергетичних щілин між першим збудженими синглетним та триплетним станами для внутрішньомолекулярного та міжмолекулярного екситонів. Розроблено технологічні підходи реалізації каналів перенесення енергії від органічної компоненти до неорганічної гостьової компоненти в світловипромінювальних композитних гетероструктурах на їх основі. Продемонстровано багатфункціональне застосування новосинтезованих 2D сполук для застосування в якості функціональних шарів різних типів органічних світловипромінювальних гетероструктур (COLED, IBOLED, QLED). Розроблені технологічні та конструктивні засади побудови RGB систем на основі новосинтезованих флуоресцентних та фосфоресцентних емітерів.

Ключові слова: органічна світловипромінювальна структура, гібридна гетероструктура, донорно-акцепторні сполуки, ексіплекс, наночастинки ZnO, WOLED (white organic light-emitting diode), затримана флуоресценція (TADF)

ABSTRACT

Ivaniuk Kh.B. “Physical and technological bases of the formation of organic and hybrid light-emitting structures with specified spectral and energy characteristics”

Thesis for the attainment of the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.27.06 – Technology, Equipment, and Production of Electronic Engineering – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

This thesis addresses key global scientific and practical challenges associated with

enhancing brightness, efficiency, and color quality in contemporary display technologies and diffuse lighting systems. A comprehensive analysis of existing literature was conducted, which provided insights into pathways for improving efficiency and color parameters. The study also examined the advantages and limitations of current design and technological approaches for constructing light-emitting heterostructures, with a particular focus on their practical applicability. It was emphasized that the structure and properties of organic semiconductor films are highly dependent on the technological conditions under which they are manufactured.

The work centers on exploring the photophysical mechanisms of long-delay fluorescence, specifically Thermally Activated Delayed Fluorescence (TADF) and Triplet-Triplet Annihilation (TTA), in compounds featuring intramolecular donor-acceptor energy transfer complexes and exciplex complexes based on commercial and new synthesized compounds. These systems are investigated with the goal of employing them as high-performance emitters in advanced organic and hybrid light-emitting structures.

A series of novel compounds were studied, providing the foundation for the architectural development of heterostructures incorporating intermolecular donor-acceptor complexes. Particular attention has been devoted to realizing full-color light-emitting structures with enhanced performance characteristics. The objective of these designs is to achieve stable, long-lasting fluorescence across the full visible spectrum. Different approaches were explored that combine fluorescent, TADF, and exciplex emissions, each contributing to specific emission channels within the device. These methods highlight the design strategies for constructing OLEDs with enhanced color purity and efficiency, leveraging the unique properties of each emission type for full-spectrum light generation.

Experimental studies were conducted on the multichannel electroluminescence behavior of full-color heterostructures, specifically white organic light-emitting diodes (WOLEDs), under the influence of paramagnetic resonance. These investigations enabled the determination of exciton radii and the energy gap between the first excited singlet (S_1) and triplet (T_1) states for both intramolecular and intermolecular excitons. The calculations were performed using experimental data, providing valuable insights into the dynamics of exciton behavior in complex organic systems.

Furthermore, novel technological strategies have been developed to enable efficient energy transfer from organic components to inorganic materials within light-emitting composite heterostructures. These strategies significantly contribute to the design of hybrid devices that harness the advantages of both organic and inorganic materials.

Additionally, the multifunctionality of newly synthesized two-dimensional (2D) compounds has been demonstrated, particularly in their role as functional layers within various types of organic light-emitting heterostructures, including COLEDs, IBOLEDs, and QLEDs. Finally, technological and design principles have been proposed for constructing RGB (red-green-blue) lighting systems based on the integration of newly synthesized fluorescent and commercial phosphorescent emitters, paving the way for next-generation display and lighting technologies.

Keywords: organic light-emitting structure, hybrid heterostructure, donor-acceptor compounds, exciplex, ZnO nanoparticles, WOLED (white organic light-emitting diode), thermally activated delayed fluorescence (TADF)