

МРНТИ 61.35.31

Г. Сугурбекова<sup>1</sup> – основной автор, | ©  
Р. Кудайбергенова<sup>2</sup>, А. Керимбек<sup>3</sup>, А. Жеткергенова<sup>4</sup>



<sup>1</sup>Д-р хим. наук, профессор, <sup>2</sup>Магистр химии, <sup>3,4</sup>Студенты

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-6894-7247>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-0759-1539>;

<sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0002-9244-2932>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0004-3096-6276>



<sup>1</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,  
Астана, Казахстан



<sup>2,3,4</sup>Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати,  
г. Тараз, Казахстан



<sup>1</sup>[sugurbekova.g.55@gmail.com](mailto:sugurbekova.g.55@gmail.com)

<https://doi.org/10.55956/YBQL6527>

## СИНТЕЗ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШПИНЕЛЬНЫХ MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

**Аннотация.** В работе описан синтез феррита магния (MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) золь-гель методом, структура изучена методом рентгенодифрактометрического анализа (РФА), морфология поверхности исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

**Ключевые слова:** магний феррит, шпинель.



Сугурбекова, Г. Синтез и физико-химические свойства шпинельных MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [Текст] / Г. Сугурбекова, Р. Кудайбергенова, А. Керимбек, А. Жеткергенова // Механика и технологии / Научный журнал. – 2023. – №2(80). – С.125-132. <https://doi.org/10.55956/YBQL6527>

**Введение.** Магнитные шпинель ферритные материалы являются важным классом оксидов металлов, содержащих ионы трехвалентного железа с общей структурной формулой: M<sup>2+</sup>Fe<sub>2</sub><sup>3+</sup>O<sub>4</sub> (где M = Mg<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> ...). Шпинельные ферриты обладают уникальными магнитными свойствами, высокой удельной поверхностью, поверхностно-активными участками, высокой химической стабильностью, контролируемые формы, размеры. Благодаря своим уникальным магнитным, электронным и структурным свойствам, а также доступности и возможности магнитного разделения шпинельные ферриты представляют особый исследовательский интерес из-за их применения в мульти дисциплинарных областях таких как физика, спинтроника, биомедицина и материаловедение. Шпинельные ферриты являются наилучшим катализатором для фотоэлектрохимической очистки воды, для чего требуется высокая адсорбционная эффективность и быстрая кинетика процесса. В последние годы магнитные, оптические, биологические и каталитические свойства шпинелевых ферритов привлекли внимание как ученых, так и общественность [1,2].

Материалы на основе оксида железа были в центре внимания среди наноструктурированных магнитных материалов и были широко изучены из-

за доступности, низкой стоимости и экологической безопасности. Ранее опубликованные обзоры тщательно обсуждали магнитные материалы на основе оксида железа для очистки воды. Исследовательская группа Р.Ху описывает адсорбционные и фотокаталитические свойства оксида железа, которые интересны для решения экологических проблем при очистке воды [3], а группа Tang исследуют наночастицы оксида железа с точки зрения эффективности удаления и десорбции загрязняющих веществ, восстановления, агрегации и токсичности [4]. Группа Li [5] описывают синтез, свойства и применение в окружающей среде железосодержащих материалов. Группа Zhu [6] обсуждают *in-situ* и *ex-situ* методы синтеза магнитных нанокомпозитов и описывают их использование при адсорбции тяжелых металлов. Группа Ngomsik [7] рассматривают метод синтеза микро и наночастиц, изучают влияние магнитной силы на частицы и эффективность удаления радионуклидов. В трудах Kaur и др. [8] описаны методы синтеза магнитных наночастиц и последующие аналитические приложения. Исследовательская группа Ambashta [9] сделала обзор технологии магнитного разделения для очистки воды. Большинство из этих обзоров были сосредоточены на общих формах материалов на основе оксида железа, в том числе гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), маггемита ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и нульвалентного железа ( $\text{Fe}^0$ ). В зависимости от условий окружающей среды наночастицы  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  подвергаются фазовым изменениям в других оксидах, что существенно влияет на магнитные характеристики частиц и может привести к агрегации.

Наночастицы шпинельных ферритов привлекли внимание из-за их более сильных магнитных свойств, более высокой химической стойкости к окислению и большей площади поверхности по сравнению с наночастицами оксида железа [10].

Интересная структура, высокая термическая, механическая и химическая стабильность, большая удельная площадь поверхности, высокая магнитная проницаемость, настраиваемость в химическом составе, контролируемая магнитная характеристика, коррозионная стойкость дает возможность быть весьма интересным предметом исследования в последние годы [11]. Например, при применении в качестве анода в батареях феррит кобальта демонстрирует высокую теоретическую емкость 916 мА/г, и поэтому феррит кобальта и его композиты широко используются в качестве анодных материалов при изготовлении коммерческих литий-ионных батарей [12]. Благодаря исключительным адсорбционным свойствам шпинельные ферриты перспективны для применения в качестве адсорбентов [13], датчиков [14], магнитных устройств [15], перезаряжаемых батарей [16], фотокатализаторов [17] и в биомедицине [18].

**Условия и методы исследований.** Химические вещества. Нитрат железа (III) нонагидрат  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , CASRN 7782-61-8, чистота  $\geq 99.95\%$ , Aldrich Chemistry; нитрат магния гексагидрат  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , CASRN 13446-18-9, чистота  $\geq 99.0\%$ , Sigma – Aldrich; поливиниловый спирт ( $M_w \approx 89.000\text{--}98.00$ ) [ $-\text{CH}_2\text{CHOH}-$ ] $_n$ , CASRN 9002-89-5, чистота  $\geq 99.0\%$ , аммоний карбонат  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , CASRN 506-87-6, чистота  $\geq 99.95\%$ , Aldrich Chemistry.

**Методы исследований.** Эксперименты по дифракции рентгеновских лучей (XRD) проводились с использованием рентгеновского дифрактометра RigakuSmartLab. Изображения с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были записаны с использованием Carl Zeiss Crossbeam 540 со сканирующим электронным микроскопом GEMINI II.

*Золь-гель синтез  $MgFe_2O_4$ .* Шпинели  $MgFe_2O_4$  были получены с использованием золь-гель процесса [19]. К раствору  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (1,54 г, 6 ммоль) и  $(Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O)$  (4,85 г, 12 ммоль) в дистиллированной воде (15 мл) добавляли растворимый крахмал (2 г, 6 ммоль) и смесь перемешивали в течение 15 минут при комнатной температуре. Температуру реакционной смеси повышали примерно до 120-140°C и смесь перемешивали до получения высоковязкого красного геля ( $MgFe$ ). Этот ( $MgFe$ )-гель прокаливали в статическом воздухе при различных температурах (200-800°C) в течение 2 ч со скоростью нагрева 5 град/мин с получением порошков  $MgFe_2O_4$  с разным размером частиц (т.е. температура прокаливания (ТП) от 200 до 800°C). Для сравнения крупнозернистый порошок  $MgFe_2O_4$  был приготовлен обычным методом смешанных оксидов. Кратко,  $Fe_2O_3$  и  $MgO$  в стехиометрическом соотношении хорошо перетирали вместе в агатовой ступке и прокаливали при 850°C в течение 24 ч в статическом воздухе. Для исследований спекания порошки смешивали с 5% насыщенным водным раствором поливинилового спирта (ПВС) в качестве вспомогательного средства для прессования, а затем порошки прессовали в таблетки.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Структурная особенность  $MgFe_2O_4$  охарактеризованы методом РФА (рисунок 1) при различных температурах прокаливания (200°C, 400°C, 600°C, 800°C соответственно). Рентгенограмма показывает, что при любых температурах прокаливания наблюдаются характерные кристаллические  $2\theta$  пики фазы феррита магния, которые очень хорошо согласуются с данными JCPDS 73–1960 [19]. При увеличении температур прокаливания дифракционные пики увеличиваются за счет более высокой кристалличности и роста размеров кристаллита. Полученные образцы обладают высокой чистотой и однородностью.

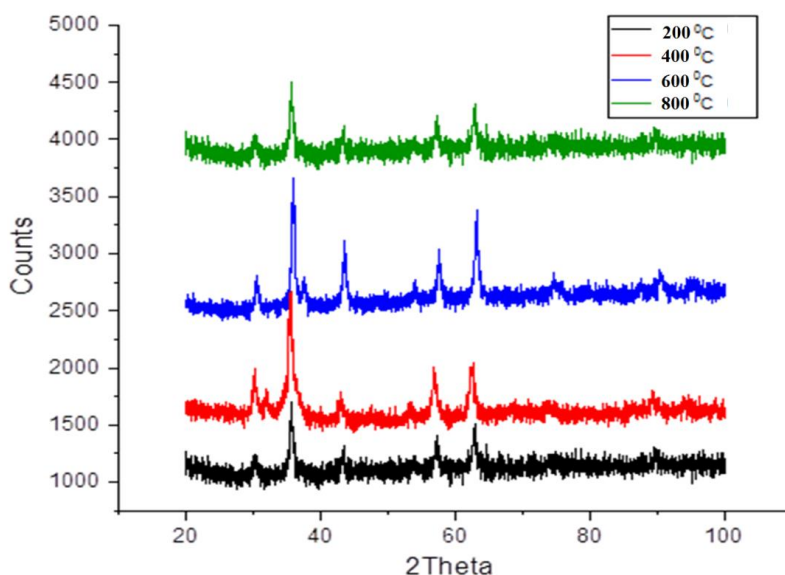


Рис. 1. Рентгенодифрактометрический анализ шпинельных ферритов магния  $MgFe_2O_4$

Морфологические особенности  $MgFe_2O_4$  также изучены с помощью СЭМ-изображений (рис.2). На рисунках 2 а, б, в, г показаны SEM-изображения наноструктурных шпинельных ферритов магния при различных

температурах прокаливания (200°C, 400°C, 600°C, 800°C соответственно). Размеры кластеров составляют в среднем 20-40 нм. Также видно, что кластеры имеют более сложную и округленную форму [20]. Микроструктура поверхности представляет собой тонкую структуру в виде округлого зерна с их агломератами и мельчайшими порами. Поверхностный слой микрометровых выступов, а также пор равномерно покрыт тончайшим слоем наночастиц средним размером 30...60 нм. Как видно из рисунке 2 б, ферриты образуют шестиугольную структуру при условии рН=6,  $\zeta=0,331\text{mV}$ , 400°C и частицы распределяются равномерно. СЭМ изображения показывают, что образцы синтезированы при условиях рН=7,  $\zeta=0,153\text{mV}$  600°C и рН=8,  $\zeta=0,002\text{mV}$ , 800°C состоят из сферических наночастиц правильной формы без какой-либо сигнатуры фазовой агломерации, меньшие кристаллиты имеют размеры менее 100 нм (рисунки 2 в, г).

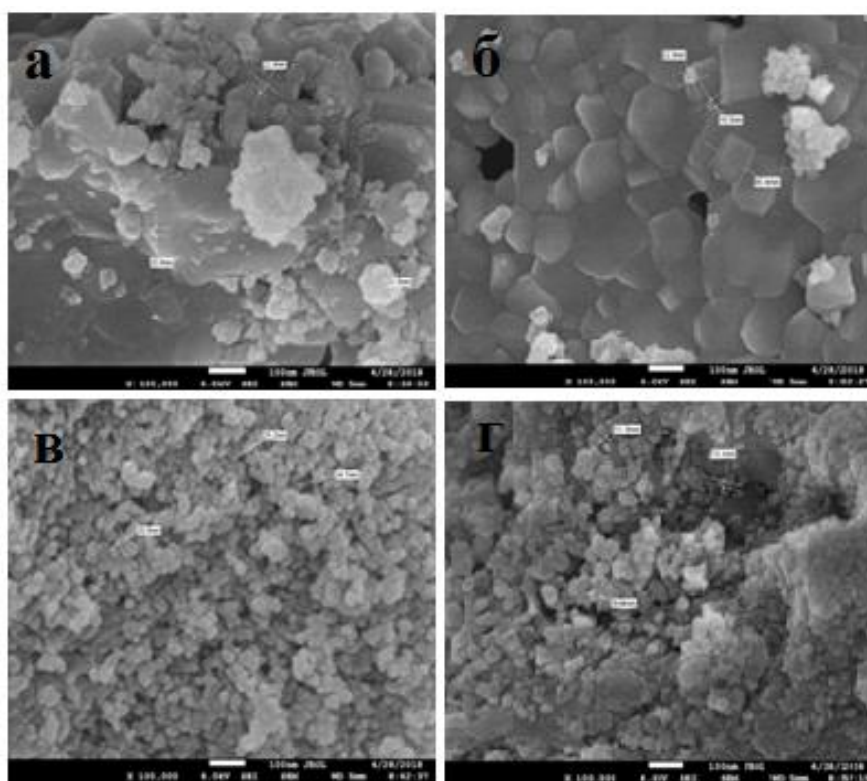


Рис. 2. СЭМ-изображения шпинельных ферритов магния  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  (а - 200°C, б - 400°C, в - 600°C, г - 800°C).

**Заключение.** В данной работе успешно были синтезированы шпинели  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  с помощью золь-гель процесса, и их структурные и морфологические особенности были охарактеризованы с помощью анализов РФА и СЭМ. В РФА синтезированных образцов все пики соответствуют металлическим ферритам, а исследуемые образцы представляют собой поликристаллические наноразмерные структуры. СЭМ-изображения качественно представляют межзеренную ячеистую пористую структуру ферритовых нанокомпозитов. СЭМ-изображения демонстрируют одинаковое

распределение размеров зерен ферритами магния. Полученные ферриты имеют меньше пор и стержнеобразную форму.

#### Список литературы

1. Allen M.J., Tung V.C., Kaner R.B. Honeycomb carbon: A review of graphene, *Chemical Reviews*, 2010. Vol. 110, No. 1, P. 132–145. <https://doi.org/10.1021/cr900070d>.
2. Masafumi H., Masako K., Ryota S., Toshiharu T., Mari Takahashi, S.M. Cation Distribution in Monodispersed  $MFe_2O_4$  ( $M = Mn, Fe, Co, Ni, \text{ and } Zn$ ) Nanoparticles Investigated by X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy: Implications for Magnetic Data Storage, Catalysts, Sensors, and Ferrofluids. *ACS Applied Nano Materials* 2020, Vol. 3 No. 8, P. 8389-8402. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01810>
1. Weiwei Zheng and Geoffrey F. Strouse . Involvement of Carriers in the Size-Dependent Magnetic Exchange for Mn: CdSe Quantum Dots. *Journal of the American Chemical Society* 2011, Vol.133 No.19, P. 7482-7489. <https://doi.org/10.1021/ja200508e>
2. Hao D., Manqing A., Shuang-Shuang Lyu, Ping-Ping Zhang, Xue-Gang Chen, Aimin Jin, Ying Ye. Systematic fabrication and electromagnetic performance of porous biomass carbon/ferrite nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds* 2022, No. 896, P. 163048. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163048>
3. Ranjan K. Sahu, A. K. Ray, T. Mishra and L. C. Pathak. Microwave-Assisted Synthesis of Magnetic Ni Wire from a Metal–Organic Precursor Containing Ni(II) and Triethanolamine. *Crystal Growth & Design* 2008, Vol. 8, No 10 , P. 3754-3760. <https://doi.org/10.1021/cg8003883>
4. Pengwei Li, Weimeng Chen, Wei Liu, Zi'an Li, Yimin Cui, Anping Huang, Rongming Wang and Chinping Chen. Thermodynamic Phase Formation of Morphology and Size Controlled Ni Nanochains by Temperature and Magnetic Field. *The Journal of Physical Chemistry C* 2010, Vol. 114, No. 17, P. 7721-7726. <https://doi.org/10.1021/jp912168h>
5. Yanyan Zhu, Yin Liu, Yehua Gao, Qian Cheng, Li zhao, Zhangfu Yang. Magnetic properties of aristate spherical Ni nanoparticles synthesized through ultrasound reduction method. *Materials Research Bulletin* 2017, Vol. 87, P. 135-139. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.11.034>
6. Audrey-Flore Ngomsik, Agnès Bee, Micheline Draye, Gérard Cote, Valérie Cabuil, Magnetic nano- and microparticles for metal removal and environmental applications: a review, *Comptes Rendus Chimie*, 2005, Vol. 8, No. 6–7, P. 963-970. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2005.01.001>.
7. Ranjeet Kaur, Abshar Hasan, Nusrat Iqbal, Samsul Alam, Mahesh Kr Saini, Syed Kalbe Raza Synthesis and surface engineering of magnetic nanoparticles for environmental cleanup and pesticide residue analysis: a review *J Sep Sci.* 2014, Vol. 37, No. 14, P. 1805-25. <https://doi: 10.1002/jssc.201400256>.
8. Ritu D. A., Mika S. Water purification using magnetic assistance: a review 2010; Vol. 180, No. 1-3, P. 38-49. <https://doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.105>
9. Zhu Y., Liu Y., Gao Y., Cheng Q., Zhao L., Yang Z. Magnetic properties of aristate spherical Ni nanoparticles synthesized through ultrasound reduction method. *Materials Research Bulletin* 2017, Vol. 87, P. 135-139. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.11.034>
10. Hussain M. I., Xia M., Xiao-NaRen, Akhtar K., Nawaz A., Sharma S.K., Javed Y. Ferrite Nanoparticles for Biomedical Applications. 2020, P. 243-265. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8_7)
11. Jena B.K. and Retna Raj C. Shape-Controlled Synthesis of Gold Nanoprism and Nanoperiwinkles with Pronounced Electrocatalytic Activity. *The Journal of Physical Chemistry C* 2007, Vol. 111, No. 42, P. 15146-15153. <https://doi.org/10.1021/jp072363s>



12. Harikishore D., Reddy K., Yeoung-Sang Yun. Spinel ferrite magnetic adsorbents: Alternative future materials for water purification?. Coordination Chemistry Reviews 2016, No. 315, P. 90-111. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.01.012>
13. Soumitra Satapathi, Vishal Kumar, Mrinmoy Kumar Chini, Rajesh Bera, Krishna Kanta Halder, Amitava Patra. Highly sensitive detection and removal of mercury ion using a multimodal nanosensor. Nano-Structures & Nano-Objects 2018, Vol. 16, P. 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2018.05.006>
14. Sagar E. Shirsath, Mahesh L. Mane, Yukiko Yasukawa, Xiaoxi Liu, Akimitsu Morisako. Self-ignited high temperature synthesis and enhanced super-exchange interactions of  $\text{Ho}^{3+}$ - $\text{Mn}^{2+}$ - $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{O}^{2-}$  ferromagnetic nanoparticles. Phys. Chem. Chem. Phys. 2014, Vol. 16, No. 6, P. 2347-2357. <https://doi.org/10.1039/C3CP54257B>
15. Xueai Li, Chunsheng Wang, Xijiang Han. Morphology-controlled fabrication and magnetic properties of nickel assemblies. Materials Chemistry and Physics 2014, Vol. 147, No. 3, P. 403-409. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.05.002>
16. Sonu, Sheetal Sharma, Vishal Dutta, Pankaj Raizada, Ahmad Hosseini-Bandegharai, Vijay Thakur, Van-Huy Nguyen, Quyet VanLe, Pardeep Singh. An overview of heterojunctioned  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  photocatalyst for enhanced oxidative water purification. Journal of Environmental Chemical Engineering 2021, Vol. 9, No. 5, P. 105812. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105812>
17. Irfan Hussain M., Min Xia, Xiao-NaRen, Kanwal Akhtar, Ahmed Nawaz, Sharma S.K., Yasir Javed. Ferrite Nanoparticles for Biomedical Applications. 2020, P. 243-265. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8_7)
18. Zampiva R.Y.S, Kaufmann Jr. C.G, Pinto J.S., Panta P.C., Alves A.K., Pérez-Bergmann C. 3D CNT macrostructure synthesis catalyzed by  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles—A study of surface area and spinel inversion influence. Appl Surf Sci, 2017, Vol. 422, P. 321-330. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.020>
19. Loryuenyong V, Totepvimarn K, Eimburanaprat P, Boonchompoo W, Buasri A. Preparation and characterization of reduced graphene oxide sheets via water-based exfoliation and reduction methods. Adv Mater Sci Eng, 2013, Vol. 923403, No. 5. <https://doi.org/10.1155/2013/923403>

Материал поступил в редакцию 22.02.23.

Г. Сугурбекова<sup>1</sup>, Р.Кудайбергенова<sup>2</sup>, А. Керимбек<sup>2</sup>, А. Жеткергенова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

<sup>2</sup>М.Х.Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Тараз, Қазақстан

#### **$\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ШПИНЕЛЬДЕРІНІҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ФИЗИКАЛЫҚ-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ**

**Аңдатпа.** Жұмыста магний ферритінің ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ) золь-гель әдісімен синтезі сипатталған, құрылымы рентгендік дифракциялық талдау (XRD) арқылы, ал бетінің морфологиясы сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) көмегімен зерттелген.

**Тірек сөздер:** магний феррит, шпинель.

G. Sugurbekova<sup>1</sup>, R. Kudaibergenova<sup>2</sup>, A. Kerimbek<sup>2</sup>, A. Jetkergenova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>Taraz Regional University named after M. Kh. Dulaty, Taraz, Kazakhstan

#### **SYNTHESIS AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SPINEL $\text{MgFe}_2\text{O}_4$**

**Abstract.** This paper describes the synthesis of magnesium ferrite ( $MgFe_2O_4$ ) by the sol-gel method, the structure is studied by X-ray diffraction analysis (XRD), and the surface morphology is studied using scanning electron microscopy (SEM).

**Keywords:** magnesium ferrite, spinel.

#### References

1. Allen M.J., Tung V.C., Kaner R.B. Honeycomb carbon: A review of graphene, *Chemical Reviews*, 2010. Vol. 110, No. 1, P. 132–145.
2. Masafumi H., Masako K., Ryota S., Toshiharu T., Mari Takahashi, S.M. Cation Distribution in Monodispersed  $MFe_2O_4$  ( $M = Mn, Fe, Co, Ni, \text{ and } Zn$ ) Nanoparticles Investigated by X-ray Absorption Fine Structure Spectroscopy: Implications for Magnetic Data Storage, Catalysts, Sensors, and Ferrofluids. *ACS Applied Nano Materials* 2020, Vol. 3 No. 8, P. 8389-8402. <https://doi.org/10.1021/acsnm.0c01810>
3. Weiwei Zheng and Geoffrey F. Strouse . Involvement of Carriers in the Size-Dependent Magnetic Exchange for Mn:CdSe Quantum Dots. *Journal of the American Chemical Society* 2011, Vol.133 No.19, P. 7482-7489.
4. Hao D., Manqing A., Shuang-Shuang Lyu, Ping-Ping Zhang, Xue-Gang Chen, Aimin Jin, Ying Ye. Systematic fabrication and electromagnetic performance of porous biomass carbon/ferrite nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds* 2022, No. 896, P. 163048. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163048>
5. Ranjan K. Sahu, A. K. Ray, T. Mishra and L. C. Pathak. Microwave-Assisted Synthesis of Magnetic Ni Wire from a Metal–Organic Precursor Containing Ni(II) and Triethanolamine. *Crystal Growth & Design* 2008, Vol. 8, No 10 , P. 3754-3760.
6. Pengwei Li, Weimeng Chen, Wei Liu, Zi'an Li, Yimin Cui, Anping Huang, Rongming Wang and Chinpeng Chen. Thermodynamic Phase Formation of Morphology and Size Controlled Ni Nanochains by Temperature and Magnetic Field. *The Journal of Physical Chemistry C* 2010, Vol. 114, No. 17, P. 7721-7726.
7. Yanyan Zhu, Yin Liu, Yehua Gao, Qian Cheng, Li zhao, Zhangfu Yang. Magnetic properties of aristate spherical Ni nanoparticles synthesized through ultrasound reduction method. *Materials Research Bulletin* 2017, Vol. 87, P. 135-139. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.11.034>
8. Audrey-Flore Ngomsik, Agnès Bee, Micheline Draye, Gérard Cote, Valérie Cabuil, Magnetic nano- and microparticles for metal removal and environmental applications: a review, *Comptes Rendus Chimie*, 2005, Vol. 8, No. 6–7, P. 963-970. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2005.01.001>.
9. Ranjeet Kaur, Abshar Hasan, Nusrat Iqbal, Samsul Alam, Mahesh Kr Saini, Syed Kalbe Raza Synthesis and surface engineering of magnetic nanoparticles for environmental cleanup and pesticide residue analysis: a review *J Sep Sci.* 2014, Vol. 37, No. 14, P. 1805-25. <https://doi: 10.1002/jssc.201400256>.
10. Ritu D. A., Mika S. Water purification using magnetic assistance: a review 2010; Vol. 180, No. 1-3, P. 38-49. <https://doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.105>
11. Zhu Y., Liu Y., Gao Y., Cheng Q., Zhao L., Yang Z. Magnetic properties of aristate spherical Ni nanoparticles synthesized through ultrasound reduction method. *Materials Research Bulletin* 2017, Vol. 87, P. 135-139. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.11.034>
12. Hussain M. I., Xia M., Xiao-NaRen, Akhtar K., Nawaz A., Sharma S.K., Javed Y. Ferrite Nanoparticles for Biomedical Applications. 2020, P. 243-265. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8_7)
13. Jena B.K. and Retna Raj C. Shape-Controlled Synthesis of Gold Nanoprism and Nanoperiwinkles with Pronounced Electrocatalytic Activity. *The Journal of Physical Chemistry C* 2007, Vol. 111, No. 42, P. 15146-15153.

14. Harikishore D., Reddy K., Yeoung-Sang Yun. Spinel ferrite magnetic adsorbents: Alternative future materials for water purification?. *Coordination Chemistry Reviews* 2016, No. 315, P. 90-111. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.01.012>
15. Soumitra Satapathi, Vishal Kumar, Mrinmoy Kumar Chini, Rajesh Bera, Krishna Kanta Halder, Amitava Patra. Highly sensitive detection and removal of mercury ion using a multimodal nanosensor. *Nano-Structures & Nano-Objects* 2018, Vol. 16, P. 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2018.05.006>
16. Sagar E. Shirsath, Mahesh L. Mane, Yukiko Yasukawa, Xiaoxi Liu, Akimitsu Morisako. Self-ignited high temperature synthesis and enhanced super-exchange interactions of  $\text{Ho}^{3+}$ – $\text{Mn}^{2+}$ – $\text{Fe}^{3+}$ – $\text{O}^{2-}$  ferromagnetic nanoparticles. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014, Vol. 16, No. 6, P. 2347-2357. <https://doi.org/10.1039/C3CP54257B>
17. Xueai Li, Chunsheng Wang, Xijiang Han. Morphology-controlled fabrication and magnetic properties of nickel assemblies. *Materials Chemistry and Physics* 2014, Vol. 147, No. 3, P. 403-409. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.05.002>
18. Sonu, Sheetal Sharma, Vishal Dutta, Pankaj Raizada, Ahmad Hosseini-Bandegharaei, Vijay Thakur, Van-Huy Nguyen, Quyet VanLe, Pardeep Singh. An overview of heterojunctioned  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  photocatalyst for enhanced oxidative water purification. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2021, Vol. 9, No. 5, P. 105812. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105812>
19. Irfan Hussain M., Min Xia, Xiao-NaRen, Kanwal Akhtar, Ahmed Nawaz, Sharma S.K., Yasir Javed. Ferrite Nanoparticles for Biomedical Applications. 2020, P. 243-265. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39923-8_7)
20. Zampiva R.Y.S, Kaufmann Jr. C.G, Pinto J.S., Panta P.C., Alves A.K., Pérez-Bergmann C. 3D CNT macrostructure synthesis catalyzed by  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles—A study of surface area and spinel inversion influence. *Appl Surf Sci*, 2017, Vol. 422, P. 321-330. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.020>
21. Loryuenyong V, Totepvimarn K, Eimburanaprat P, BoonchompooW, Buasri A. Preparation and characterization of reduced graphene oxide sheets via water-based exfoliation and reduction methods. *Adv Mater Sci Eng*, 2013, Vol. 923403, No. 5. <https://doi.org/10.1155/2013/923403>