

УДК 546.47+546.713+546.654

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-4>

Сергій НЕДІЛЬКО

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної хімії, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033

ORCID: 0000-0001-8946-7915

Scopus-Author ID: 6604039050

Олексій ІВАНОВ

аспірант кафедри неорганічної хімії, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033

ORCID: 0009-0009-4476-409X

Бібліографічний опис статті : Неділько, С., Іванов, О. (2024). Модифікація $ZnMn_2O_4$ йонами La: структурна стабільність та властивості. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 26–33, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-4>

МОДИФІКАЦІЯ $ZnMn_2O_4$ ЙОНАМИ LA: СТРУКТУРНА СТАБІЛЬНІСТЬ ТА ВЛАСТИВОСТІ

У статті наведено результати синтезу та всебічного вивчення фізико-хімічних властивостей лантан-заміщених шпінелей зі складом $Zn_{(1-x)}La_xMn_2O_4$ ($x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$), отриманих за допомогою золь-гель методу. Основна увага зосереджена на впливі заміщення іонів цинку лантаном на кристалічну структуру, фазовий склад і фізичні параметри матеріалів. Для дослідження використано комплексний підхід з методами ІЧ спектроскопії з Фур'є перетворенням, спектроскопії дифузного відбиття, скануючої електронної мікроскопії та рентгенівської дифрактометрії.

Встановлено, що всі зразки є однофазними, незалежно від вмісту лантану. Це свідчить про стійкість структури шпінелі, навіть при максимальній концентрації лантану. Розмір дифрагуючих кристалітів оцінено за рівнянням Шеррера. Використання методу Рітвельда дозволило уточнити кристалічну структуру, зокрема, визначити ключові параметри елементарної комірки та рентгенівську густину.

Дані ІЧ-спектроскопії свідчать про наявність трьох характерних смуг поглинання в діапазоні $1000\text{--}400\text{см}^{-1}$ для усіх зразків, з поступовим зсувом однієї із смуг поглинання у довгохвильову область при збільшенні заміщення. Ширина забороненої зони, визначена за допомогою функції графічного методу Тауца, змінюється в межах від $2,1\text{eV}$ до $2,8\text{eV}$ при різних зміщеннях цинку.

Дослідження за допомогою скануючої електронної спектроскопії продемонструвало значну ефективну площу поверхні синтезованих зразків і високу пористість, що є перспективним для їх подальшого застосування в таких сферах, як каталіз, сенсорика та енергетика.

Отримані результати демонструють, що поступова заміна цинку на лантан дозволяє керувати властивостями матеріалу, зокрема шириною забороненої зони та пористістю, що робить їх перспективними матеріалами для використання в сучасних технологіях високого рівня.

Ключові слова: цинкова шпінель, заміщення лантаном, золь-гель метод, структура.

Serhii NEDILKO

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Inorganic Chemistry, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01033

ORCID: 0000-0001-8946-7915

Scopus-Author ID: 6604039050

Oleksii IVANOV

PhD Student at the Department of Inorganic Chemistry, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 60 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01033

ORCID: 0009-0009-4476-409X

To cite this article: Nedilko, S., Ivanov, O. (2024). Modyfikatsiia ZnMn₂O₄ yonamy La: strukturna stabilnist ta vlastyvoli [Modification of ZnMn₂O₄ with La ions: Structural stability and properties]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 26–33, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-4>

MODIFICATION OF ZNMN₂O₄ WITH LA IONS: STRUCTURAL STABILITY AND PROPERTIES

The article presents the synthesis and comprehensive study of the physicochemical properties of lanthanum-substituted spinels with the composition Zn_(1-x)La_xMn₂O₄ (x = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20), obtained via the sol-gel method. The primary focus is on the effect of substituting zinc ions with lanthanum on the crystalline structure, phase composition, and physical properties of the materials. A multi-method approach was applied, including Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), diffuse reflectance spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD) analysis.

It was found that all samples are single-phase, regardless of lanthanum content, indicating the stability of the spinel structure even at the highest lanthanum concentration. The crystallite sizes were estimated using the Scherrer equation. The Rietveld refinement method allowed for a detailed analysis of the crystal structure, including the determination of key unit cell parameters and X-ray density.

FTIR data indicate the presence of three characteristic absorption bands in the 1000–400cm⁻¹ range across all samples, with a gradual shift of one absorption band towards the longer wavelength region as substitution increases. The bandgap, calculated using the Tauc graphical method, ranges from 2.11eV to 2.8 eV at different levels of zinc substitution.

SEM analysis revealed a large effective surface area and high porosity of the synthesized samples, highlighting their potential for applications in fields such as catalysis, sensing, and energy. The results demonstrate that the gradual substitution of zinc with lanthanum enables control over material properties, specifically the bandgap and porosity, making these materials promising for high-tech applications.

Key words: zinc spinel, lanthanum substitution, sol-gel method, structure.

Актуальність проблеми. Складнооксидні системи, що описуються загальною хімічною формулою АВ₂O₄, являють собою важливий клас функціональних матеріалів із численними властивостями. Вони є об'єктом активних наукових досліджень завдяки їх потенціалу в таких галузях, як каталітичні та фотокаталітичні процеси (Hao et al., 2024), електрохімічні системи та магнітні матеріали. Оксиди перехідних металів зі структурою шпінелі демонструють високий рівень каталітичної активності, що робить їх перспективними для деградації органічних забруднювачів під впливом видимого світла (Javed et al., 2024). Такі властивості дозволяють використовувати шпінелі для екологічних зачач.

Крім фотокаталізу, шпінелі проявляють високу електропровідність та структурну стабільність (Nameed et al., 2024), що дозволяє використовувати

їх у виробництві літій-йонних батарей. Ці матеріали демонструють високий потенціал для електрохімічних застосувань завдяки здатності зберігати густину матеріалу при багаторазовому включенню та виходу літію в ґратку, що робить їх ефективними для зберігання енергії.

ZnMn₂O₄, як представник цього класу, привертає увагу через свої унікальні властивості, включно зі здатністю демонструвати негативний температурний коефіцієнт опору, що особливо корисно для літій-йонних акумуляторів, оскільки може обмежувати струми заряду і розряду при низьких температурах без використання сторонніх приладів і видавати високі струми розряду при їх підігріві.

З точки зору наноматеріалів, функціональні властивості шпінелей залежать від розмірів частинок та морфології. Наприклад, одновимірні

наноструктури, такі як нанопроводи, значно покращують електричні та оптичні характеристики матеріалів. Важливою характеристикою шпінелей також є пластичність їх структури та утворення високоентропійних систем при заміщенні значною кількістю різних катіонів, що сприяє їх ефективності як каталізаторів у реакціях окиснення та в процесах деградації забруднювачів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження в галузі модифікації оксидних шпінелей і їх фізико-хімічних властивостей демонструють широкий спектр підходів і досягнень.

Дослідження, що зосереджуються на стабілізації літєвих металевих анодів за допомогою наночастинок $ZnFe_2O_4$, виявили позитивний вплив таких наноматеріалів на стабільність анодів у процесах зарядки та розрядки (Li et al., 2024). Подібні роботи доводять важливість використання наноматеріалів у сфері енергетики.

Нові досягнення у створенні композитів на основі $ZnFe_2O_4$ з різноманітними добавками продемонстрували підвищену ефективність у фотокаталітичних процесах (Zhang et al., 2024; Liu et al., 2024).

Сенсорні характеристики шпінелей також привертають значну увагу. Наприклад, було досліджено (Madagal et al., 2024) вплив домішки вісмуту в $ZnFe_2O_4$ на електрохімічні властивості матеріалу та підтвердили його високу чутливість у сенсорах. Це відкриває нові можливості для використання шпінелей у сенсорних пристроях.

У сфері фотоелектрохімії (Turkestani, 2024) досягнуто значних результатів, покращивши продуктивність p-n гетероструктур $CuFe_2O_4/ZnFe_2O_4$ для виробництва водню. Це важливо для застосування у водневій енергетиці, яка нині є однією з найперспективніших альтернативних джерел енергії.

Проведено також дослідження біосумісності та потенційної функціональності шпінелей з домішкою лантану та кобальту для

застосування в біомедицині та енергетиці (Paweł et al., 2023). Це підкреслює перспективність заміщених шпінелей у високотехнологічних галузях.

Таким чином, роботи, які досліджують вплив різних домішок на властивості шпінелей, підтверджують, що контроль над складом матеріалів дозволяє налаштувати їх фізико-хімічні характеристики для оптимізації під конкретні потреби.

Мета. Метою цього дослідження є вивчення впливу заміщення цинку лантаном у шпінелі $ZnMn_2O_4$ на структурні властивості матеріалу. Дослідження спрямоване на визначення змін в енергетичній структурі, ширині забороненої зони та стабільності оксидної матриці при введенні іонів лантану, що може розширити функціональні можливості матеріалу в галузях фотокаталізу, сенсорних технологій та зберігання енергії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Синтез цих матеріалів може відбуватися різними методами, включаючи твердофазний синтез, золь-гель метод, ко-преципітацію та гідротермальний. Кожен із цих методів дозволяє контролювати розміри частинок та їх морфологію, що впливає на кінцеві фізико-хімічні властивості.

Золь-гель метод дозволяє отримати високий ступінь гомогенності паливного прекурсор, в широкому ступені регулювати розмір частинок та їх властивості. В якості вихідних реагентів використовувались розчини нітратів металів $Zn(NO_3)_2$ – (0,97M), $La(NO_3)_3$ – (0,74M), $Mn(NO_3)_2$ – (1,12M) та лимонна кислота ($C_6H_8O_7$) в розрахунку 1 моль ($C_6H_8O_7$) – 1 моль $\sum v(Me)$. Така комбінація дозволяє отримати на момент горіння, що становить 2-3 секунди, температуру близько 1300°C (Varma et al., 2016). В цих умовах синтез фази проходить IN SITU, а подальше прокалювання регулює ступінь кристалічності зразків. Це дуже потужний інструмент препаративної хімії, за допомогою якого можна реалізувати керований синтез.

Об'єми розчинів та наважки лимонної кислоти, реалізовані в роботі, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Об'єми та маси вихідних речовин для приготування 2г зразку

	V $Zn(NO_3)_2$, ml	V $Mn(NO_3)_2$, ml	V $La(NO_3)_3$, ml	m Cit.ac, g
$ZnMn_2O_4$	8.62	14.93	0.00	5.29
$Zn_{0.95}La_{0.05}Mn_2O_4$	8.06	14.70	0.56	5.21
$Zn_{0.90}La_{0.10}Mn_2O_4$	7.52	14.48	1.10	5.13
$Zn_{0.85}La_{0.15}Mn_2O_4$	7.00	14.27	1.62	5.06
$Zn_{0.80}La_{0.20}Mn_2O_4$	6.50	14.06	2.13	4.99

Для приготування прекурсорів розчини було злито у термостійкому скляному стакані об'ємом 500 мл, додано лимонну кислоту та розбавлено дистильованою водою до кінцевого об'єму 200 мл. Суміш випарювали на плитці, регулюючи температуру відповідно до збільшення в'язкості розчину: із підвищенням в'язкості температуру знижували, щоб уникнути розбризкування. Після завершення випарювання температуру підвищували до 350°C, що ініціювало розкладання розчину з виділенням оксидів азоту та подальшим самозайманням. Горіння поширювалося поверхнею розчину, що дозволило отримати пухкий прекурсор після охолодження. Цей прекурсор подрібнювали в ступці та піддавали відпалу при 450°C протягом 5 годин для видалення залишків органічних речовин. Надалі зразки витримували при 600°C на повітрі протягом 5 годин для завершення синтезу.

Результати та обговорення.

Рентгенофазовий аналіз

Для структурного та фазового аналізу отриманих зразків використовували рентгенівський дифрактометр Shimadzu XRD-6000, працюючи

з Cu K α -випромінюванням ($\lambda_{Cu} = 1,54056 \text{ \AA}$) при параметрах напруги 35 кВ і сили струму 30 мА. Дані збиралися в діапазоні 2θ від 5° до 70° з кроком 0,02° і витримкою 1 секунда на точку. Ідентифікацію фаз здійснювали за допомогою програмного забезпечення Match! 3.0, а обробку дифрактограм виконували методом Рітвельда, використовуючи програмний пакет FullProf Suite. Розміри мінімальних дифрагуючих кристалітів оцінювали за формулою Шерера.

За результатами ідентифікації фази були віднесені до ZnMn₂O₄ (COD 96-901-2843). На рис. 1 наведено результати структурного уточнення за методом Рітвельда, що полягало в мінімізації різниць між експериментальною дифракційною картиною та розрахованою програмною моделлю.

Зведені результати аналізу дифрактограм представлені в табл. 2.

Параметр χ^2 для серії зразків знаходиться в діапазоні 1,19–1,35. Такі низькі значення в сукупності зі значеннями R-факторів свідчать про високий рівень узгодження між

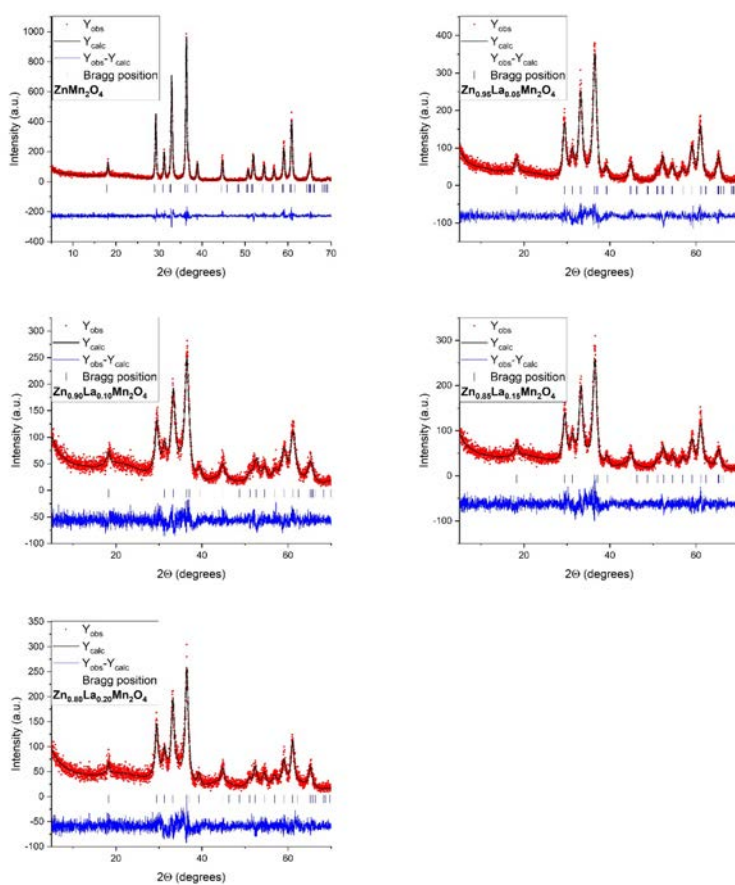


Рис. 1. Результати уточнення методом Рітвельда

Таблиця 2

R фактори та параметри ґратки синтезованих зразків

	ZnMn ₂ O ₄	Zn _{0.95} La _{0.05} Mn ₂ O ₄	Zn _{0.90} La _{0.10} Mn ₂ O ₄	Zn _{0.85} La _{0.15} Mn ₂ O ₄	Zn _{0.80} La _{0.20} Mn ₂ O ₄
Space-group	I41/amd (141) – tetragonal				
Cell	a=5.7100Å c=9.2243Å	a=5.7238Å c=9.1864Å	a=5.72076Å c=9.12438Å	a=5.71837Å c=9.15182Å	a=5.72029Å c=9.16596Å
	V=300.75Å ³	V=300.964Å ³	V=298.614Å ³	V=299.262Å ³	V=299.926Å ³
Estimated density, [g/cm ³]	5.290	5.280	5.322	5.310	5.359
Estimated crystallite size, [nm]	25	14	11	12	15
Bragg R-factor, R _B (%)	4.44	5.74	6.62	7.52	7.89
R _F -factor (%)	4.62	4.33	4.42	5.29	5.51
Profile R value R _p (%)	10.3	11.8	11.4	11.8	12.2
Weighted-profile R value, R _{wp} (%)	14.8	15.5	14.9	15.3	15.8
Chi squared, χ ² (%)	1.35	1.25	1.19	1.23	1.27
Expected R value, R _{exp} (%)	12.73	13.85	13.69	13.83	14.03

експериментальними результатами та теоретичними розрахунками для тетрагональної системи (I41/amd).

ІЧ спектроскопія

Зразки було знято на приладі Perkin Elmer SPECTRUM BX в діапазоні 1000–400 см⁻¹ (крок 1 см⁻¹) в KBr.

Нижче представлені ІЧ спектри усієї серії зразків (рис. 2)

В діапазоні 1000 – 400см⁻¹ в шпінелях складу ZnMn₂O₄ можна спостерігати 2 смуги поглинання. Смуга на 635 см⁻¹ відповідає за коливання зв'язків Me–Oвтетраедричномуоточенні,асмугана530см⁻¹ відповідає за коливання зв'язків Me – O в октаедричному оточенні. В синтезованих зразках спостерігається тенденція зсуву максимума смуги поглинання Me – O октаедричне від 530см⁻¹ до 508 см⁻¹ зі збільшенням заміщення Цинку від 0 до 0,20. Це може свідчити збільшення розмірів октаедрів через входження лантану в В підґратку та частковим переходом мангану в А підґратку.

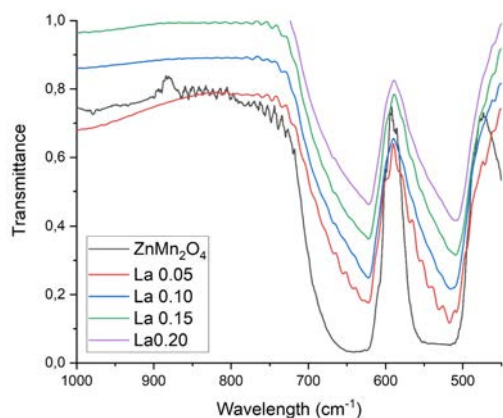


Рис. 2. ІЧ спектри синтезованих зразків

Спектроскопія дифузного відбиття (UV-VIS-NIR)

Спектроскопію дифузного відбиття було проведено для серії зразків із заміщенням у діапазоні x = 0–0,20, використовуючи спектрофотометр Shimadzu UV 2600i. Спектри реєструвалися в межах довжин хвиль від 200 нм (ультрафіолетовий діапазон) до 1400 нм (ближній інфрачервоний діапазон) із кроком 1 нм.

Аналіз спектрів було проведено за допомогою функції Кубелки-Мунка. Графічним методом Тауца визначено ширину забороненої зони (ШЗЗ) для серії зразків.

На спектрах дифузного відбиття (рис. 3) видно, що при довжині хвилі більше 850нм коефіцієнт відбиття зменшується зі збільшенням ступеню заміщення. Від 220 до 850 нм чіткої закономірності не простежується. Значення ширини забороненої зони досліджуваних зразків наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Значення ШЗЗ в залежності від ступеню заміщення (x)

x, %	0	5	10	15	20
ШЗЗ, eV	2.76	1.99	2.50	2.11	2.27

Зміни ступеня відбиття та ширини забороненої зони без чіткої послідовності можуть бути зумовлені появою неупорядкованості в структурі при заміщенні, коли йони заміщуючого елемента створюють локальні дефекти чи дислокації в кристалічній ґратці. Це порушення впорядкованості може викликати флуктуації у відбитті. Зміна морфології нанорозмірних кристалітів також

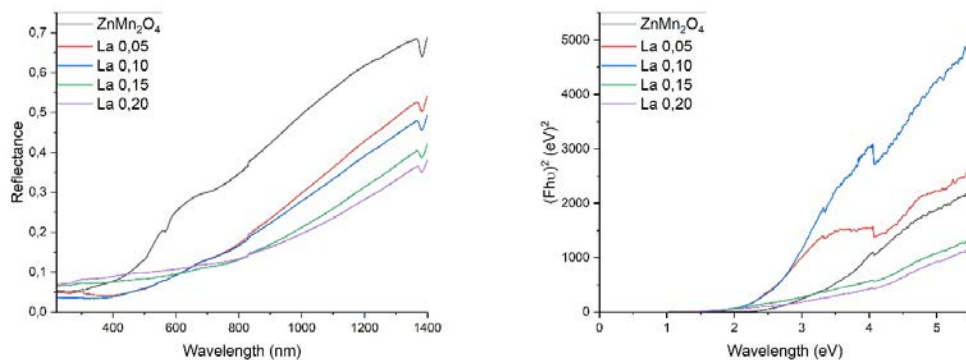


Рис. 3. Спектри дифузного відбиття досліджуваних зразків та графічне відображення обробки спектрів функцією Кубелки-Мунка

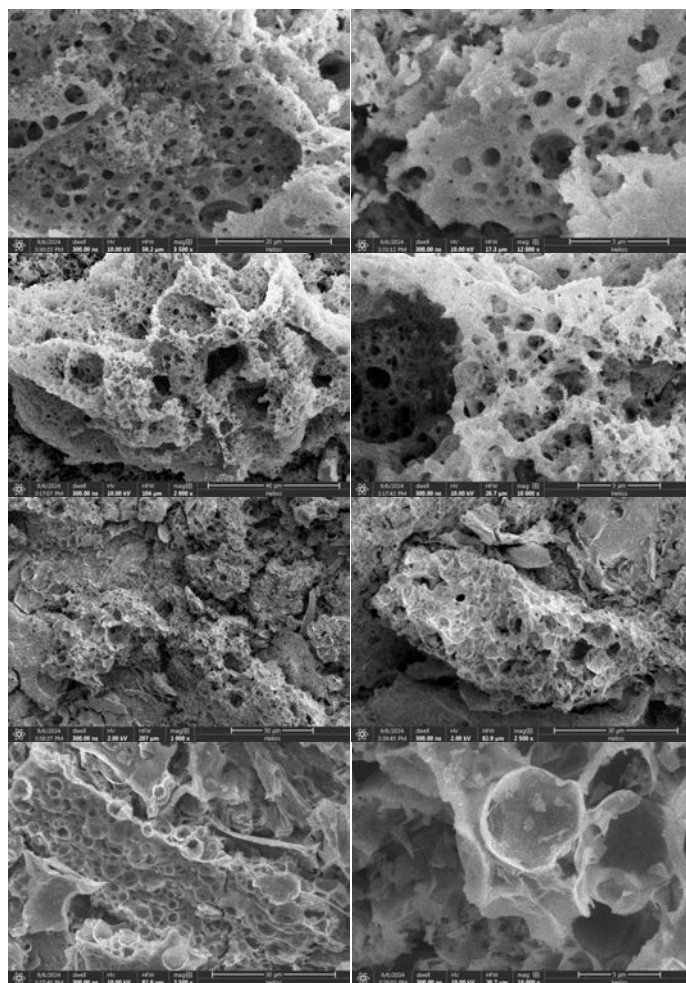


Рис. 4. SEM. x: 5% (1 ряд), 10% (2 ряд), 15% (3 ряд), 20% (4 ряд)

може викликати зміну розсіювання світла, яке відображається у вигляді змін відбиття без чіткої залежності від ступеня заміщення.

Скануюча електронна мікроскопія

Використання скануючої електронної мікроскопії дало можливість оцінити

морфологію зразків на субмікронному рівні (рис. 4).

Досліджувані зразки демонструють дуже високу пористість та однорідність структури, що частково обумовлено вірним вибором методу синтезу. Ці властивості позитивно

вплинуть на їх потенційні застосування, такі як каталіз та використання в матеріалі катода літій-йонних акумуляторів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Дослідження показало, що система $Zn_{(1-x)}La_xMn_2O_4$ є абсолютно стабільною у діапазоні x від 0,05 до 0,20. Відсутність домішкових фаз може вказувати на стабільність зразків з вищим ступенем заміщення. Введення невеликої кількості Лантану відразу призводить до зменшення розмірів кристалітів. Це можна використовувати в складних шпінельних

системах каталізу як один із методів зменшення розміру частинок без змін каталітичної активності (через електронну будову зовнішнього рівню атома Лантану).

Для дослідження морфології нанокристалітів потрібно провести ТЕМ мікроскопію

Це може допомогти в знаходженні закономірності ШЗЗ від складу зразків.

Висока пористість матриці зразків підвищує їх каталітичний потенціал. Надалі в роботах необхідно виміряти питому поверхню зразків для кількісної оцінки пористості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hameed A., Asghar A., Shabbir S., Ahmed I., Tareen A. K., Khan K., Hussain G., Awaji M., Anwar H. A detailed investigation of rare earth lanthanum substitution effects on the structural, morphological, vibrational, optical, dielectric and magnetic properties of Co-Zn spinel ferrites // *Frontiers in Chemistry*. 2024. Vol. 12. DOI: 10.3389/fchem.2024.1433004.
2. Hao Y., Xiao Y., Liu X., Ma J., Lu Y., Chang Z., Luo D., Li L., Feng Q., Xu L., Huang Y. A novel $SnO_2/ZnFe_2O_4$ magnetic photocatalyst with excellent photocatalytic performance in Rhodamine B removal // *Catalysts*. 2024. Vol. 14. P. 350. DOI: 10.3390/catal14060350.
3. Javed K., Abbas N., Bilal M., Alshihri A., Nawaz H., Hassanien M., Naqvi S. Fabrication of a $ZnFe_2O_4@Co/Ni$ -MOF nanocomposite and photocatalytic degradation study of azo dyes // *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 30957–30970. DOI: 10.1039/D4RA05283H.
4. Li L., Li J., Hu C., Tan S., Shen A., Wang X. Nano- $ZnFe_2O_4$ facilitates lithium metal anode achieving high stability // *ChemistrySelect*. 2024. Vol. 9. DOI: 10.1002/slct.202403649.
5. Liu M., Quan Y., Feng M., Ren C., Wang Z. Ball-milling preparation of $ZnFe_2O_4/AgI$ nanocomposite with enhanced photocatalytic activity // *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 31193–31204. DOI: 10.1039/d4ra05539j.
6. Madagalam M., Rosito M., Blangetti N., Etzi M., Padovano E., Bonelli B., Carrara S., Tagliaferro A., Bartoli M. Unveiling the effect of Bi in $ZnFe_2O_4$ nanoparticles in electrochemical sensors // *Applied Surface Science*. 2024. DOI: 10.1016/j.apsusc.2024.160870.
7. Paweł P., Szostak E., Pocheć E., Michalik J. M., Piętosza J., Tahraoui T., Łuszczek M., Gondek Ł. Biocompatibility and potential functionality of lanthanum-substituted cobalt ferrite spinels // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 966. P. 171433. DOI: 10.1016/j.jallcom.2023.171433.
8. Turkestani M. Enhancing the photoelectrochemical performance of a superlattice p–n heterojunction $CuFe_2O_4/ZnFe_2O_4$ electrode for hydrogen production // *Condensed Matter*. 2024. Vol. 9. P. 31. DOI: 10.3390/condmat9030031.
9. Varma A., Mukasyan A. S., Rogachev A. S., Manukyan K. V. Solution combustion synthesis of nanoscale materials // *Chemical Reviews*. 2016. Vol. 116. Issue 23. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00279.
10. Zhang Z., Xie J., Zhang H., Xu Z., Lu H., Hu K. Magnetic 0D/1D $ZnFe_2O_4/ZnCO_3$ rod-shaped nanocomposites and its in situ conversion to $ZnFe_2O_4/ZnO$ with boosting and stable photo-Fenton activity for organic pollutants // *Journal of Electronic Materials*. 2024. Vol. 53. DOI: 10.1007/s11664-024-11111-y.

REFERENCES:

1. Hameed, A., Asghar, A., Shabbir, S., Ahmed, I., Tareen, A. K., Khan, K., Hussain, G., Awaji, M., & Anwar, H. (2024). A detailed investigation of rare earth lanthanum substitution effects on the structural, morphological, vibrational, optical, dielectric and magnetic properties of Co-Zn spinel ferrites. *Frontiers in Chemistry*, 12. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1433004>.
2. Hao, Y., Xiao, Y., Liu, X., Ma, J., Lu, Y., Chang, Z., Luo, D., Li, L., Feng, Q., Xu, L., & Huang, Y. (2024). A novel $SnO_2/ZnFe_2O_4$ magnetic photocatalyst with excellent photocatalytic performance in Rhodamine B removal. *Catalysts*, 14, 350. <https://doi.org/10.3390/catal14060350>.
3. Javed, K., Abbas, N., Bilal, M., Alshihri, A., Nawaz, H., Hassanien, M., & Naqvi, S. (2024). Fabrication of a $ZnFe_2O_4@Co/Ni$ -MOF nanocomposite and photocatalytic degradation study of azo dyes. *RSC Advances*, 14, 30957–30970. <https://doi.org/10.1039/D4RA05283H>.
4. Li, L., Li, J., Hu, C., Tan, S., Shen, A., & Wang, X. (2024). Nano- $ZnFe_2O_4$ facilitates lithium metal anode achieving high stability. *ChemistrySelect*, 9. <https://doi.org/10.1002/slct.202403649>.

5. Liu, M., Quan, Y., Feng, M., Ren, C., & Wang, Z. (2024). Ball-milling preparation of ZnFe₂O₄/AgI nanocomposite with enhanced photocatalytic activity. *RSC Advances*, 14, 31193–31204. <https://doi.org/10.1039/d4ra05539j>.
6. Madagalam, M., Rosito, M., Blangetti, N., Etzi, M., Padovano, E., Bonelli, B., Carrara, S., Tagliaferro, A., & Bartoli, M. (2024). Unveiling the effect of Bi in ZnFe₂O₄ nanoparticles in electrochemical sensors. *Applied Surface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160870>.
7. Paweł, P., Szostak, E., Pocheć, E., Michalik, J. M., Piętosza, J., Tahraoui, T., Łuszczek, M., & Gondek, Ł. (2023). Biocompatibility and potential functionality of lanthanum-substituted cobalt ferrite spinels. *Journal of Alloys and Compounds*, 966, 171433. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171433>.
8. Turkestani, M. (2024). Enhancing the photoelectrochemical performance of a superlattice p–n heterojunction CuFe₂O₄/ZnFe₂O₄ electrode for hydrogen production. *Condensed Matter*, 9, 31. <https://doi.org/10.3390/condmat9030031>.
9. Varma, A., Mukasyan, A. S., Rogachev, A. S., & Manukyan, K. V. (2016). Solution combustion synthesis of nanoscale materials. *Chemical Reviews*, 116(23). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00279>.
10. Zhang, Z., Xie, J., Zhang, H., Xu, Z., Lu, H., & Hu, K. (2024). Magnetic 0D/1D ZnFe₂O₄/ZnCO₃ rod-shaped nanocomposites and its in situ conversion to ZnFe₂O₄/ZnO with boosting and stable photo-Fenton activity for organic pollutants. *Journal of Electronic Materials*, 53. <https://doi.org/10.1007/s11664-024-11111-y>.