

До разової спеціалізованої ради ДФ 35.051.117  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
м. Львів, вул. Університетська, 1

## **ВІДГУК**

*офіційного опонента, доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника, завідувача відділу матеріалознавства Інституту фізичної оптики імені О.Г. Влоха МОН України*

***Адаміва Володимира Теодоровича***

*на дисертаційну роботу Кофлюк Ірини Миколаївни  
“Формування структури та оптико-люмінесцентні властивості тонких плівок на основі оксиду ітрію, активованого іонами європію”,  
яка представлена на здобуття ступеня доктора філософії  
з галузі знань 10 «Природничі науки»  
за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»*

### **Актуальність теми дисертації**

Пошук функціональних матеріалів з передбачуваними оптико-люмінесцентними властивостями зумовили інтерес сучасних наукових досягнень в області науки і технології. Завдяки інтенсивним дослідженням постійно відкриваються нові матеріали та напрями для покращення властивостей існуючих. Особливу увагу приділяється розробці люмінесцентних матеріалів для оптоелектроніки, які знаходять застосування у дисплеях, засобах запису та візуалізації інформації. Наразі, великий інтерес викликають люмінесцентні матеріали, які можуть використовуватися для створення плоскопанельних дисплеїв і мати високі люмінесцентні характеристики в тонкоплівковому вигляді. Одним із таких матеріалів є оксид ітрію  $Y_2O_3$ , який відрізняється відносно низькою собівартістю матеріалу при виготовленні плівок, порівняно з іншими. Крім того,  $Y_2O_3$  є ідеальною матрицею для введення трьохвалентних рідкісноземельних (РЗМ) іонів, оскільки вона не вимагає локальної хімічної компенсації заряду. Іони-активатори РЗМ, у сполуках на основі  $Y_2O_3$ , виявляють високу люмінесцентну активність і широко застосовуються в різних пристроях для візуалізації інформації.

У рамках даної дисертаційної роботи проведено комплексне дослідження, спрямоване на вивчення застосування методу високочастотного (ВЧ) іонно-плазмового розпилення для отримання тонкоплівкових зразків  $Y_2O_3:Eu$  в різних атмосферах. Основною метою було аналізувати фазовий склад отриманих плівок за допомогою рентгенофазового аналізу та розкрити причини розширення дифракційних смуг, пов'язаних з механічними напруженнями та атмосферою напилення. Застосування методу атомно-силової мікроскопії (АСМ) дозволило вивчити зміну морфології поверхні та розмірів кристалічних зерен тонких плівок  $Y_2O_3:Eu$  з різними концентраціями активатора. Отримані результати мають важливе значення для контролю структурних властивостей плівок і їхнього подальшого використання в оптичних пристроях. Розуміння механізмів, що лежать в основі формування структури та оптико-люмінесцентних властивостей тонких плівок  $Y_2O_3:Eu$ , відкриває перспективи для практичних рекомендацій з удосконалення та створення нових ефективних матеріалів для прозорої електроніки. З урахуванням унікальних структурних, люмінесцентних та оптичних властивостей цих плівок, можливість значно покращити фізико-технічні характеристики світлодіодних структур, оптичних пристроїв, електролюмінесцентних панелей та інших електронних пристроїв. Тому дисертаційна робота Кофлюк Ірини Миколаївни, присвячена особливостям формування структури та дослідженню оптико-люмінесцентних властивостей тонких плівок на основі оксиду ітрію, активованого іонами європію, є, безумовно, актуальною.

Завдання такого дослідження викладені дисертантом достатньо коректно:

1. одержати різними методами тонкі плівки  $Y_2O_3$ ,  $Sc_2O_3$ ,  $Y_2O_3:Eu$ ,  $Gd_2O_3:Eu$ ;
2. дослідити кристалічну структуру та морфологію поверхні отриманих тонких плівок;
3. дослідити оптичні властивості досліджуваних тонких плівок в області краю фундаментального поглинання в широкому температурному діапазоні;
4. здійснити використання теоретичної моделі сильно легованого або дефектного напівпровідника у квазікласичному наближенні для аналізу екситон-фононої взаємодії та енергетичних параметрів отриманих тонких плівок;

5. дослідити взаємозв'язок енергії та густини електронного струму збудження із спектральними та кінетичними характеристиками катодолюмінесценції тонких плівок  $Y_2O_3:Eu$ .

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами**

Дисертаційну роботу виконано згідно з основними напрямками досліджень кафедри фізичної та біомедичної електроніки Львівського національного університету імені Івана Франка. Автор брала участь, як виконавець, у науково-дослідній роботі, що фінансувалась із державного бюджету України: «Оптоелектронний пристрій для реєстрації клітинних об'єктів» (номер державної реєстрації N0112U001289) і «Розробка оптичного методу аналізу нанорозмірних об'єктів у біологічних рідинах та лікарських препаратах» (номер державної реєстрації N0119U002209).

### **Наукова новизна одержаних результатів**

У цьому дисертаційному дослідженні вперше отримані наступні результати. Зокрема, вперше було встановлено, що під час ВЧ іонно-плазмового розпилення тонких плівок  $Y_2O_3:Eu$  розподіл зерен відповідає мономодальному нормальному логарифмічному розподілу, в контраст до дискретного термічного випаровування, де він стає бімодальним через зрощування зерен. Досліджено вплив параметрів ВЧ установки і складу розпилювальної атмосфери на швидкість нанесення плівок, визначено оптимальний тиск і проведено аналіз результатів, використовуючи ефекти зворотного розсіювання, зворотної дифузії та механізму резонансної перезарядки. Також було досліджено формування полікристалічних плівок  $Y_2O_3:Eu$  під час ВЧ іонно-плазмового напилення в атмосфері аргону та кисню різного складу, що мають кубічну модифікацію, для яких подальша термообробка призводить до впорядкування структури і збільшення розмірів кристалітів. Ці результати є важливим внеском у розвиток наукових досліджень в галузі синтезу тонких плівок та можуть знайти практичне застосування в оптичних та електронних пристроях. Отримані результати дослідження також містять аналіз екситон-фононної взаємодії та дослідження спектрів свічення тонких плівок.

## **Наукове та практичне значення роботи**

Результати цього дослідження є надзвичайно важливими як з теоретичного, так і з практичного погляду. Вони стосуються синтезу полікристалічних люмінесцентних плівок, що формуються з нанокристалічних зерен, та дослідження їх структурних і оптичних властивостей. Дані результати мають важливе практичне застосування, оскільки вони визначають можливість використання тонких полікристалічних люмінесцентних оксидних плівок у різних галузях, включаючи оптичну електроніку та нанотехнології.

Додатково, отримані результати розширюють і доповнюють теоретичні та практичні аспекти наноматеріалознавства і можуть бути використані у навчальній та довідковій літературі, а також в навчальних дисциплінах, пов'язаних з тонкоплівковими технологіями і нанотехнологіями. Отримані результати є важливим внеском у розвиток наукових галузей, таких як нанотехнологія, тонкоплівкове матеріалознавство та оптоелектроніка, і можуть бути використані для подальших досліджень і практичних застосувань у створенні нових матеріалів та пристроїв.

Загалом, експериментальні та практичні результати цієї роботи мають велике значення для розвитку наукових досліджень у сфері синтезу тонких плівок та можуть бути використані для створення нових матеріалів і пристроїв з покращеними оптичними і люмінесцентними характеристиками.

## **Повнота викладення матеріалу дисертації у наукових публікаціях**

Результати дисертації Кофлюк І.М. “Формування структури та оптико-люмінесцентні властивості тонких плівок на основі оксиду ітрію, активованого іонами європію” відображено у публікаціях автора та апробовано на авторитетних наукових зібраннях. Всього за матеріалом дисертаційної роботи Кофлюк Ірини Миколаївни опубліковано 18 наукових праць, з яких 10 статей – у провідних фахових виданнях (з них 9 статей опубліковані в наукових виданнях, що включені до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, а ще 1 – опублікована у фаховому виданні України) та 8 тез доповідей представлених на міжнародних спеціалізованих наукових конференціях та семінарах.

## **Структура та зміст дисертації, її завершеність та відповідність встановленим вимогам**

Структура і зміст дисертаційного дослідження свідчать про те, що воно охоплює повний процес науково-дослідної роботи, який включає всі її етапи: від ідеї та розробки методології дослідження до аналізу отриманих результатів. Дисертаційну роботу представлено на 144 сторінках друкованого тексту за традиційною структурою, що включає перелік умовних скорочень, вступ, огляд літератури, опис матеріалів, умов і методів дослідження, результати дослідження та їх обговорення, аналіз і узагальнення результатів, висновки, список використаних джерел та 1 додаток. Робота також містить 10 таблиць і 52 рисунки, які сприяють кращому сприйняттю отриманих автором результатів. У переліку використаних джерел 181 найменування.

## **Ступінь наукової обґрунтованості результатів, сформульованих в роботі**

Для виконання та написання дисертації Кофлюк І.М. виконала детальний аналіз великої кількості зарубіжних наукових статей, пов'язаних з темою роботи, і значною мірою опиралася на сучасний стан досліджень за обраною темою. Текст дисертаційної роботи написано у логічний та послідовний спосіб, що відповідає всім вимогам наукового стилю. Для підтвердження об'єктивності представлених автором результатів теоретичних досліджень в роботі проводиться багато порівнянь з результатами інших дослідників, а також з власними експериментальними даними. Роботу виконано з використанням ряду сучасних методів досліджень, таких як метод атомно-силової мікроскопії для отримання зображення морфології досліджуваних тонких плівок та метод дифракції рентгенівських променів для дослідження структури отриманих плівок. Окрім того, в роботі детально описані установки за допомогою яких були здійснені оптико-люмінесцентні дослідження. Додана до роботи анотація наводить лише ті положення, що були повністю розкриті та обґрунтовані в основному тексті дисертації. Рукопис дисертації написаний з використанням адекватної фахової термінології та українською літературною мовою.

## **Структура і зміст дисертації (Характеристика основних положень роботи)**

Дисертаційна робота відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

Дисертаційна робота представляє собою 144 сторінки друкованого тексту, організовані відповідно до стандартної структури. До цієї структури входять: перелік умовних скорочень, вступ, огляд наукової літератури, представлення матеріалів, умов та методології дослідження, результати та обговорення дослідження, аналітика та резюмування висновків, а також список цитованих джерел і один додаток. В роботі також включено 10 таблиць і 52 ілюстрації. Список використаних джерел включає 181 позицію.

У вступі дисертантка обґрунтовує вибір теми дослідження, зазначаючи актуальність системного підходу, який стосується особливостей формування структури, оптичних та люмінесцентних характеристик тонких плівок на основі оксиду ітрію, активованого іонами європію. Дисертантка наголошує на важливості вибраних методів напилення та дослідження отриманих тонких плівок. Дисертантка наводить також теми проєктів кафедри фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка, що демонструє зв'язок дослідження з науковими програмами. Вона формулює мету та завдання дослідження, визначає об'єкт, предмет та методи дослідження, а також висвітлює наукову новизну, практичне значення, інформацію про особистий внесок, публікації та апробацію результатів, а також обсяг і структуру дисертації.

У розділі 1 дисертаційної роботи автор проводить детальний огляд літературних джерел, зосереджуючись на властивостях сполук, що містять оксид ітрію. Робиться аналіз їхньої кристалічної та електронної структури, особливостей процесів отримання та формування структур тонких плівок і наноструктур. Паралельно, досліджуються оптичні та люмінесцентні характеристики цих сполук, включаючи вивчення оптичних параметрів і спектрів поглинання, а також дослідження особливостей люмінесцентної активності.

Важливим аспектом розділу 1 є аналіз наукових робіт, що стосуються фотолюмінесценції, механізмів збудження в тонких плівках на основі оксиду ітрію, а також можливостей дослідження електролюмінесцентних властивостей цих плівок. Також проводиться огляд фундаментальних аспектів люмінесценції лантанідів, включаючи їхні безвипромінювальні та надчутливі переходи в електронних оболонках. Аналізуються механізми передачі енергії між рівнями енергії рідкісноземельних іонів, зокрема  $\text{Eu}^{3+}$  та  $\text{Tb}^{3+}$ , які виступають активаторами для наноструктур на основі оксиду ітрію. Результати цього

детального огляду літератури та аналізу допомагають викласти основу для подальших експериментальних досліджень, які розглядаються в інших розділах дисертації.

В розділі 2 дисертаційної роботи автор ретельно описує методику та обладнання, які використовувались для проведення експериментальних досліджень. Розділ складається з 6 пунктів і містить інформативні висновки.

Тут надається повний огляд використаних вихідних матеріалів та методів їхнього отримання, а також термічної обробки досліджуваних зразків. Наповнення розділу надає читачеві глибше розуміння процесу проведення досліджень, включаючи методику виготовлення тонких плівок на основі  $Y_2O_3$ , термічну обробку, аналіз структури та хімічного складу, дослідження морфології поверхні, крайового поглинання та люмінесцентних властивостей. Описується також обладнання, яке використовувалося для проведення досліджень, що сприяє кращому розумінню процесу проведення експериментів та методології досліджень.

В 3-му розділі зосереджено увагу на синтезі і дослідженні структури тонких плівок  $Y_2O_3:Eu$ . В даному розділі представлені результати експериментів, які охоплюють кілька аспектів. Спочатку розглянута залежність швидкості нанесення тонких плівок і яскравості катодолюмінесценції від концентрації активатора  $Eu^{3+}$ . Потім подано порівняльний аналіз тонких плівок, отриманих двома методами: ВЧ-розпиленням та дискретним випаровуванням. Далі розглянута структура та морфологія поверхні тонких плівок, одержаних ВЧ-розпиленням. Окрему увагу приділено зміні розмірів кристалітів, які утворюють досліджувані тонкі плівки, залежно від концентрації активатора. В кінці розділу подано висновки, які базуються на отриманих результатах досліджень.

У четвертому розділі дисертації розглядаються оптичні та люмінесцентні характеристики тонких плівок на основі  $Y_2O_3$ . Розділ поділений на чотири пункти, включаючи аналіз довгохвильового краю смуги фундаментального поглинання та використання моделі сильно легованого або дефектного напівпровідника для пояснення результатів. Також розглядається вплив складу атмосфери на густину станів та міжзонне поглинання світла у тонких плівках  $Y_2O_3:Eu^{3+}$ . Описано спектральні та кінетичні характеристики катодолюмінесценції для досліджуваних тонких плівок, включаючи аналіз кінетик розгоряння та загасання цього явища за різних умов збудження. Крім того, у розділі проводиться порівняння структурних характеристик, процесів

формування та спектрів катодолюмінесценції між двома ізоструктурними матрицями, а саме  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  та  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$ .

Висновки, які містяться у дисертації, відповідають поставленій меті та завданням, а також підкріплені експериментальним матеріалом. Особливо позитивним є той факт, що автор не лише чітко розкриває наукову новизну отриманих результатів і можливості їх практичного використання, але також вказує на перспективи подальших досліджень у більш широкому спектрі. Матеріали, які містяться у додатку, підтверджують практичне значення отриманих результатів.

### **Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків сформульованих у дисертації**

Щоб забезпечити всебічний аналіз та обговорення результатів, дисертантка використала наукові публікації як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. Виклад основного матеріалу дисертації є логічним та послідовним. Подані підсумки та висновки обґрунтовані великим масивом результатів і є об'єктивними, оскільки підтвердженні як теоретично, так і експериментально. Основний текст дисертації відповідає поставленим завданням та відзначається високою логічною структурою, що послідовно пов'язує всі пункти роботи. Авторка подала достатньо повну інформацію, що дозволяє чітко зрозуміти суть проведених досліджень та отриманих результатів. Розширений перелік апробацій результатів свідчить про практичну важливість та актуальність цих досліджень в обраній галузі, а також про широкий спектр застосувань отриманих знань. Список використаних літературних джерел і відповідні посилання в тексті дисертації виконані у відповідності з усіма вимогами та стандартами.

Суть дисертації повністю відображається в її змісті. В роботі немає тверджень, які не були б розкриті в тексті дисертації. Робота написана змістовно, використовуючи українську літературну мову, з дотриманням єдиного стилю викладення матеріалу. Аналіз роботи підтверджує, що поставлені завдання відповідають меті дослідження і його предмету



## Дискусійні положення й зауваження щодо змісту та оформлення дисертації

1. При дослідженні структури тонких плівок  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  було б доцільним порівняти їх з відомими результатами для монокристалічних зразків. Це дало б можливість більш узгоджено описати спектри люмінесценції отриманих тонких плівок з урахуванням їх кристалічної структури.
2. З наукових досліджень відомо, до активатор  $Eu$  може входити в структуру оксидних сполук одночасно в різних валентних станах, наприклад у вигляді іонів  $Eu^{2+}$  та  $Eu^{3+}$ . Враховуючи, що в роботі спектри катодолюмінесценції тонких плівок  $Y_2O_3:Eu$  проінтерпритовано в рамках моделі домішкового центру  $Eu^{3+}$ , було б доцільно обґрунтувати чи пояснити вибір саме такої моделі.
3. Враховуючи, що  $Y_2O_3:Eu$  є основою промислового катодолінофора КЛТ-1, для підкреслення практичної цінності отриманих тонких плівок  $Y_2O_3:Eu$  вартувало б навести порівняння, наприклад, їх інтенсивності свічення чи кінетичних характеристик відносно промислового зразка.
4. У тексті роботи зустрічаються деякі неточності технічного характеру:
  - не всі аббревіатури в тексті несуть розшифровку (ПЕМ, а СЕМ із “запізненням” на 5 сторінок, 28 →33);
  - деякі рисунки є дещо замалими і важко орієнтуватися у вказаній інформації під ними чи у тексті;
  - є граматичні описки.

Дані зауваження висловлюю автору дисертаційної роботи не в критичному плані, а як побажання на продовження розпочатих досліджень в майбутньому. Вище перелічені недоліки не зменшують наукову і практичну цінність досліджень, виконаних дисертантом.

## Відсутність порушень академічної доброчесності

Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі Кофлюк І.М. та її наукових публікаціях не виявлено.

## **Загальний висновок про відповідність роботи встановленим вимогам**

Аналіз дисертації та опублікованих праць дає підстави для висновку про те, що дослідження Кофлюк Ірини Миколаївни є завершеним, цілісним та самостійним. У дисертаційній роботі та наукових публікаціях дисертанта немає порушень академічної доброчесності. Вважаю, що дисертаційна робота Кофлюк Ірини Миколаївни «Формування структури та оптико-люмінесцентні властивості тонких плівок на основі оксиду ітрію, активованого іонами Європію» за змістом, рівнем наукової новизни, практичним значенням та характером висновків відповідає галузі знань 10 «Природничі науки», спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» та сучасним вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації», і затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а її автор – Кофлюк Ірина Миколаївна – заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

### **Офіційний опонент:**

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
завідувач відділу матеріалознавства  
Інституту фізичної оптики  
імені О.Г. Влоха МОН України

**Володимир АДАМІВ**