

УДК 539.216; 548; 620.18
Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-156-3-178-188>

Влияние допирования MgO и Nd₂O₃ на структурные характеристики феррита никеля NiFe₂O₄

А.С. Загребова^{*1,2} , М.В. Здоровец¹ 

¹ Лаборатория инженерного профиля, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

² Лаборатория физики твердого тела, Институт ядерной физики Агентства

E-mail: [*azagrebowa@gmail.com](mailto:azagrebowa@gmail.com), mzdorovets@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследовано влияние допирования MgO и Nd₂O₃ на структурные характеристики феррита никеля NiFe₂O₄ со структурой шпинели, синтезированных методом золь-гель самовозгорания. Синтезированные образцы подвергались термической обработке при температуре 1000 °С, после чего их фазовый состав и параметры кристаллической решетки были изучены методом рентгенофазового анализа.

Показано, что введение MgO в диапазоне концентраций 0,05–0,15 М приводит к снижению содержания примесных фаз Fe₂O₃ и FeO и при концентрациях 0,10–0,15 М сопровождается формированием новой орторомбической фазы Mg₂Fe₂O₅, характеризующейся повышенным структурным упорядочением. Допирование Nd₂O₃ обеспечивает полное подавление примесных оксидных фаз железа и инициирует образование фазы FeNdO₃, способствующей повышению термической и химической стабильности шпинельной матрицы. Установлено, что совместное введение MgO и Nd₂O₃ приводит к изменению параметров элементарной ячейки основной фазы NiFe₂O₄, обусловленному процессами катионного замещения и перераспределением дефектов, а также к упорядочению примесных фаз в составе нанокмпозитов.

Полученные результаты подтверждают возможность целенаправленного управления фазовым составом и структурной стабильностью феррита никеля со структурой шпинели, что создаёт предпосылки для оптимизации их функциональных свойств и использования в процессах адсорбционной очистки водных сред.

Ключевые слова: никелевый феррит, шпинель, золь-гель метод, допирование, оксид магния и неодима, рентгенофазовый анализ, структурная стабильность.

Поступила 11.02.2026. После доработки 15.08.2026. Принята к печати 21.08.2026. Доступно онлайн 30.09.2026.

^{*}автор для корреспонденции

Введение

В последнее время ферриты со структурой шпинели, в частности феррит никеля NiFe₂O₄, представляет собой все больший интерес, поскольку обладает высокой химической и термической стабильностью, развитой удельной поверхностью, ферромагнитными и каталитическими свойствами [1]. Благодаря данным свойствам ферриты находят широкое применение в магнитной записи [2], сенсорных устройствах [3], биомедицинских технологиях [4-5] и электронике [6]. Также наноразмерные ферриты со структурой шпинели обладают потенциалом для эффективного использования в процессах катализа и адсорбции [7-8]. В ряде работ показана эффективность применения шпинели феррита никеля NiFe₂O₄ для очистки сточных вод от таких загрязнителей, как ионы тяжёлых металлов (Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Cr⁶⁺) [9], органические красители (метиленовый синий, метиловый оранжевый, родамин В) [10 - 11], фенольные соединения, фармацевтические и пестицидные загрязнители [12].

Однако существенной проблемой применения ферритов со структурой шпинели является агрегация частиц, приводящая к уменьшению удельной поверхности и снижению количества доступных активных центров, а также деградация оксидной фазы, сопровождающаяся изменением стехиометрического состава образца, вследствие чего наблюдается снижение каталитической активности, магнитных свойств и сорбционной способности [9]. Одним из способов улучшения является создание примесных фаз, повышающих устойчивость и стабильность шпинели за счет введения в структуру других немагнитных соединений. Ряд работ показал [13 - 14], что при допировании магнием происходит стабилизация кристаллической решетки и упорядочение шпинельной структуры за счет изоморфного замещения иона Ni²⁺ ионом Mg²⁺ (Mg²⁺ → Ni²⁺, 0,72 Å → 0,69 Å), не разрушающего структуру шпинели. В работе [15] установлено, что при введении Mg (Ni_{0,96}Mg_{0,04}Fe₂O₄ - δ) происходит уменьшение среднего размера кристаллитов на 4,2 нм и параметра ячейки на 0,00081 нм, по сравнению с исходными значениями, а также увеличение удельной площади поверхности и скорости каталитической реакции за счет увеличения числа активных центров на поверхности феррита. В случае допирования ионами Nd³⁺, в отличие от Mg²⁺, наблюдается увеличение параметра элементарной ячейки, обусловленное большим ионным радиусом Nd³⁺ (0,99 Å) и его замещением катионов Fe³⁺ в октаэдрических (В-) позициях шпинельной структуры. Одновременно уменьшается размер зёрен, что указывает на подавление роста кристаллитов и формирование более дефектной структуры. Увеличение содержания Nd³⁺ сопровождается ростом намагниченности насыщения и улучшением упорядоченности кристаллической решетки, что делает Nd³⁺-допирование перспективным способом модификации свойств никелевых ферритов [16]. При этом концентрация вводимых допантов является ключевым параметром, определяющим степень модификации структуры и функциональных свойств феррита. Выбор концентраций MgO и Nd₂O₃ в интервале (0,05; 0,10 и 0,15) обусловлен необходимостью стабилизировать кристаллическую решётку и увеличить число активных центров без существенного нарушения фазового состава шпинели, что важно для сохранения магнитных и каталитических свойств материала.

Целью данного исследования является изучение влияния введения стабилизирующих допантов MgO и Nd₂O₃ в концентрациях 0,05; 0,10 и 0,15 на структурные параметры шпинели феррита никеля NiFe₂O₄, оценка фазового состава и степени структурного упорядочения, а также выявление взаимосвязи между концентрацией допантов и формированием примесных фаз. Полученные результаты позволят оптимизировать состав наноматериалов для повышения их функциональных свойств и перспективного применения в системах очистки сточных вод.

Материалы и методы

В качестве исходных материалов использовали следующие реагенты: никель (II) азотнокислый шестиводный Ni(NO₃)₂·6H₂O (ч) ГОСТ 4055-70; железо (III) азотнокислое 9-водное Fe(NO₃)₃·9H₂O (ч), ГОСТ 4111-74; лимонная кислота C₆H₈O₇·H₂O (чда) ГОСТ 3652-69; этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭТДА), (Sigma-Aldrich); раствор аммония (Sigma-Aldrich); оксид магния и оксид неодима (Sigma-Aldrich).

Наночастицы NiFe₂O₄ синтезировали золь-гель методом самовозгорания. Для этого стехиометрические количества нитрата никеля Ni(NO₃)₂·6H₂O и нитрата железа Fe(NO₃)₃·9H₂O были растворены в деионизированной воде и перемешивали на магнитной мешалке при температуре 60 °C в течение 15 ми-

нут до образования гомогенного раствора (раствор А). Раствор, содержащий 0.3 моль лимонной кислоты, постепенно вводили в раствор А при постоянном перемешивании (раствор В). Затем по каплям добавляли определенное количество концентрированного раствора аммиака до достижения значения $\text{pH} \approx 7$. После этого в систему вводили 0.3 моль ЭДТА, предварительно растворённой в небольшом объёме деионизированной воды, аналогично регулируя pH раствором аммиака. Полученный раствор перемешивали в течение 30 минут для обеспечения полной гомогенизации.

На следующем этапе синтеза при постоянном перемешивании постепенно повышали температуру нагрева до 100°C в течение нескольких часов, пока вязкость и цвет раствора не изменились. По мере испарения воды из смеси постепенно образовался гель. Перемешивание прекращали и температуру медленно повышали до 200°C . В результате образовавшийся гель самопроизвольно воспламенялся и прогорал в течение нескольких часов, образуя рыхлый порошок. После охлаждения до комнатной температуры полученный образец трижды промывали деионизированной водой и высушивали в низкотемпературной лабораторной печи при 80°C в течение 6 часов. Полученный образец аккуратно растирали в агатовой ступке до получения однородного мелкодисперсного порошка.

Добавление стабилизирующих допантов осуществлялось на этапе получения порошка методом золь-геля, представляющего собой наноразмерные частицы смеси железосодержащих фаз, включая основную кубическую фазу NiFe_2O_4 (PDF-00-054-0964) и включения в виде частиц маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (PDF-00-039-1346), формирование которых происходит в случае пересыщения структуры кислородом. Для этого феррит NiFe_2O_4 перетирали в агатовой ступке с добавлением небольшого количества спирта в присутствии соответствующих оксидов в мольных долях 0,05, 0,10 и 0,15 по отношению к NiFe_2O_4 . Выполняли три варианта модификации: однокомпонентное допирование MgO , однокомпонентное допирование Nd_2O_3 и совместное допирование $\text{MgO} + \text{Nd}_2\text{O}_3$, что позволило оценить влияние каждого типа допанта на структурные и функциональные свойства феррита.

После добавления стабилизирующих допантов в состав нанокompозитов полученные смеси подвергались термической обработке при температуре 1000°C в муфельной печи Nabertherm LHT 04/18 (Nabertherm GmbH, Лилиенталь, Германия) в течение 5 часов, после чего образцы остывали вместе с печью до стадии достижения комнатной температуры. Фазовый состав и кристаллохимические параметры синтезированных образцов исследовали методом рентгеновской дифракции с использованием рентгеновского дифрактометра ECO D8 ADVANCED (Bruker, Карлсруэ, Германия).

Результаты и обсуждения

На рисунке 1 приведены результаты рентгенофазового анализа исследуемых образцов феррита никеля NiFe_2O_4 , полученных с добавлением MgO в различных концентрациях, в таблице 1 приведены данные структурных параметров всех установленных фаз в составе нанокompозитов. Определение весовых вкладов осуществлялось путем сопоставления площадей дифракционных рефлексов для каждой из установленных фаз с последующим определением их весовых долей в общей площади дифрактограммы. Для уточнения фаз использовались коррундовые числа.

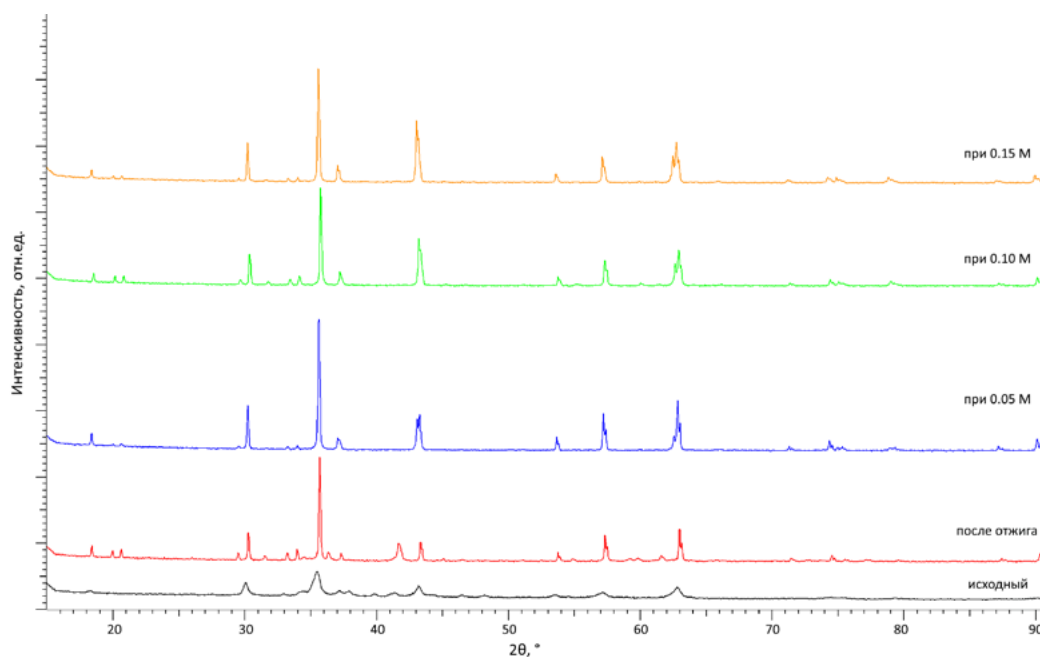


Рисунок 1. Результаты рентгенофазового анализа NiFe₂O₄ при добавлении MgO с концентрацией 0,05М; 0,10М; 0,15М.

Общий вид дифрактограмм, приведенных на рисунке 1, свидетельствует о процессах фазовых трансформаций, вызванных как термическим воздействием (в случае, когда исходный образец нанокompозита подвергается термическому отжигу), так и увеличением концентрации допанта в составе нанокompозитов, добавление которых приводит к изменению структурных особенностей получаемых образцов. Дифрактограмма исходного образца феррита никеля NiFe₂O₄ характеризуется низкой интенсивностью и слабой выраженностью дифракционных пиков, что указывает на преимущественно аморфное или слабокристаллическое состояние. Наблюдаемое диффузное рассеяние и отдельные широкие рефлексы свидетельствуют об отсутствии сформированной кристаллической фазы до термической обработки. После отжига при 1000 °C на дифрактограмме формируются чётко выраженные узкие рефлексы, соответствующие основной кубической шпинельной фазе феррита никеля NiFe₂O₄ (пространственная группа *Fd-3m*), что подтверждает завершение процессов кристаллизации и фазообразования. Наряду с этим фиксируются слабые рефлексы, относящиеся к вторичным фазам гематита (Fe₂O₃) и вюститa (FeO), появление которых связано с фазовыми трансформациями оксида железа в результате термической обработки [17 - 18]. При этом оценка весовых вкладов данных включений свидетельствует о том, что их содержание в структуре составляет не более 10 вес. % от общего состава. Таким образом, можно сделать вывод о том, что термическая обработка синтезированных с применением метода золь-геля нанокompозитов позволяет структурировать их кристаллическую структуру, однако избавиться от всех примесей в составе путем термического отжига не удастся.

При добавлении в состав нанокompозитов оксида магния с концентрацией 0.05 М включений в виде фазы вюститa не наблюдается в составе керамик, а весовой вклад фазы гематита резко снижается и составляет менее 4 вес. % (см. таблицу 1). При этом других примесных фаз в составе нанокompозитов не установлено. В случае увеличения концентрации допанта MgO до 0.10 М в составе керамик наблюдается формирование фазы Mg₂Fe₂O₅ с орторомбическим типом кристаллической структуры (PDF-01-083-6361). Формирование данной фазы происходит путем катионного замещения никеля магнием с последующим вытеснением включений в виде новой фазы в составе фазы шпинели. Весовой вклад фазы гематита также снижается до 2-3 вес. %. При концентрации допанта MgO, равной 0.15 М, весовой вклад фазы Mg₂Fe₂O₅ увеличивается с 4 до 9 вес. %, при этом наблюдается общее увеличение структурного упорядочения в составе нанокompозитов.

Таблица 1. Результаты оценки структурных параметров NiFe_2O_4 допированного MgO .

Фаза	Концентрация допанта, М			
	Исходный	0.05	0.10	0.15
NiFe_2O_4	$a=8.3482 \text{ \AA}$, $V=581.80 \text{ \AA}^3$	$a=8.3613 \text{ \AA}$, $V=584.54 \text{ \AA}^3$	$a=8.3547 \text{ \AA}$, $V=583.17 \text{ \AA}^3$	$a=8.3564 \text{ \AA}$, $V=583.51 \text{ \AA}^3$
Fe_2O_3 – гематит	$a=5.01432 \text{ \AA}$, $c=13.7286 \text{ \AA}$, $V=298.91 \text{ \AA}^3$	$a=5.0159 \text{ \AA}$, $c=13.7016 \text{ \AA}$, $V=298.55 \text{ \AA}^3$	$a=4.9824 \text{ \AA}$, $c=13.6315 \text{ \AA}$, $V=293.06 \text{ \AA}^3$	$a=4.9864 \text{ \AA}$, $c=13.7016 \text{ \AA}$, $V=295.03 \text{ \AA}^3$
FeO – вюстит	$a=4.3302 \text{ \AA}$, $V=81.20 \text{ \AA}^3$	-	-	
$\text{Mg}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	-	-	$a=2.8747 \text{ \AA}$, $b=9.6614 \text{ \AA}$, $c=12.4612 \text{ \AA}$, $V=346.10 \text{ \AA}^3$	$a=2.8804 \text{ \AA}$, $b=9.6729 \text{ \AA}$, $c=12.5055 \text{ \AA}$, $V=348.43 \text{ \AA}^3$

На рисунке 2 приведены результаты оценки рентгенофазового анализа исследуемых наноконкомпозитов, модифицированных Nd_2O_3 с различной концентрацией, изменение которой, согласно общей картине приведенных дифрактограмм, приводит к инициализации процессов фазовых трансформаций, связанных с вытеснением примесных фаз оксида железа – гематита и вюстита, что указывает на фазовую стабилизацию системы. При увеличении концентрации Nd_2O_3 на дифрактограммах появляются дополнительные рефлексы, соответствующие орторомбической фазе FeNdO_3 (PDF-00-025-1149).

Результаты оценки изменения структурных параметров в составе наноконкомпозитов при добавлении Nd_2O_3 с различной концентрацией, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о том, что увеличение концентрации допанта приводит к усилению эффекта катионного замещения, что в свою очередь, помимо увеличения весового вклада новой фазы FeNdO_3 в составе керамик, также приводит к росту структурных параметров основной фазы шпинели NiFe_2O_4 , изменение параметров которой обусловлено различием в ионных радиусах при катионном замещении никеля неодимом. Это приводит к локальным искажениям решётки и её расширению, что согласуется с литературными данными для редкоземельного допирования ферритов со структурой шпинели [19]. При этом следует отметить, что использование в качестве стабилизирующей добавки Nd_2O_3 с различной концентрацией позволяет полностью устранить примесные фазы оксидов железа во всём исследуемом диапазоне концентраций, что свидетельствует о высокой эффективности данного допанта с точки зрения фазовой стабилизации системы. Однако при увеличении концентрации допанта в составе происходит формирование фазы FeNdO_3 , появление которой может способствовать увеличению устойчивости наноконкомпозитов к внешним воздействиям за счет более высоких показателей устойчивости примесной фазы, а также наличия межфазных границ в составе наноконкомпозитов. Наличие границ, а также высокая химическая и термическая устойчивость фазы FeNdO_3 могут способствовать повышению структурной стабильности наноконкомпозитов и их устойчивости к внешним воздействиям, что является потенциально важным фактором для их практического применения.

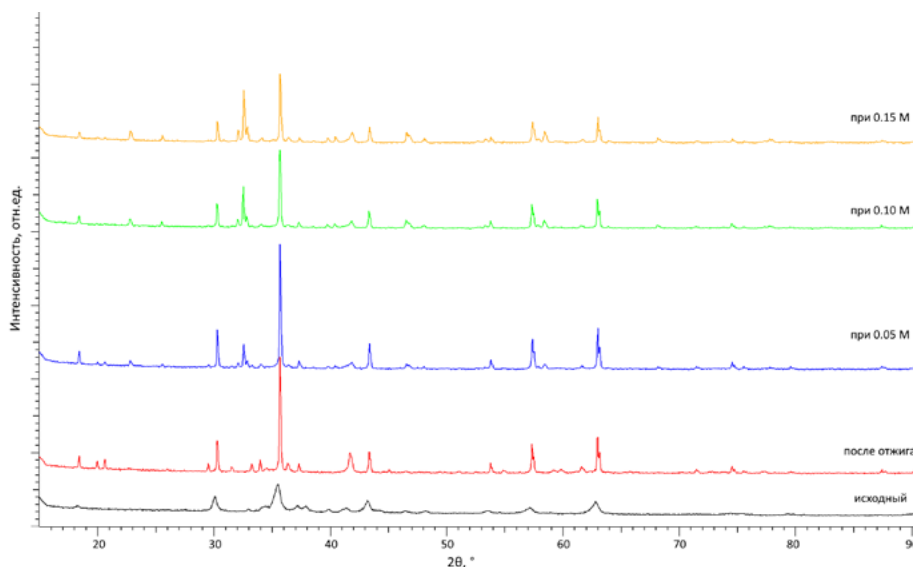


Рисунок 2. Результаты рентгенофазового анализа NiFe₂O₄ при добавлении Nd₂O₃ с концентрацией 0,05М; 0,10М; 0,15М.

Таблица 2. Результаты оценки структурных параметров NiFe₂O₄ допированного Nd₂O₃.

Фаза	Концентрация допанта, М			
	Исходный	0.05	0.10	0.15
NiFe ₂ O ₄	a=8.3482 Å, V=581.80 Å ³	a=8.3287 Å, V=577.73 Å ³	a=8.3350 Å, V=579.06 Å ³	a=8.3434 Å, V=580.80 Å ³
Fe ₂ O ₃ – гематит	a=5.01432 Å, c=13.7286 Å, V=298.91 Å ³	-	-	-
FeO – вюстит	a=4.3302 Å, V=81.20 Å ³	-	-	-
FeNdO ₃	-	a=5.5882 Å, b=7.7616 Å, c=5.4369 Å, V=235.82 Å ³	a=5.5875 Å, b=7.7738 Å, c=5.4552 Å, V=236.95 Å ³	a=5.5732 Å, b=7.7433 Å, c=5.4412 Å, V=234.81 Å ³

На рисунке 3 приведены результаты рентгенофазового анализа исследуемых нанокмозитов, синтезированных при совместном введении двух допантов MgO и Nd₂O₃ в различной концентрации. Согласно оценке фазовых изменений происходит вытеснение включений в виде оксидных фаз – гематита и вюстита с увеличением фаз допанта, однако формируются фазы FeNdO₃ и Mg₂Fe₂O₅, при сохранении шпинельной структуры NiFe₂O₄ как основной фазы, что подтверждается набором интенсивных рефлексов и результатами уточнения структурных параметров (табл. 3). Оценка структурных параметров, приведенная в таблице 3, свидетельствует о двух эффектах, протекающих в нанокмозитах при изменении концентрации допантов в составе. Первый эффект связан с процессами катионного замещения, приводящего к росту параметров основной фазы NiFe₂O₄, обусловленному различиями в ионных радиусах Mg²⁺, Nd³⁺, Ni²⁺ и Fe³⁺. Второй эффект связан со структурным упорядочением вторичных фаз, образующихся в процессе синтеза при изменении концентрации допантов. С ростом количества допанта степень их упорядоченности возрастает, что проявляется в изменении интенсивности, ширины и положения рефлексов на дифрактограммах. Эти примесные фазы могут оказывать вторичное влияние на общую структуру композита, воздействуя на напряжённое

состояние шпинельной матрицы и способствуя перераспределению дефектов.

Таким образом, комбинированное допирование MgO и Nd₂O₃ обеспечивает не только фазовую стабилизацию нанокompозитов, но и формирование более структурно устойчивой многокомпонентной системы. Полученные данные свидетельствуют о стабильности шпинельной матрицы при комбинированном допировании и отсутствии её деградации во всём исследуемом диапазоне концентраций. Данные результаты могут быть использованы в качестве основы для дальнейшей оптимизации функциональных свойств материала и расширения областей его практического применения.

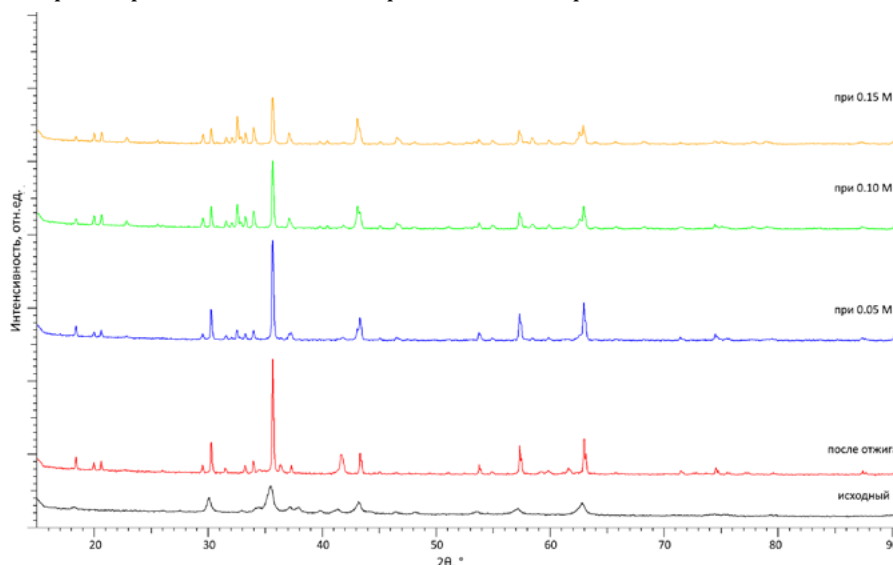


Рисунок 3. Результаты рентгенофазового анализа NiFe₂O₄ при добавлении MgO и Nd₂O₃ с концентрацией 0,05М; 0,10М; 0,15М.

Таблица 3. Результаты оценки структурных параметров NiFe₂O₄ допированного MgO и Nd₂O₃.

Фаза	Концентрация допанта, М			
	Исходный	0.05	0.10	0.15
NiFe ₂ O ₄	a=8.3482 Å, V=581.80 Å ³	a=8.3463 Å, V=581.41 Å ³	a=8.3396 Å, V=580.02 Å ³	a=8.3429 Å, V=580.71 Å ³
Fe ₂ O ₃ – гематит	a=5.01432 Å, c=13.7286 Å, V=298.91 Å ³	-	-	-
FeO – вюстит	a=4.3302 Å, V=81.20 Å ³	-	-	-
FeNdO ₃	-	a=5.5961 Å, b=7.7691 Å, c=5.4444 Å, V=236.71 Å ³	a=5.6006 Å, b=7.7829 Å, c=5.4198 Å, V=235.64 Å ³	a=5.5993 Å, b=7.7492 Å, c=5.4402 Å, V=236.05 Å ³
Mg ₂ Fe ₂ O ₅	-	a=2.8685 Å, b=9.7394 Å, c=12.5375 Å, V=350.27 Å ³	a=2.8702 Å, b=9.7069 Å, c=12.5558 Å, V=349.82 Å ³	a=2.8641 Å, b=9.6746 Å, c=12.5588 Å, V=347.98 Å ³

Заключение

В работе исследовано влияние допирования MgO и Nd₂O₃ на фазовый состав и структурные характеристики никелевого феррита NiFe₂O₄, синтезированного методом золь-гель самовозгорания с последующим отжигом при 1000 °С. Рентгенофазовый анализ показал, что введение допантов оказывает существенное влияние на катионное распределение и структурное упорядочение основной шпинельной фазы.

Показано, что термическая обработка обеспечивает формирование основной шпинельной фазы NiFe₂O₄, однако не приводит к полному устранению примесных оксидных фаз железа. Допирование MgO снижает содержание примесных фаз Fe₂O₃ и FeO, а при концентрациях 0,10–0,15 М формируется новая орторомбическая фаза Mg₂Fe₂O₅ с повышенным структурным упорядочением. Введение Nd₂O₃ обеспечивает устранение примесей и инициирует формирование фазы FeNdO₃, повышающей термическую и химическую стабильность материала. Совместное допирование MgO и Nd₂O₃ приводит к изменению параметров основной шпинельной фазы NiFe₂O₄, которое сопровождается незначительным уменьшением параметра элементарной ячейки с 8.3482 Å до 8.3429 Å за счёт катионного замещения и удаления примесных фаз, что положительно сказывается на структурной стабильности материала.

Полученные результаты подтверждают возможность целенаправленного управления фазовым составом и структурной стабильностью никелевого феррита путём подбора типа и концентрации допантов, которые делают данные материалы перспективными для применения в процессах катализа и адсорбционной очистки водных сред.

Благодарность

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR28713281).

Отработка режимов получения ферритовых порошков была выполнена в рамках проекта ИРН AP26103519 «Разработка технологии изготовления композитных радиопоглотителей с Mn-Zn, Mg-Zn ферритами на основе термопластов с различными термическими и механическими характеристиками».

Вклад авторов

Загребова А.С. - синтез образцов, проведение структурно-фазового анализа, обработка и анализ экспериментальных данных, интерпретация полученных результатов, подготовка первоначального варианта рукописи, редактирование и подача статьи в журнал.

Здоровец М.В. - разработка научной концепции исследования, научное руководство, участие в структурно-фазовом анализе и интерпретации полученных результатов, проверка достоверности результатов исследования, критический пересмотр рукописи с точки зрения научного содержания и структуры, согласование и утверждение окончательной версии статьи для публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них отсутствует какой-либо конфликт интересов, связанный с публикацией данной статьи.

Список литературы

1. S. J. Salih and W. M. Mahmood, *Review on magnetic spinel ferrite (MFe₂O₄) nanoparticles: From synthesis to application*, Heliyon 9(6), e16941 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16601>
2. B. D. Cullity and C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, Hoboken, 2011).
3. J. M. Gonçalves et al., *Sensing performances of spinel ferrites MFe₂O₄ (M = Mg, Ni, Co, Mn, Cu and Zn) based electrochemical sensors: A review*, Analytica Chimica Acta 1233, 340362 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340362>.

4. Rabbani A. et al. *Development of bactericidal spinel ferrite nanoparticles with effective biocompatibility for potential wound healing applications*, RSC advances 11 (3), c. 1773-1782 (2021). <https://doi.org/10.1039/D0RA08417D>
5. S. Askin et al., *Nickel ferrite nanoparticles potentiate the anticancer effects of doxorubicin in human lung A549 cancer cells*, Journal of Applied Toxicology (2025). <https://doi.org/10.1002/jat.4955>
6. V. D. Patil et al., *Spinel nickel ferrite (NiFe₂O₄) materials synthesized via spray-pyrolysis for electrochemical supercapacitor application*, Discover Electrochemistry 1(1), 2 (2024). <https://doi.org/10.1007/s44108-023-00044-6>
7. H. P. Mota et al., *High-performance NiFe₂O₄ spinel catalysts: Recyclability and efficiency in multicomponent reactions*, Journal of Organometallic Chemistry 1025, 123478 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2024.123478>
8. Z. Abdi, P. A. Masouleh, and A. M. Khachatourian, *Fabrication of NiFe₂O₄@PEI and NiFe₂O₄@PPy nanospheres for adsorptive and photocatalytic removal of organic dyes*, Inorganic Chemistry Communications 153, 110833 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110833>
9. W. A. Khoso et al., *Synthesis, characterization and heavy metal removal efficiency of nickel ferrite nanoparticles*, Scientific Reports 11(1), 3790 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83321-9>
10. A. R. B. Bayantong et al., *Adsorptive removal of dye in wastewater by metal ferrite-enabled graphene oxide nanocomposites*, Chemosphere 274, 129518 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129518>
11. A. A. Alshehri, L. M. Alharbi, and M. A. Malik, *Chitosan-templated synthesis of Fe₂O₃, NiO, and NiFe₂O₄ nanoparticles for efficient methylene blue dye removal*, Polymers 17(20), 2750 (2025). <https://doi.org/10.3390/polym17202750>
12. M. B. Taj et al., *Bioconjugate synthesis, phytochemical analysis, and optical activity of NiFe₂O₄ nanoparticles for the removal of ciprofloxacin and Congo red from water*, Scientific Reports 11(1), 5439 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84914-0>
13. P. Jain, S. Shankar, and O. P. Thakur, *Investigation of Mg²⁺ ion substitution on the structural, electric, and magnetic properties of soft spinel ferrites (NiFe₂O₄) for high-frequency applications*, Journal of Electronic Materials 53(9), 5032–5048 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11664-024-11105-7>
14. K. Murugaiah and B. Muthu, *Enhanced magnetic performances of spinel Mg–Ni ferrite nanoparticles*, Structure 9, 10 (2020). <https://doi.org/10.26637/MJM0S20/1272>
15. L. Guo and J. Guo, *Study on the catalytic reduction performance of Mg-doped NiFe₂O₄ ferrite for CO₂ by adopting the co-precipitation method*, Catalysts 16(1), 32 (2025). <https://doi.org/10.3390/catal16010032>
16. T. J. Shinde, A. B. Gadkari, and P. N. Vasambekar, *Influence of Nd³⁺ substitution on structural, electrical and magnetic properties of nanocrystalline nickel ferrites*, Journal of Alloys and Compounds 513, 80–85 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.09.063>
17. F. S. Yen et al., *Crystallite size variations of nanosized Fe₂O₃ powders during γ -to- α phase transformation*, Nano Letters 2(3), 245–252 (2002). <https://doi.org/10.1021/nl015680j>
18. S. Sakurai et al., *First observation of phase transformation of all four Fe₂O₃ phases ($\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ phase)*, Journal of the American Chemical Society 131(51), 18299–18303 (2009). <https://doi.org/10.1021/ja906552b>
19. J. Li et al., *Effect of rare earth Nd³⁺ doping contents on physical, structural, and magnetic properties of Co–Ni spinel ferrite nanoparticles*, Journal of Rare Earths 41(11), 1746–1753 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.03.014>

А.С. Загребова^{1,2*}, М.В. Здоровец¹

¹Инженерлік бейіндегі зертхана,

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Қатты дене физикасы зертханасы, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

(E-mail: *azagrebova@gmail.com, mzdorovets@gmail.com)

MgO және Nd₂O₃ допингінің никель ферритінің NiFe₂O₄ құрылымдық сипаттамаларына әсері

Аңдатпа. Осы жұмыста золь-гельдік өздігінен жану әдісімен синтезделген шпинель құрылымды NiFe₂O₄ никель ферритінің құрылымдық сипаттамаларына MgO және Nd₂O₃ қоспаларымен допирлеудің әсері зерттелді. Синтезделген үлгілер 1000 °C температурада термиялық өңдеуден өткізілді, одан кейін олардың фазалық құрамы мен кристалдық тор параметрлері рентгенфазалық талдау әдісімен анықталды.

MgO қоспасының 0,05–0,15 М концентрациялар аралығында енгізілуі Fe₂O₃ және FeO қоспалық фазаларының мөлшерінің төмендеуіне әкелетіні, ал 0,10–0,15 М концентрацияларында құрылымдық реттелуі жоғары жаңа орторомбиялық Mg₂Fe₂O₅ фазасының түзілуімен қатар жүретіні көрсетілді. Nd₂O₃-пен допирлеу темірдің қоспалық оксидтік фазаларының толық басылуын қамтамасыз етеді және шпинель матрицасының термиялық әрі химиялық тұрақтылығын арттыруға ықпал ететін FeNdO₃ фазасының түзілуіне ықпал етеді. MgO және Nd₂O₃ қоспаларын бірлесіп енгізу катиондық орынбасу процестері мен ақаулардың қайта таралуына байланысты NiFe₂O₄ негізгі фазасының элементар ұяшық параметрлерінің өзгеруіне, сондай-ақ нанокөмпозиттер құрамындағы қоспалық фазалардың құрылымдық реттелуіне алып келетіні анықталды.

Алынған нәтижелер шпинель құрылымды никель ферритінің фазалық құрамын және құрылымдық тұрақтылығын мақсатты түрде басқару мүмкіндігін растайды, бұл олардың функционалдық қасиеттерін оңтайландыруға және су орталарын адсорбциялық тазалау процестерінде қолдануға алғышарттар жасайды.

Түйін сөздер: никель ферриті, шпинель, золь-гель әдісі, допирлеу, магний және неодим оксидтері, рентгенфазалық талдау, құрылымдық тұрақтылық.

A.S. Zagrebova^{1,2}, M.V. Zdorovets¹

¹*Engineering Profile Laboratory, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

²*Laboratory of Solid State Physics, Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan*

(E-mail: *azagrebova@gmail.com, mzdorovets@gmail.com)

Effect of MgO and Nd₂O₃ doping on the structural characteristics of nickel ferrite NiFe₂O₄

Abstract. In this work, the effect of MgO and Nd₂O₃ doping on the structural characteristics of spinel-structured nickel ferrite NiFe₂O₄ synthesized by the sol-gel auto-combustion method was investigated. The synthesized samples were subjected to thermal treatment at 1000 °C, after which their phase composition and crystal lattice parameters were examined using X-ray diffraction analysis.

It was shown that the introduction of MgO in the concentration range of 0.05–0.15 M leads to a decrease in the content of impurity phases Fe₂O₃ and FeO and, at concentrations of 0.10–0.15 M, is accompanied by the formation of a new orthorhombic Mg₂Fe₂O₅ phase characterized by enhanced structural ordering. Doping with Nd₂O₃ ensures complete suppression of impurity iron oxide phases and initiates the formation of the FeNdO₃ phase, which contributes to increased thermal and chemical stability of the spinel matrix. It was established that the combined introduction of MgO and Nd₂O₃ results in changes in the unit cell parameters of the main NiFe₂O₄ phase due to cation substitution processes and defect redistribution, as well as structural ordering of impurity phases within the nanocomposites.

The obtained results confirm the possibility of targeted control over the phase composition and structural stability of spinel-structured nickel ferrite, creating prerequisites for optimizing its functional properties and application in adsorption-based water purification processes.

Keywords: nickel ferrite, spinel, sol-gel method, doping, magnesium and neodymium oxides, X-ray diffraction analysis, structural stability.

Сведения об авторах:

А.С. Загребова - автор для корреспонденции, инженер Лаборатории физики твердого тела, Астанинский филиал Института ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан.

М.В. Здоровец - к.ф.-м.н., профессор, СНС Лаборатории инженерного профиля, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

А.С. Загребова - хат-хабар авторы, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институтының Астана филиалы Қатты дене физикасы зертханасының инженері, Алматы, Қазақстан.

М.В. Здоровец - ф.-м. ғ. к. профессор, Инженерлік бейіндегі зертхананың аға ғылыми қызметкері, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

A.S. Zagrebova - the corresponding author, Engineer, Laboratory of Solid State Physics, Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan.

M.V. Zdorovets - Engineering Profile Laboratory, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).