

Голові разової спеціалізованої
вченої ради Інституту
монокристалів НАН України,
доктору технічних наук, старшій
науковій співробітниці Інституту
монокристалів НАН України
Безкровній Ользі Миколаївні

ВІДГУК

Офіційного опонента, професора кафедри хімії та інтегрованих технологій
Харківського національного університету міського господарства
імені О.М. Бекетова, доктора технічних наук, професора
Саввової Оксани Вікторівни
на дисертацію Тимошенка Арсенія Дмитровича
**«Закономірності формування та структурно-фазовий стан
високолегованої оптичної кераміки YAG:Sm³⁺»**,
подану до захисту у разову спеціалізовану вчену раду Інституту
монокристалів Національної академії наук України на здобуття наукового
ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»
з галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Актуальність теми дисертації.

Важливою задачею підвищення потужності традиційних лазерних систем є створення нових видів оптичних матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками. Напрямок досліджень наукової роботи вирішує нагальні потреби держави у розробці конкурентоздатних високотехнологічних оптичних матеріалів та відповідає Пріоритетній

тематиці, затвердженій наказом МОН України №1104 від 07.09.2023 р. за п. 4 та п. 6 «Створення радіолокаційних, оптично-електронних, звукометричних, сейсмічних, магнітометричних та гідроакустичних комплексів розвідки та дальнього виявлення гіперзвукових, балістичних та зенітних ракет для покращення ефективності існуючих засобів розвідки», «Розроблення безпілотних літальних апаратів, в тому числі систем управління при ройовому застосуванні з метою покращення дальності та ефективності ураження цілей безпілотними комплексами».

Одним з найперспективніших методів підвищення потужності традиційних лазерних систем, які відрізняються збільшеними розмірами, споживаної потужності такого лазера є використання активних середовищ з супресором на основі прозорої кераміка $YAG:Sm^{3+}$, яка відрізняється придушенням паразитних коливань у потужних лазерах $YAG:Nd^{3+}$.

На сьогодні розробка високолегованої прозорої кераміка $YAG:Sm^{3+}$ обмежується невизначеністю особливостей спікання такої кераміки. Також питання щодо впливу концентрації іонів Sm^{3+} на еволюцію мікроструктури та оптичні властивості кераміки $YAG:Sm^{3+}$ залишаються відкритими. У зв'язку з цим визначення закономірностей формування високолегованої оптичної кераміки $YAG:Sm^{3+}$ є актуальним науково-технічним завданням, на вирішення якого спрямована дана дисертаційна робота.

Підтвердженням актуальності дисертаційної роботи є й те, що здобувач проводив дослідження у відповідності з цільовими науковими програмами Відділення ФТПМ НАН України «Фундаментальні проблеми створення матеріалів з наперед заданими властивостями, методів їх з'єднання і обробки» за темою «Наукові основи технології отримання лазерних керамічних композитів для створення сучасних малогабаритних джерел випромінювання» (2017-2021 р.р. № держреєстрації 0112U000777); Конкурсу НФДУ «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» за темою «Новітні та традиційні ІЧ-прозорі кераміки складної архітектури для екстремальних умов експлуатації» (2020-2022 р.р. № держреєстрації 2020.02/0293); програми Підтримка

пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України за темою «Розробка нового покоління лазерної кераміки YAG:Nd для потужних лазерних джерел спеціального призначення» (2020-2021 р.р. № держреєстрації 0116U008004с); проекту доступу до Центрально-європейської науково-дослідницької інфраструктури (CERIC) CERIC-ERIC Project No. 20202040 “Structural and compositional homogeneity of transparent ceramics YAG:Sm on micro- and nano-scale”, 2020.

Наукова новизна і практичне значення отриманих результатів досліджень.

Нові наукові результати, одержані в процесі виконання роботи, відображають особливості формування структури оптичної кераміки YAG:Sm³⁺ (5 ат.%), що виключають аномальний ріст зерен під час консолідації та забезпечує ефективне видалення залишкових пор по розвиненій системі міжзеренних меж з характерним розміром кристалітів близько 20 мкм. Встановлено, що сумісне легування оптичної кераміки YAG, YAG:Sm³⁺ (3 ат.%) неізовалентними домішками Si⁴⁺+Mg²⁺ у співвідношенні C_{Si}/C_{Mg}=1,6 активує процеси протидифузії, а також сприяє ефективному ущільненню за рахунок формування дефектів в катіонній підгратці, що контролюють дифузійні процеси в сполуках зі структурою гранату

Для практичного використання оптимізовано склад та визначено основні фізико-технологічні параметри синтезу монофазної високолегованої оптичної кераміки YAG:Sm³⁺ (9 ат.%) методом реакційного спікання із рекордним значенням коефіцієнту оптичного поглинання $\alpha \approx 4,5 \text{ см}^{-1}$ на довжині хвилі 1064 нм, відносною щільністю вище 99,9 % та середнім розміром зерен близько 20 мкм для поглиначів паразитного випромінювання неодимових лазерів. Визначено кількісний вміст комплексної домішки Si⁴⁺+Mg²⁺, що сприяє спіканню (0,071 ат. % Si⁴⁺, 0,044 ат. % Mg²⁺), який забезпечує зниження оптичних втрат кераміки YAG:Sm³⁺ у три рази у порівнянні із такою, отриманою з традиційною домішкою Si⁴⁺.

Соціально-економічний ефект від впровадження високолегованої оптичної кераміки $YAG:Sm^{3+}$ полягає у підвищенні потужності лазерних систем, забезпечення їх мобільності, зниженні їх вартості при порівнянні з монокристалічними аналогами.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Достовірність наукових результатів, представлених в дисертаційній роботі здобувача, ґрунтується на використанні комплексу сучасних взаємодоповнюючих методів досліджень та високоточного обладнання. Основні закономірності досліджених процесів добре узгоджуються з літературними даними. Достовірність одержаних результатів підтверджується також їх відтворюваністю, взаємною узгодженістю та позитивними висновками при виконанні господарчих договорів та науково-дослідних робіт.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результатами проведеної роботи були висвітлені у 7 наукових публікаціях, з них: 3 фахових наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз та 4 тез доповідей наукових конференцій.

Аналіз та оцінка змісту дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку літературних джерел та 3 додатків. Загальний об'єм роботи складає 133 сторінки, містить 62 рисунки, 7 таблиць, 101 посилання на літературні джерела та 3 додатки.

Вступ дає чітке обґрунтування актуальності теми дисертації, мети і завдань дослідження, наукової новизни і практичної цінності отриманих результатів, розкриває зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, об'єм апробації результатів та особистий внесок здобувача в процес дослідження.

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної та патентної літератури з питань перспективності використання $YAG:Sm^{3+}$ в якості поглинача вимушеної спонтанного випромінювання $YAG:Nd^{3+}$ лазерів.

Розглянуто фізичні принципи отримання кераміки YAG методом твердофазного реакційного спікання. Описано закономірності формування структури та вплив домішок, що сприяють спіканню, на структуру та властивості оптичної кераміки ітрій-алюмінієвого гранату. Наведені висновки аналітичного огляду сучасних тенденцій щодо визначення закономірностей формування фазового складу, структури, оптичних властивостей високолегованої оптичної кераміки ітрій-алюмінієвого гранату дозволили сформулювати мету дисертаційної роботи.

У **другому розділі** наведено методи досліджень, які включають методи отримання та методи вивчення структури та властивостей кераміки YAG:Sm³⁺. Особливо цінним є застосування сучасних практичних та теоретичних досліджень, щодо вивчення параметрів кристалічної структури та мікроструктури кераміки, визначення фізико-механічних властивостей оптичних та люмінесцентних властивостей кераміки.

Третій розділ присвячено дослідженню особливості спікання високолегованої оптичної кераміки YAG:Sm³⁺, впливу температури консолідації на формування мікроструктури кераміки YAG:Sm³⁺

Досліджено вплив умов консолідації на оптичні властивості та структурно-фазовий стан кераміки YAG:Sm³⁺ (5 ат. %). Оптимізовано базовий підхід та визначено фізико-технологічні параметри синтезу оптичної кераміки YAG:Sm³⁺ методом реакційного спікання у вакуумі, що забезпечують одержання прозорої кераміки оптичної якості. Показано що, температура консолідації 1700°C не забезпечує достатньої енергії активації процесів ущільнення та видалення пор. Встановлено оптимальні умови консолідації (1725 °C), що забезпечують повне видалення пор та формування кераміки YAG:Sm³⁺ (5 ат.%) з оптичними втратами 0,08 см⁻¹ на довжині хвилі 808 нм, середнім розміром зерен ≈ 20 мкм та коефіцієнтом оптичного поглинання α≈ 2,25 см⁻¹ на довжині хвилі 1064 нм (T=1725 °C, 10 годин), що перевищує значення відомі з літератури.

Значна увага в розділі приділяється застосуванню спеціальних розрахункових методик спектру оптичного пропускання елементу $\text{YAG:Sm}^{3+}/\text{YAG:Nd}^{3+}/\text{YAG:Sm}^{3+}$ без втрат на інтерфейсах з'єднання.

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу концентрації іонів Sm^{3+} на особливості процесів ущільнення високолегованої кераміки YAG:Sm^{3+} а також визначенню її оптичних властивостей.

Визначено умови отримання монофазної кераміки YAG:Sm^{3+} з вмістом іонів самарію до 9 ат.%. Показано, що збільшення вмісту іонів Sm^{3+} від 3 до 15 ат.% призводить до зменшення середнього розміру зерна кераміки від 24 до 18 мкм за рахунок деформації кристалічної решітки кераміки при введенні більших іонів самарію в підгратку ітрію. Виявлено, що оптичні втрати при 808 нм у діапазоні легування Sm^{3+} 3–9 ат.% становлять від 0,04 до 0,09 см^{-1} , тоді як для вищої концентрації Sm^{3+} (11 та 15 ат.%) оптичні втрати збільшуються до 0,19 см^{-1} за рахунок утворення вторинних фаз і залишкових пор. Встановлено, що монофазна високолегована кераміка YAG:Sm^{3+} (9 ат.%) має рекордні значення коефіцієнта оптичного поглинання $\alpha_{1064\text{нм}}=4,5 \text{ см}^{-1}$ і оптичні втрати $\alpha_{808\text{нм}}=0,07 \text{ см}^{-1}$.

У п'ятому розділі встановлено вплив комплексної домішки $\text{Si}^{4+}+\text{Mg}^{2+}$ на особливості консолідації, формування мікроструктури та оптичні властивості кераміки YAG , YAG:Sm^{3+} . Визначено, що найвищий коефіцієнт пропускання $T=82,5\%$ у досліджуваному діапазоні концентрацій був досягнутий у зразку, легovanому 0,071 ат.% Si^{4+} + 0,04 ат.% Mg^{2+} ($C_{\text{Si}}/C_{\text{Mg}}=1,6$). Залежність розміру зерна від концентрації кожної добавки в кераміці $\text{YAG} (\text{Si}^{4+},\text{Mg}^{2+})$ не корелює з аналогічними залежностями в кераміці, легованої однокомпонентною домішкою, що сприяє спіканню. Встановлено, що збільшення концентрації добавки призвело до збільшення розміру зерна в кераміці $\text{YAG} (\text{Mg}^{2+})$; в $\text{YAG} (\text{Si}^{4+},\text{Mg}^{2+})$ спостерігається зменшення розміру зерна зі збільшенням концентрації іонів Mg^{2+} (відповідно до зменшення співвідношення $C_{\text{Si}}/C_{\text{Mg}}$).

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 101 найменування.

При ознайомленні з дисертацією виникли наступні запитання та загальні зауваження.

1. В практичній значимості бажано вказати соціально економічний ефект розробки.

2. У розділі 1 бажано навести технологічні параметри синтезу оптичної кераміки YAG, переваги та недоліки технології та розширити висновки за першим розділом стосовно впливу добавок Mg^{2+} та Si^{4+} на структуру та властивості оптичної кераміки YAG?

3. У другому розділі для обґрунтування вибору напрямку методології дослідження важливим є формулювання робочої гіпотези.

4. Обґрунтуйте вибір технологічних параметрів при компактуванні сумішей нанопорошків та консолідації прозорої кераміки YAG:Sm³⁺.

5. У третьому розділі бажано сформулювати вимоги до високолегованої кераміки YAG:Sm³⁺ (коефіцієнт оптичного поглинання при 1064 нм оптичні втрати при 808 нм тощо) для застосування як супресора для придушення паразитних коливань YAG:Nd³⁺ лазерів.

6. Проаналізуйте зміну інтенсивності дифракційних піків YAG:Sm³⁺.в залежності різних концентрацій іонів Sm³⁺ 3-15 ат.%(рис. 4.2).

7. Яким чином визначали модуль Юнга кераміки для розрахунку в'язкості руйнування?

8. Яке значення мають результати наукової роботи для забезпечення освітньої діяльності за ОНП.

Загальна оцінка дисертації.

Дисертаційна робота Тимошенко Арсенія Дмитровича є закінченою кваліфікаційною науково-дослідною роботою, яка вирішує науково-

практичну задачу встановлення закономірностей формування та структурно-фазовий стану високолегованої оптичної кераміки $YAG:Sm^{3+}$, що повністю відповідає паспорту спеціальності 132 –Матеріалознавство.

За актуальністю теми, ступенем обґрунтованості наукових положень, достовірністю, науковою новизною, теоретичною і практичною цінністю, об'ємом і рівнем одержаних результатів, висновків, сформульованих в дисертації, повнотою їх викладення в опублікованих працях, дисертаційна робота повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а здобувач Тимошенко Арсеній Дмитрович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент

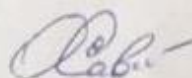
доктор технічних наук,

професор кафедри хімії та інтегрованих технологій

Харківського національного університету

міського господарства ім О.М. Бекетова (м. Харків)

Оксана САВВОВА



Підпис Саввової О.В. завіряю

Начальник відділу кадрів

Харківського національного університету

міського господарства ім О.М. Бекетова



Оксана РОМАНЕНКО