

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
Інституту монокристалів НАН України  
докторці технічних наук, старшій науковій  
співробітниці відділу нелінійно-оптичних  
кристалів Інституту монокристалів  
Національної академії наук України  
**БЕЗКРОВНИЙ Ользі Миколаївні**

**ВІДГУК**

офіційного опонента  
доктора технічних наук, професора,  
заступника директора з наукової роботи Інституту скінтіляційних матеріалів  
НАН України

**БОЯРИНЦЕВА Андрія Юрійовича**

на дисертацію **СІРИКА Юрія Вікторовича**

«Отримання люмінесцентних евтектичних композитів  
 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  методом ГСК для LED/LD джерел білого світла»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 132 Матеріалознавство,  
галузь знань 13 Механічна інженерія

**1. Актуальність обраної проблематики виконаної роботи та її зв'язок з науковими програмами, планами, темами**

У сучасній науці активно розробляються новітні джерела білого світла на основі лазерних діодів (LD) та потужних світлодіодів для широкого спектра застосувань — від систем освітлення до автомобільної оптики. Очікується, що такі технології освітлення справлять суттєвий соціально-економічний вплив. Лазерні діоди демонструють високу яскравість, що значно перевищує межі ефективної роботи світлодіодів, висока щільність випромінювання LD створює критичні теплові навантаження на фотоконвертери, що може спричинити їх деградацію, це стримує розвиток ефективних LD/LED-джерел білого світла. У зв'язку з цим, постає необхідність у створенні нових, більш термостабільних та радіаційно-стійких матеріалів для фотоконвертерів. Одним з найперспективніших рішень є застосування евтектичного композиту  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ , який вирізняється високою термічною стабільністю, збереженням механічних та оптичних властивостей за екстремальних умов.

Тема дисертаційної роботи органічно пов'язана з рядом державних науково-дослідних проєктів, зокрема:

«Фізико-технологічні основи створення люмінесцентних кристалічних композитів для потужних LED/LD джерел білого світла» (№ держреєстрації 0120U101754);

«Забезпечення розробки та дослідження властивостей евтектичних композитів з тугоплавких оксидів» (№ держреєстрації 0123U102743);

«Розроблення високоефективних люмінесцентних матеріалів для енергозберігаючих джерел білого світла та сцинтиляційної техніки» (№ держреєстрації 0117U007370, 2017–2018 рр.).

Це підтверджує наукову і прикладну значущість тематики дослідження у контексті розвитку сучасного матеріалознавства.

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

Наукові положення та висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, мають високий рівень обґрунтованості, що забезпечено всебічним аналізом науково-технічної та патентної інформації, чіткою постановкою мети й завдань дослідження, а також комплексним аналізом результатів з урахуванням наявних публікацій у відповідній галузі. У роботі застосовано сучасні експериментальні методи, які взаємно доповнюють одне одного, що дозволило досягти високої точності та відтворюваності результатів. Отримані висновки підтверджені їх практичним використанням у дослідницьких розробках Інституту монокристалів НАН України, що додатково підсилює їхню достовірність.

## **3. Оцінка змісту дисертації та її завершеності у цілому**

Дисертація Сірика Ю.В. є цілісною науковою працею, структура якої охоплює анотації українською та англійською мовами, вступ, п'ять змістовних розділів, загальні висновки, список використаних джерел та додатки.

У **вступі** викладено обґрунтування актуальності дослідження, сформульовано наукову новизну, практичне значення, мету й завдання роботи. Також представлено зв'язок дослідження з науковими темами, апробацію результатів і особистий внесок здобувача.

У **розділі 1** здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану розробки люмінесцентних матеріалів для конвертерів лазерного та світлодіодного випромінювання. Окреслено вимоги до фотоконвертерів, здатних працювати в умовах інтенсивного опромінення. Детально розглянуто структуру, властивості та технології отримання відомих конвертерів, зокрема монокристалів і керамік  $\text{YAG:Ce}$ . Показано переваги гетерофазних композитів типу  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG:Ce}$  над традиційними світлоконвертерами. На підставі критичного аналізу методів вирощування оксидних евтектик обґрунтовано вибір методу горизонтальної спрямованої кристалізації (ГСК) у відновному середовищі як перспективного способу отримання евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG:Ce}$ .

У **розділі 2** подано детальний опис отримання евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG:Ce}$  методом ГСК. Описано конструкцію ростової установки, параметри технологічного процесу, особливості формування зливків, а також підходи до контролю атмосферних умов у робочій камері. Окрему увагу приділено підготовці зразків для аналізу структурно-фазового стану, механічних, оптичних, люмінесцентних та світлотехнічних характеристик евтектичних композитів.

**Розділ 3** присвячено аналізу закономірностей утворення мікроструктури залежно від швидкості вирощування та концентрації іонів  $\text{Ce}^{3+}$ . Встановлено, що кристалізація розплаву  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  з дотриманням оптимальних параметрів перегріву, температурного градієнта та швидкості кристалізації дозволяє отримати евтектику з мікроструктурою типу "китайське письмо". Залежність евтектичного інтервалу ( $\lambda_{\text{eut}}$ ) від швидкості кристалізації ( $V$ ) для недопованої евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  відхиляється від класичної моделі Джексона-Ханта. Крім того, виявлено немонотонний характер залежності параметрів мікроструктури евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  від швидкості кристалізації.

У **розділі 4** досліджено механічні характеристики композиту та вплив на них значень характерного евтектичного інтервалу, концентрації домішки  $\text{Ce}$  та високотемпературного відпалу. Встановлено, що зменшення  $\lambda_{\text{eut}}$  підвищує мікротвердість і тріщиностійкість, а збільшення концентрації  $\text{Ce}^{3+}$  знижує ці характеристики. Показано, що відпал у вакуумі за  $1700^\circ\text{C}$  має позитивний ефект на механічні характеристики евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ .

У **розділі 5** проаналізовано оптичні та люмінесцентні характеристики залежно від морфології, орієнтації зразка та термічної обробки, представлено результати дослідження ефективності світловіддачі у зразках різної товщини, вплив розміру мікроструктури, високотемпературного відпалу та концентрації іонів  $\text{Ce}^{3+}$  на світлотехнічні параметри евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ . Продемонстровано переваги конвертерів на основі евтектичних композитів у порівнянні з монокристалічними  $\text{YAG}:\text{Ce}$ . Результати роботи були апробовані у рамках створення експериментальних моделей LED/LD-білих джерел світла.

У загальних **висновках** представлено основні наукові результати роботи, відображено ступінь досягнення поставленої мети та розв'язання визначених завдань. Сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження результатів у методи виготовлення фотоконвертерів на основі евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ .

#### **4. Наукова новизна та достовірність наукових положень, обґрунтованих за результатами**

У роботі отримано низку нових наукових результатів, які мають суттєве значення для розуміння закономірностей формування структурно-фазового стану евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  їх впливу на механічні, оптичні, люмінесцентні характеристики евтектичних композитів та світлотехнічні параметри конвертерів на їх основі. Серед них:

- визначено оптимальні умови кристалізації, що забезпечують однорідну мікроструктуру типу «китайське письмо» без появи побічних церійвмісних фаз;
- встановлено відхилення залежності  $\lambda_{\text{eut}}(V)$  від моделі Джексона–Ханта евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  отриманих методом ГСК;
- виявлено немонотонну зміну параметрів мікроструктури евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  при зміні швидкості кристалізації;

- обґрунтовано вплив високотемпературного відпалу на покращення механічних характеристик композиту;
- доведено, що евтектичний композит є ефективним розсіювальним та середовищем із індикатрисою яка близька до ламбертівської;
- встановлено, що абсолютна ефективність конвертерів на базі евтектичного композита  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  удвічі перевищує аналогічний показник для монокристалів  $\text{YAG}:\text{Ce}$ .

## **5. Значення отриманих дослідницьких результатів для науки і практики освітньої діяльності**

У результаті дослідження було оптимізовано умови отримання високоякісних евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  з контрольованими властивостями методом ГСК. Вдосконалено метод хорд для аналізу мікроструктури, розроблене відповідне програмне забезпечення. Встановлено режими відпалу, які дозволяють суттєво поліпшити функціональні характеристики конвертерів. На основі отриманих результатів виготовлено фотоконвертери з наступними параметрами: світловіддача до 234 лм/Вт, колірна температура 4200–6500 К, індекс кольоропередачі 60–72 %, з хроматичними координатами, розташованими в центрі діаграми CIE 1931. Матеріали дослідження інтегровані до програми підготовки доктора філософії "Наукові основи технологій вирощування монокристалів", що викладається в Інституті монокристалів НАН України.

## **6. Повнота висвітлення основних наукових результатів у публікаціях**

Результати досліджень, що становлять основу дисертаційної роботи, опубліковані у 17 наукових працях. Серед них — 4 публікації у зарубіжних фахових виданнях, з яких 3 в міжнародних фахових наукових журналах Q1 та Q2, 2 статті у вітчизняних рецензованих журналах та 11 тез доповідей на міжнародних і українських конференціях.

## **7. Відсутність (наявність) порушень академічної доброчесності**

Аналіз дисертації та пов'язаних із нею публікацій СІРИКА Юрія Вікторовича свідчить про дотримання академічної доброчесності. Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. За результатами перевірки системою StrikePlagiarism коефіцієнт подібності КП1 становить 2,13 %, що відповідає вимогам щодо оригінальності дисертаційних робіт.

## **8. Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.**

- Було б корисно побачити графічні залежності  $\lambda_{\text{eut}}(V)$  для різних концентрацій Ce і перевірити узгодженість із моделлю Джексона–Ханта та результатами інших дослідників;

- Поява церійвмісних фаз потрібно конкретизувати умови, Яким чином отримано евтектичний композит (без додаткових церійвмісних фаз) при таких високих концентраціях Се (4 ат.%)? В пункті 3.5.3 вказано що «концентрація Се 0,25 ат.% є критичною, після якої розпочинається активне утворення фази, збагаченої Се»;
- Які ще є механізми утворення метастабільної евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAP}$  в системі  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$  окрім вказаного в пункті 3.7, чи є практичне застосування евтектичного композита  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  отриманого шляхом перетворення YAP в YAG ( при  $T > 1700^\circ\text{C}$ ) в композиті  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAP}$ , одержаного при перегріві розплаву евтектичного складу вище  $100^\circ\text{C}$  від  $T_E$  та чи проводились спроби отримати так композит  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG:Ce}$ ;
- Поточна структура розділу 3 дещо порушує логічну послідовність викладу, що ускладнює сприйняття зв'язку між початковими умовами вирощування та отриманою мікроструктурою евтектичних композитів. Зокрема, підпункт 3.6 «Вплив початкових умов кристалізації на морфологію та дефектну структуру евтектик» логічно продовжує п. 3.1 «Фазовий склад та дефектна структура евтектичних композитів», і тому має з'явитися безпосередньо після нього;
- Які фізичні механізми, на Вашу думку, лежать в основі істотного підвищення мікротвердості та тріщиностійкості після високотемпературного відпалу у вакуумі? Чому саме вакуумне середовище при температурі  $1700^\circ\text{C}$  виявилось найбільш ефективним для покращення механічних характеристик  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG:Ce}$  в порівнянні з іншими атмосферами (наприклад, окисним або відновними);
- В пункті 4.5 вказано що існує орієнтаційна залежність мікротвердості у зразках недопованої евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  та її відсутність у допованих  $\text{Ce}^{3+}$  зразках, якими чинниками, на Вашу думку це обумовлено?
- Поясніть чому інтенсивність люмінесценції аналогічних евтектичних та монокристалічних зразків різниться майже у 7 разів (пункт 5.3), тоді як ефективність фотоконвертерів на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG:Ce}$  вдвічі перевищує ефективність кристалічних конвертерів?
- Як Ви пояснюєте зростання інтенсивності люмінесценції на  $\sim 15\%$  після високотемпературного відпалу в окислювальному середовищі?
- В пункті 5.3.3 не вказано мотивацію дослідження «впливу відпалу на електронні рівні в іоні  $\text{Ce}^{3+}$  в ґратці YAG»;
- В пункті 5.5 не зазначено розмір оптимізованого конвертера, що є важливим;

- У тексті дисертації присутні поодинокі орфографічні та пунктуаційні помилки, які, втім, не впливають принципово на розуміння змісту й наукову якість роботи.

Варто зазначити, що висловлені зауваження та питання мають уточнювальний або редакційний характер і не впливають принципово на зміст, наукову новизну, достовірність отриманих результатів та їх практичну цінність. Дисертація є актуальною, вирішує важливе науково-прикладне завдання та має високу наукову і практичну значимість.

## 9. Загальний висновок.

Дисертація СІРИКА Юрія Вікторовича «Отримання люмінесцентних евтектичних композитів  $Al_2O_3/YAG:Ce$  методом ГСК для LED/LD джерел білого світла» представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство», галузь знань 13 – «Механічна інженерія» є завершеним і самостійним науковим дослідженням із достатньою науковою новизною та практичною значущістю отриманих результатів. Зміст повністю відповідає темі, що дозволяє реалізувати поставлену мету та вирішити всі завдання дослідження. Наведені зауваження не знижують значущості наукових і практичних висновків і не впливають на позитивну загальну оцінку. Дисертація відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішень разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а здобувач СІРИК Юрій Вікторович заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство».

### Офіційний рецензент:

доктор технічних наук, професор,  
заступник директора з наукової роботи  
Інституту сцинтиляційних матеріалів  
НАН України

 Андрій БОЯРИНЦЕВ

“ 25 ” 07 2025 р.

Підпис засвідчую:

PhD Головний Інженер ІСМА НАН України



 Сергій КОВАЛЬЧУК