

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, член-кореспондента НАН України, професора,  
завідувача кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової  
металургії Навчально-наукового інституту матеріалознавства та  
зварювання імені Є.О. Патона  
КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**БОГОМОЛА Юрія Івановича**

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**

Зараз активно розробляються нові джерела білого світла на основі лазерних та потужних світлодіодів для різноманітних застосувань, таких як автомобільні фари, освітлення аеропортів, проєктори тощо. Лазерні діоди (LD) є надзвичайно перспективними для створення над яскравих джерел світла. Яскравість джерел на базі LD у понад 100 разів перевищує найяскравіші LED. Однак, висока щільність потужності LD створює великі теплові навантаження на матеріали фосфорів-конвертерів і може призводити до насичення люмінесценції та деградації фотоконвертерів. Крім того, сфокусований лазерний промінь вимагає сильного розсіювання світла конвертером для забезпечення ефективності та однорідності. Сучасні матеріали конвертерів недостатньо стійкі до впливу високих температур, що обмежує розвиток високопотужних джерел білого світла. Це створює гостру потребу в розробці нових матеріалів для фотоконвертерів.

Серед найбільш перспективних та популярних матеріалів наразі розглядається евтектика оксиду алюмінію та ітрій-алюмінієвого гранату  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  завдяки високим показникам термостабільності, що дозволяє

зберігає основні функціональні характеристики (світлотехнічні та механічні) до надвисоких температур.

Актуальність тематики дисертаційної роботи підтверджується її тісним взаємозв'язком із пріоритетними напрямками науково-дослідних проєктів, що виконувались за підтримки Міністерства освіти і науки України, зокрема —

- 1) «Фізико-технологічні основи створення люмінесцентних кристалічних композитів для потужних LED/LD джерел білого світла» (№ держреєстрації 0120U101754);
- 2) «Забезпечення розробки та дослідження властивостей евтектичних композитів з тугоплавких оксидів» (№ держреєстрації 0123U102743);
- 3) «Розроблення високоефективних люмінесцентних матеріалів для енергозберігаючих джерел білого світла та сцинтиляційної техніки» 2017-2018 рр. (№ держреєстрації 0117U007370).

Це підкреслює важливість обраного напрямку досліджень як з наукової, так і з практичної точки зору для подальшого розвитку сучасних технологій.

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

Положення та висновки дисертаційної роботи обґрунтовані як з наукової, так і з практичної точок зору. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій є достатньо високим, базуючись на ретельному аналізі наукової та патентної літератури, чіткому обґрунтуванні мети та завдань дослідження, співставленні та критичному аналізі отриманих результатів у порівнянні з даними інших дослідників. Це також забезпечується використанням сучасних, взаємодоповнюючих методів досліджень, відтворюваністю та взаємо узгодженістю результатів, а також їх відповідністю відомим науковим даним. Додатково, обґрунтованість отриманих наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується їхнім застосуванням в Інституті монокристалів НАН України.

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

Дисертаційна робота Сірик Ю.В. представляє завершену наукову працю, яка складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, висвітлено її наукову новизну та практичну значущість, сформульовано мету роботи та окреслено коло наукових завдань, необхідних для її досягнення. Наведено інформацію про зв'язок дисертації з плановими науково-дослідними темами, подано відомості щодо апробації



основних результатів роботи, а також зазначено особистий внесок здобувача у виконання дослідження та публікацію наукових матеріалів.

У першому розділі проведено аналітичний огляд науково-технічної літератури, присвяченої сучасним підходам до розроблення люмінесцентних матеріалів для фотоконвертерів, що працюють під дією потужного лазерного та світлодіодного випромінювання. Систематизовано основні вимоги до люмінесцентних, фізико-механічних та теплофізичних характеристик матеріалів, придатних для використання у твердотільних джерелах білого світла. На підставі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність дослідження гетерофазних евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  як перспективного класу матеріалів для створення ефективних фотоконвертерів у LED/LD-джерелах.

Визначено метод горизонтально спрямованої кристалізації у відновлювальному захисному середовищі як найбільш придатну технологію отримання зливків евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ . Сформульовано перелік наукових завдань, що потребують вирішення для встановлення оптимальних умов одержання композиту з заданими морфологічними, механічними та люмінесцентними характеристиками, а також для визначення і подальшої оптимізації світлотехнічних параметрів фотоконвертерів на його основі.

У другому розділі дисертації детально описано експериментальні методики, обладнання та матеріали, використані для отримання евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ . Зокрема, висвітлено процес отримання шихти та зливків, а також параметри кристалізації (швидкість, температурний градієнт, температура перегріву розплаву та швидкість охолодження). Також представлено опис процесу виготовлення зразків, методів аналізу та дослідження структурно-фазового стану, механічних, оптичних, люмінесцентних та світлотехнічних характеристик евтектичних композитів.

У третьому розділі дисертації проаналізовано вплив умов кристалізації на формування фазового складу та морфології евтектик  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  з різним вмістом церію. Встановлено, що при контрольованій кристалізації розплаву евтектичного складу, з дотриманням оптимальних параметрів перегріву, температурного градієнта та швидкості кристалізації, можливо отримати евтектику  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  з мікроструктурою типу "китайське письмо". Також виявлено, що залежність евтектичного інтервалу від швидкості кристалізації для недопованої евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$  відхиляється від теоретичної моделі Джексона-Ханта. Додатково, було виявлено немонотонну залежність параметрів мікроструктури евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  від швидкості кристалізації.

Четвертий розділ дисертації присвячений детальному аналізу механічних характеристик евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ .



Дослідження показали, що зменшення евтектичного інтервалу в 4 рази призводить до значного покращення механічних властивостей: мікротвердість зростає на 16,5%, а тріщиностійкість – на 13,5%. Однак, підвищення концентрації церію до 0,5 ат.% в початковій сировині призводить до зниження мікротвердості на 27% та коефіцієнта тріщиностійкості майже на 42%. Важливо відзначити, що високотемпературний відпал  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  у вакуумі значно покращує механічні властивості, збільшуючи мікротвердість на 40% та тріщиностійкість на 72%.

У п'ятому розділі представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень оптичних і люмінесцентних властивостей евтектик  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ , а також світлотехнічних характеристик фотоконвертерів на їх основі. Було проведено теоретичну та експериментальну оцінку абсолютної ефективності конвертера з монокристала  $\text{YAG}:\text{Ce}$  та евтектичного композита  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ . Встановлено вплив мікроструктури, вмісту церію, орієнтації зразка (відповідно до напрямку кристалізації) та відпалу на оптичні та люмінесцентні характеристики евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ , а також на світлотехнічні властивості фотоконвертерів на їх основі.

Висновки до всіх розділів та за результатами дисертаційної роботи сформульовані чітко та ґрунтовно, повністю відображаючи результати проведених досліджень, і демонструють наукову новизну та практичне значення роботи.

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

Дисертаційна робота, присвячена комплексному вирішенню науково-прикладної задачі вивчення умов отримання та закономірностей формування структурно-фазового стану евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ , а також їхнього впливу на механічні, оптичні, люмінесцентні характеристики та світлотехнічні параметри конвертерів на їх основі, дозволила досягти наступних важливих наукових результатів:

- було встановлено оптимальні температурно-кінетичні умови вирощування евтектичного композиту  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  методом горизонтальної спрямованої кристалізації у відновлювальній атмосфері ( $\text{Ar} + (\text{CO}, \text{H}_2)$ ) з використанням шихти, що містить до 4 ат. % церію. Це забезпечило формування однорідної мікроструктури типу «китайське письмо» з контрольованою евтектичною відстанню ( $\lambda_{\text{eut}}$ ) у діапазоні 8,6–72,4 мкм, при цьому без утворення додаткових церійвмісних фаз.

- виявлено відхилення залежності  $\lambda_{\text{cut}}(V)$  для евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}$ , отриманої методом горизонтальної спрямованої кристалізації, від класичної моделі Джексона–Ханта.
- Вперше виявлено немонотонну залежність мікроструктурних параметрів евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  від швидкості кристалізації, що є критично важливим для забезпечення стабільних оптичних та механічних характеристик.
- На підставі експериментальних випробувань встановлено вплив режимів відпалу на механічні властивості евтектичного композиту  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ .
- Вперше показано, що евтектичний композит  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  є оптичним середовищем з лінійною залежністю оптичного пропускання від  $\lambda_{\text{cut}}$  у діапазоні довжин хвиль 400–1100 нм, а індикатриса пружного розсіяння світла в евтектичному композиті наближена до ламбертівського розподілу.
- встановлено, що абсолютна ефективність фотоконверсії в конвертерах на основі евтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  приблизно вдвічі перевищує відповідний показник для монокристалічних фотоконвертерів на основі  $\text{YAG}:\text{Ce}$ .

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

У результаті дослідження було оптимізовано умови отримання евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$  методом горизонтальної спрямованої кристалізації у відновному вуглецевмісному середовищі. Це відкриває перспективу використання даного методу для промислового виробництва люмінесцентних фотоконвертерів для LED/LD джерел білого світла. Для точного аналізу мікроструктури евтектик було модифіковано метод хорд та розроблено спеціалізоване програмне забезпечення. Встановлено оптимальні умови відпалу, що дозволяють значно покращити механічні, оптичні, люмінесцентні характеристики евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ , а також світлотехнічні параметри фотоконвертерів на їх основі. На підставі отриманих результатів були виготовлені люмінесцентні фотоконвертери на основі евтектичних композитів  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}:\text{Ce}$ . Ці конвертери забезпечують загальний світловий потік з хроматичними координатами, розташованими в центрі діаграми CIE 1931, корельованою кольорною температурою в діапазоні від 4200 К до 6500 К, індексом кольоропередачі 60-72% та вражаючою світловіддачею до 234 лм/ват при опроміненні світлом з довжиною хвилі  $\lambda=455$  нм. Усі отримані результати та розроблені методи вже інтегровані в навчальну програму підготовки



доктора філософії "Наукові основи технологій вирощування монокристалів", що викладається в Інституті монокристалів НАН України.

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

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 17 наукових роботах. З них – 4 публікації у закордонних фахових виданнях (3 публікації в міжнародних фахових наукових журналах Q1 та Q2) та 2 у вітчизняних фахових наукових журналах, 11 тез доповідей на українських та міжнародних наукових конференцій.

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

За результатами аналізу дисертації та публікацій здобувача СІРИКА Юрія Вікторовича порушень академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації тексту у роботі відсутні. Коефіцієнт подібності тексту КП1 згідно з протоколом антиплагіатної перевірки дисертації на платформі StrikePlagiarism, становить 2,13 %.

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

1. По тексту дисертаційної роботи спостерігається певна кількість орфографічних і граматичних помилок
2. У Розділі 2 автор описує отримання таблеток з суміші порошків під час пресування при 40 МПа. Чи використовувався при цьому якийсь пластифікатор? Якщо так, то який?
3. Яким чином автор контролював температурний градієнт під час вирощування евтектичних композитів? Чи є можливість його зміни за даною методикою?
4. У підрозділі 3.3 автор вказує на різницю у величині евтектичного інтервалу у евтектичних композитах вздовж і впоперек до напрямку вирощування. Чим можна пояснити такий ефект?
5. Під час допущення евтектичних композитів церієм, чи не досліджував автор, в яких саме структурних складових композиту він локалізувався? І яка при цьому була його концентрація?
6. Вважаю, що було б доцільно провести випробування на міцність отриманих композитів, а також її залежності від швидкості вирощування.

Проте, висловлені зауваження не знижують високого наукового рівня представленої роботи і не носять принципового характеру.

## **9. Загальний висновок.**

Дисертація 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» представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство», галузь знань 13 – «Механічна інженерія», є цілісним та завершеним самостійним науковим дослідженням, що демонструє достатню наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Зміст роботи повністю відповідає обраній темі, забезпечуючи досягнення поставленої мети та вирішення всіх завдань дослідження. Наведені зауваження до представленої роботи не зменшують значущості здобутих наукових і практичних результатів і не впливають на позитивну загальну оцінку. Дисертація цілком 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 опонент:**

доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, професор, завідувач кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона КІП ім. Ігоря Сікорського.



Ю. І. Богомол

“30” липня 2025 р.

Підпис д.т.н., професора,  
Богомола Ю.І. засвідчую:

