

УДК 546.47+546.713+546.73

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-4>**Сергій НЕДІЛЬКО**

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної хімії, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01601

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, 01601

ORCID: 0009-0009-4476-409X

Бібліографічний опис статті: Неділько, С., Іванов, О. (2025). Програмований синтез манганітів структури шпінелі на прикладі $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 25–30, 231, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-4>

ПРОГРАМОВАНИЙ СИНТЕЗ МАНГАНІТІВ СТРУКТУРИ ШПІНЕЛІ НА ПРИКЛАДІ $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$

У даній роботі досліджено процеси формування фазового складу та структурних змін у шпінелях складу $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, синтезованих методом горіння розчину (*solution combustion synthesis*). Основна увага приділялася вивченню впливу температури термічної обробки (400–1000 °C) на кристалічну структуру, фазовий склад, а також на особливості зв'язків у кристалічній решітці. Для комплексного аналізу застосовано порошкову рентгенівську дифракцію (ПРД), інфрачервону (ІЧ) спектроскопію, диференційно-термічний аналіз з термогравіметрією (ДТА/ТГ) та спектроскопію дифузного відбиття (СДВ).

Порошкова ентгенівська дифракція показала, що навіть без додаткового прожарювання формується основна шпінельна фаза $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$. Термообробка зразків призводила до покращення кристалічної впорядкованості, що проявлялося у звуженні дифракційних ліній і зростанні середнього розміру кристалітів від 6 до 75 нм зі збільшенням температури прожарювання. Оцінка параметрів комірки свідчила про поступове збільшення об'єму елементарної комірки та співвідношення *c/a*, що вказує на посилення тетрагональної деформації.

ІЧ-спектроскопія підтвердила відсутність органічних залишків у прекурсорі після горіння розчину та виявила смуги, характерні для вібраційних мод *M–O* (*M* = Zn, Co, Mn) у шпінельній структурі. Зі збільшенням температури прожарювання спостерігалось зміщення смуг поглинання у бік вищих частот, що пояснюється впорядкуванням катіонів і зменшенням дефектів у кристалічній решітці.

Результати ТГ/ДТА аналізу виявили нетипове збільшення маси (~23 %) у діапазоні температур до 800 °C, що пов'язується з окисненням Mn^{2+} до $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ та вбудовуванням кисню в структуру. Відсутність виражених екзо- чи ендотермічних піків свідчить про поступовий характер фазових змін без різких термічних ефектів.

Спектроскопія дифузного відбиття та аналіз Кубелка-Мунка дозволили визначити ширину забороненої зони (ШЗЗ) для зразків, прожарених при температурах 600–1000 °C.

Отримані результати демонструють значний вплив температури термічної обробки на структурно-фазові характеристики $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, а також дозволяють глибше зрозуміти механізми формування шпінельної фази під час горіння розчину та наступної термообробки.

Ключові слова: цинкова шпінель, фазоутворення, розмір кристалітів, термічна обробка.

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, 01601

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, 01601

ORCID: 0009-0009-4476-409X

To cite this article: Nedilko, S., Ivanov, O. (2025). Proqramovanyi syntezy manhanitiv struktury shpineli na prykladi $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ [Programmed synthesis of spinel-structured manganites exemplified by $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 25–30, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-1-4>

PROGRAMMED SYNTHESIS OF SPINEL-STRUCTURED MANGANITES EXEMPLIFIED BY $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$

The study investigates the processes of phase composition formation and structural changes in spinels with the composition $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, synthesized via solution combustion synthesis. The primary focus was on examining the influence of thermal treatment temperature (400–1000 °C) on the crystalline structure, phase composition, and bonding characteristics within the crystal lattice. A comprehensive analysis was conducted using powder X-ray diffraction (PXRD), infrared (IR) spectroscopy, differential thermal analysis with thermogravimetry (DTA/TG), and diffuse reflectance spectroscopy (DRS).

Powder X-ray diffraction revealed that the main spinel phase $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ formed even without additional calcination. Thermal treatment improved the crystalline ordering, evidenced by the narrowing of diffraction peaks and the increase in average crystallite size from 6 to 75 nm with rising calcination temperatures. Lattice parameter evaluations indicated a gradual increase in unit cell volume and c/a ratio, suggesting enhanced tetragonal distortion.

IR spectroscopy confirmed the absence of organic residues in the precursor after solution combustion and identified characteristic bands for M—O (M = Zn, Co, Mn) vibrational modes in the spinel structure. Increasing calcination temperatures caused the absorption bands to shift towards higher frequencies, attributed to cation ordering and reduced lattice defects.

TG/DTA analysis revealed an unusual mass gain (~23 %) up to 800 °C, associated with the oxidation of Mn^{2+} to $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ and oxygen incorporation into the structure. The absence of distinct exothermic or endothermic peaks indicated gradual phase changes without abrupt thermal events.

Diffuse reflectance spectroscopy combined with Kubelka-Munk analysis allowed the determination of the bandgap (Eg) for samples calcined between 600 and 1000 °C.

The obtained results highlight the significant impact of thermal treatment on the structural and phase characteristics of $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ and provide deeper insights into the mechanisms of spinel phase formation during solution combustion and subsequent thermal treatment.

Key words: zinc spinel, phase formation, crystallite size, thermal treatment.

Актуальність проблеми. Дослідження процесів фазоутворення в складних оксидних системах, зокрема в шпінелях складу AMn_2O_4 , є актуальним напрямом сучасного матеріалознавства (НАО et al., 2024). Особливий інтерес викликають заміщені шпінелі, де модифікація катіонного складу дозволяє цілеспрямовано змінювати фізико-хімічні властивості матеріалів. Однією з таких систем є $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, де введення кобальту на місце цинку впливає на механізми фазоутворення, стабільність структури та властивості кінцевого матеріалу.

Фазоутворення є ключовим етапом у формуванні матеріалів із контрольованими властивостями. Від розуміння механізмів кристалізації, стабілізації певних фаз та умов їх формування залежить можливість синтезу матеріалів із заданими характеристиками для конкретних застосувань (Javed et al., 2024). У системах на основі ZnMn_2O_4 фазоутворення є складним процесом, що супроводжується можливими дефектоутвореннями, катіонною інверсією та появою побічних фаз, які можуть

значно впливати на функціональні властивості матеріалів.

Заміщення Zn^{2+} на Co^{2+} в кристалічній решітці може змінювати енергетичний ландшафт процесу фазоутворення, впливати на температури фазоутворення, тип утворених фаз і механізми їх формування. Це створює передумови для виникнення нових структурних особливостей, таких як катіонна інверсія чи нестехіометричні фази. Вивчення цих явищ дозволяє краще зрозуміти природу процесів, що відбуваються під час термічної обробки матеріалів, та управляти ними.

Метод горіння розчину, обраний для синтезу $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$, забезпечує швидке формування оксидної фази за рахунок екзотермічних реакцій, але також створює умови для формування неідеальних структур із підвищеним вмістом дефектів та пористістю. У таких умовах процес подальшої термічної обробки відіграє ключову роль у формуванні остаточного фазового складу та впорядкування кристалічної решітки.

Дослідження впливу температури прожарювання на процеси фазоутворення дозволяє з'ясувати, як змінюється кристалічна структура, які фази стабілізуються за певних умов, і яким чином відбувається перехід від аморфних структур до впорядкованої шпінельної фази. Це дає змогу оптимізувати умови синтезу для отримання матеріалів із необхідними властивостями.

Актуальність даного дослідження також зумовлена недостатньою кількістю робіт, присвячених детальному аналізу фазоутворення в заміщених шпінелях $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, зокрема із застосуванням комплексних методів аналізу, таких як рентгенівська дифракція, інфрачервона спектроскопія та термогравіметрія. Отримані результати можуть бути використані для розробки нових матеріалів із контрольованими властивостями, зокрема для каталітичних застосувань, електронних пристроїв та енергетичних систем.

Таким чином, вивчення процесів фазоутворення в системі $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ є важливим як з фундаментальної точки зору, так і для практичних застосувань, оскільки дозволяє розкрити механізми кристалізації, стабілізації шпінельної фази та впливу катіонного заміщення на структурно-фазові характеристики матеріалу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні наукові дослідження, присвячені модифікації оксидних шпінелей та вивченню їх фізико-хімічних властивостей, демонструють широкий спектр підходів і значний прогрес у цій галузі. Зокрема, вивчення впливу наночастинок ZnFe_2O_4 на стабільність анодів літійових джерел електроенергії показало позитивний ефект під час циклу заряджання та розряджання. Такі наноматеріали сприяють поліпшенню електрохімічної стабільності анодів, що є важливим для підвищення ефективності літій-іонних акумуляторів (Li et al., 2024).

У сфері фотокаталізу також спостерігається значний прогрес. Останні дослідження продемонстрували, що створення композитів на основі ZnFe_2O_4 з додаванням різноманітних функціональних домішок дозволяє значно покращити їх фотокаталітичну активність (Zhang et al., 2024; Liu et al., 2024). Це відкриває нові перспективи для застосування таких матеріалів у процесах очищення води та повітря, а також у виробництві водню з води.

Значна увага приділяється також вивченню сенсорних властивостей оксидних шпінелей. Наприклад, домішка вісмуту в ZnFe_2O_4 позитивно впливає на електрохімічні характеристики матеріалу, підвищуючи його чутливість у сенсорних пристроях (Madagalam et al., 2024). Це відкриває нові можливості для використання модифікованих шпінелей у газових сенсорах і біосенсорах.

У галузі фотоелектрохімії досягнуто значних результатів щодо покращення ефективності $p-n$ гетероструктур $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ для процесів фотоелектрохімічного розкладу води з метою отримання водню (Turkestani, 2024). Такі досягнення є важливими для розвитку водневої енергетики, яка розглядається як перспективне джерело відновлюваної енергії.

Дослідження біосумісності та функціональних властивостей шпінелей, легованих лантаном та кобальтом, демонструють їхній потенціал для використання в біомедицині застосуваннях та енергетичних пристроях (Paweł et al., 2023). Зокрема, такі матеріали можуть бути корисними для створення біосумісних імплантів або високоефективних електродів для акумуляторів.

Таким чином, сучасні дослідження показують, що модифікація оксидних шпінелів шляхом введення різних домішок дозволяє цілеспрямовано змінювати їх фізико-хімічні властивості, що розширює можливості їх застосування в енергетиці, екології, біомедицині та сенсорних технологіях.

Мета. Мета полягає у комплексному аналізі процесів фазоутворення, визначенні оптимальних умов синтезу для формування стабільної шпінельної фази $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ та встановленні зв'язку між умовами термічної обробки, кристалічною структурою та фізико-хімічними властивостями отриманих матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для отримання зразків шпінелі складу $\text{Zn}_{0.95}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ було використано метод горіння розчину, який дозволяє синтезувати нанодисперсні матеріали з високою однорідністю фазового складу за відносно низьких температур.

Для синтезу використовували високочисті нітрати цинку ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), кобальту ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) та марганцю ($\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) як джерела відповідних

катіонів. Нітрати були обрані через їхню хорошу розчинність у воді та високу реакційну здатність під час горіння. В якості органічного пального застосовували лимонну кислоту ($C_6H_8O_7$), яка виконувала роль комплексоутворювача та палива під час горіння.

Необхідні кількості нітратів цинку, кобальту та марганцю були точно зважені відповідно до стехіометричного складу $Zn_{0,95}Co_{0,05}Mn_2O_4$. Прекурсори розчиняли у мінімальній кількості дистильованої води для забезпечення повної гомогенізації суміші. До одержаного розчину додавали лимонну кислоту в співвідношенні, що забезпечувало повне комплексоутворення з катіонами металів. pH розчину регулювали додаванням невеликої кількості аміаку (NH_4OH) до нейтрального або слаболужного значення ($pH \approx 7-8$).

Отриманий гомогенний розчин нагрівали на гарячій плиті до випаровування надлишку води, формуючи в'язкий гель. Після досягнення необхідної в'язкості, реакційну суміш піддавали нагріванню до температури $250-300\text{ }^\circ\text{C}$, при якій відбувалася самопідтримуюча реакція горіння. Екзотермічна реакція супроводжувалася інтенсивним виділенням газів (CO_2 , N_2) та швидким формуванням пухкого порошкоподібного продукту з високою пористістю.

Отримані порошки піддавали додатковій термічній обробці в муфельній печі при різних температурах – $400\text{ }^\circ\text{C}$, $600\text{ }^\circ\text{C}$, $800\text{ }^\circ\text{C}$ та $1000\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 5 годин в атмосфері повітря та досліджувались методами ПРД та ІЧ спектроскопії.

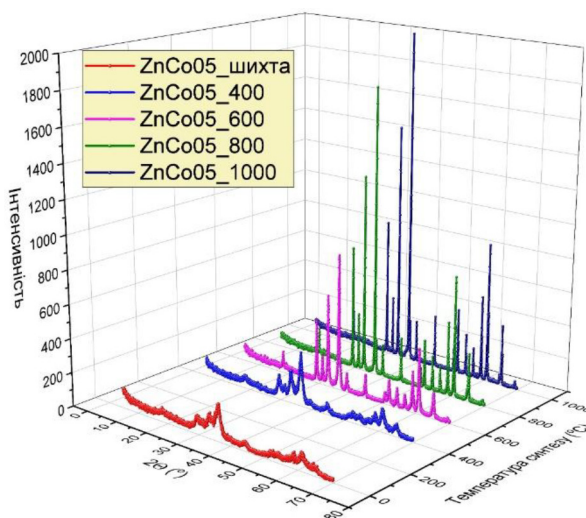


Рис. 1. Порошкова рентгенівська дифракція зразків, прожарених за різних температур

Результати та обговорення. Рентгенофазовий аналіз проведено на приладі SHIMADZU XRD 6000, 35кВ, 35 мА, крок 0.02° , час експозиції 1 сек/точку. Результати аналізу зразків приведено на рис. 1.

Можна спостерігати, що структура шпінелі без домішкових фаз формується вже на етапі горіння розчину та при подальшому прожарюванні збільшується висота рефлексів з одночасним зменшенням напівширини піків.

ІЧ спектроскопія шихти (рис. 2) показала, що наявна невелика домішка карбонатів металів (смуга на 1382 cm^{-1}), що може бути результатом сорбції CO_2 повітря при охолодженні шихти.

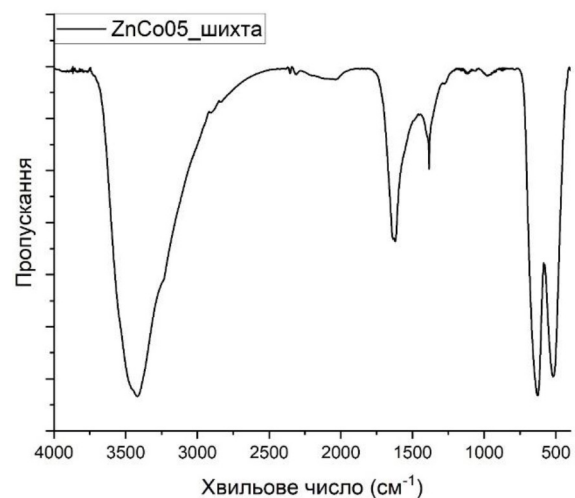


Рис. 2. ІЧ спектроскопія вихідної шихти

ДТА/ТГ показав (Рис. 3) аномальне збільшення маси (23 %) при нагріванні від 25 до $800\text{ }^\circ\text{C}$, що може свідчити про збільшення

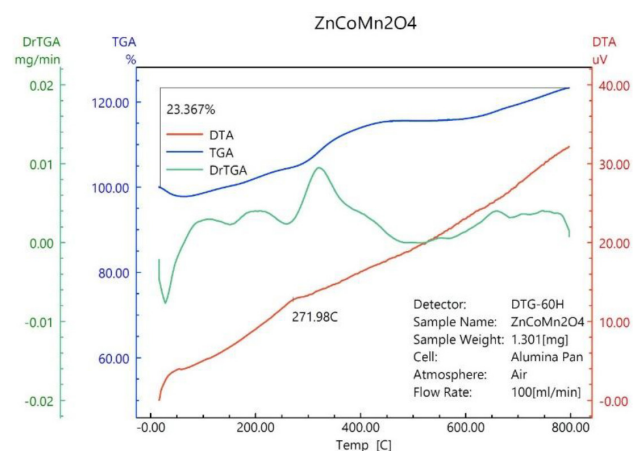


Рис. 3. Результати дослідження вихідної шихти за допомогою ДТА/ТГ. ІЧ спектроскопія

середнього ступеня окиснення мангану зі збереженням шпінельної структури.

Зразки було проаналізовано за допомогою спектрометра Perkin Elmer SPECTRUM BX у діапазоні $1000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ з роздільною здатністю 1 см^{-1} , використовуючи таблетки з KBr як матрицю.

Підвищення температури прожарювання призводить до зсуву максимумів поглинання на $5\text{--}20\text{ см}^{-1}$ у напрямку до вищих хвильових чисел (Рис. 4). Така зміна може бути зумовлена упорядкуванням катіонів у шпінельній структурі. Із зростанням температури відбувається частковий перерозподіл катіонів Zn^{2+} та $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{2+}$ між тетраедричними (А) та октаедричними (В) позиціями решітки. Цей процес змінює силові константи міжатомних зв'язків, що, у свою чергу, впливає на положення вібраційних мод у спектрі.

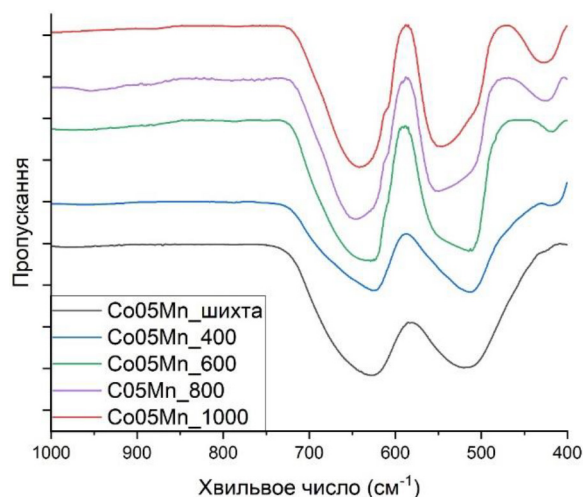
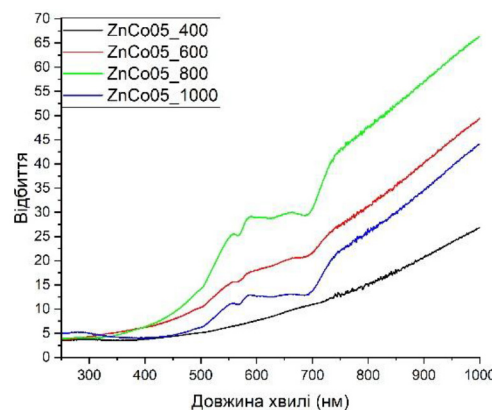


Рис. 4. ІЧ спектри серії зразків. Спектроскопія дифузного відбиття (UV-VIS-NIR)

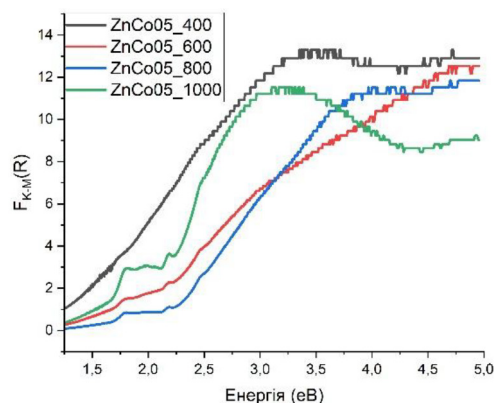
Зменшення кількості дефектів у кристалічній решітці: Термічна обробка сприяє зменшенню концентрації дефектів, що забезпечує більш однорідне локальне оточення атомів кисню

Спектроскопію дифузного відбиття для серії зразків було виконано з використанням спектрофотометра Shimadzu UV 2600i. Реєстрація спектрів проводилася в діапазоні довжин хвиль від 250 нм (ультрафіолетовий діапазон) до 1000 нм (ближній інфрачервоний діапазон) з кроком 1 нм.

Для обробки отриманих спектрів застосовували функцію Кубелки-Мунка. Ширину забороненої зони (ШЗЗ) для досліджуваних зразків визначали графічним методом Таука (рис. 5).



а



б

Рис. 5. СДВ та графіки залежності функції Кубелки-Мунка від енергії фотона

ШЗЗ для зразків з температурою прожарювання $600\text{--}1000\text{ °C}$ становить 2.2 eV, що узгоджується з літературними даними. При 400 °C зразок не має ШЗЗ.

Висновки. У дослідженні синтезовано шпінель $\text{Zn}_{0,95}\text{Co}_{0,05}\text{Mn}_2\text{O}_4$ методом горіння розчину та проаналізовано процеси фазоутворення при термічній обробці ($400\text{--}1000\text{ °C}$). Рентгенівська дифракція показала формування шпінельної фази вже на етапі горіння, а подальше прожарювання сприяло зменшенню напівширини рефлексів. ІЧ спектроскопія показала, що перерозподіл катіонів в підгатках при збільшенні температури прожарювання, але ШЗЗ при цьому майже не змінюється.

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: <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. A novel $\text{SnO}_2/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ magnetic photocatalyst with excellent photocatalytic performance in Rhodamine B removal. *Catalysts*. 2024. Vol. 14. P. 350. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal14060350>
3. Javed K., Abbas N., Bilal M., Alshihri A., Nawaz H., Hassanien M., Naqvi S. Fabrication of a $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@ \text{Co/Ni-MOF}$ nanocomposite and photocatalytic degradation study of azo dyes. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 30957–30970. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.1002/slct.202403649>
5. Liu M., Quan Y., Feng M., Ren C., Wang Z. Ball-milling preparation of $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{AgI}$ nanocomposite with enhanced photocatalytic activity. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. P. 31193–31204. DOI: <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. Unveiling the effect of Bi in ZnFe_2O_4 nanoparticles in electrochemical sensors. *Applied Surface Science*. 2024. DOI: <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. Biocompatibility and potential functionality of lanthanum-substituted cobalt ferrite spinels. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. Vol. 966. P. 171433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171433>
8. Turkestani M. Enhancing the photoelectrochemical performance of a superlattice p–n heterojunction $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ electrode for hydrogen production. *Condensed Matter*. 2024. Vol. 9. P. 31. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00279>
10. Zhang Z., Xie J., Zhang H., Xu Z., Lu H., Hu K. Magnetic 0D/1D $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnCO}_3$ rod-shaped nanocomposites and its in situ conversion to $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ with boosting and stable photo-Fenton activity for organic pollutants. *Journal of Electronic Materials*. 2024. Vol. 53. DOI: [10.1007/s11664-024-11111-y](https://doi.org/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 $\text{SnO}_2/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 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 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@ \text{Co/Ni-MOF}$ 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 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{AgI}$ 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 ZnFe_2O_4 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 $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ 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 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnCO}_3$ rod-shaped nanocomposites and its in situ conversion to $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ with boosting and stable photo-Fenton activity for organic pollutants. *Journal of Electronic Materials*, 53. <https://doi.org/10.1007/s11664-024-11111-y>