

УДК 544.032

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-2-156-166>

EDN DKIJFP



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние содержания лантана в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--La(OH)}_3$ на фазообразование и свойства композиционного материала

Ю.С. Елькина[✉], В.А. Власов, Е.Н. Лысенко, А.П. Суржиков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050 Россия

[✉] Автор для переписки, e-mail: ysm7@tpu.ru

Аннотация

Цели. Исследование влияния содержания лантана в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--La(OH)}_3$ на фазообразование, а также структурные и электромагнитные свойства композиционного материала на основе литиевого феррита, полученного с помощью высокотемпературной керамической технологии.

Методы. Введение лантана происходило на начальном этапе смешивания компонентов $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{La(OH)}_3$ в определенном весовом соотношении, затем полученные образцы были направлены на предварительный синтез при температуре 900°C в течение 240 мин в атмосфере воздуха и дальнейшее спекание в dilatометре при температуре 1100°C в течение 120 мин. Методами рентгенофазового анализа (РФА), термогравиметрии (ТГ), дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), а также сканирующей электронной микроскопии проведено исследование микроструктуры и свойств исследуемых композиционных образцов.

Результаты. Методом РФА установлено, что после твердофазного синтеза происходит образование двухфазной структуры, состоящей из магнитной фазы литиевого феррита $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ и перовскитоподобной фазы LaFeO_3 . Проведение РФА после спекания показало, что процесс высокотемпературного нагрева не оказал влияния на изменения фазового состава образцов. Дилатометрические кривые усадки, полученные во время спекания, показали, что введение La уменьшает скорость уплотнения образцов на стадии их нагрева. Спеченные образцы характеризовались плотностью 4.34, 3.84, 3.93 г/см³ и пористостью 0.7, 16 и 18% с увеличением на этапе синтеза массового содержания La(OH)_3 . Также наблюдалось уменьшение размеров зерна. Увеличение количества добавки La(OH)_3 с 0 до 4.4 и 13.9 мас. % привело к увеличению в образцах концентрации фазы LaFeO_3 до 4.2 и 16.6 мас. %, что явилось причиной снижения значений удельной намагнитченности насыщения соответственно с 59.4 до 58.2 и 49.7 Гс·см³/г и начальной магнитной проницаемости с 41.6 до 22.8 и 19.5. С помощью ТГ и ДСК показано, что высокотемпературное спекание литиевого феррита без добавок приводит к преимущественному формированию разупорядоченной β-фазы $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$, имеющей заниженное значение температуры Кюри 626°C. Данный процесс связан с нарушением стехиометрического состава образцов по литию и кислороду вследствие выхода данных элементов из образцов во время высокотемпературного спекания.

Выводы. Введение лантана при получении литиевого феррита препятствует во время спекания нарушению стехиометрического состава феррита за счет построения дополнительной решетки LaFeO_3 , что подтверждено высокими значениями температуры Кюри 631°C. Также установлено, что введение лантана приводит к значительному увеличению удельного электрического сопротивления с $5 \cdot 10^2$ до $6 \cdot 10^9$ и $1 \cdot 10^{12}$ Ом·см, что может быть связано как с изменением микроструктуры образцов, так и с изменением их фазового состава.

Ключевые слова

литиевый феррит, лантан, магнитные свойства, электрические свойства, структура, редкоземельный элемент

Поступила: 11.09.2024
Доработана: 08.11.2024
Принята в печать: 19.02.2025

Для цитирования

Елькина Ю.С., Власов В.А., Лысенко Е.Н., Суржигов А.П. Влияние содержания лантана в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--La(OH)}_3$ на фазообразование и свойства композиционного материала. *Тонкие химические технологии*. 2025;20(2):156–166. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-2-156-166>

RESEARCH ARTICLE

The influence of lanthanum content in the $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--La(OH)}_3$ system on phase formation and properties of composite material

Yuliya S. Elkina✉, Vitaly A. Vlasov, Elena N. Lysenko, Anatoly P. Surzhikov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: ysm7@tpu.ru

Abstract

Objectives. To study the effect of varying lanthanum content in the $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--La(OH)}_3$ system on phase formation and corresponding structural and electromagnetic properties of a lithium-ferrite composite material obtained using high-temperature ceramic technology.

Methods. Following the addition of lanthanum occurred at the initial stage of mixing the $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{La(OH)}_3$ components in a certain weight ratio, the obtained samples were sent for preliminary synthesis at a temperature of 900°C for 240 min in an air atmosphere and sintering in a dilatometer at a temperature of 1100°C for 120 min. The microstructure and properties of the sintered composite samples were studied using X-ray phase analysis (XRD), thermogravimetry (TG), differential scanning calorimetry (DSC), and scanning electron microscopy.

Results. XRD analysis confirmed the formation of a two-phase structure following solid-phase synthesis, consisting of the magnetic phase of lithium ferrite $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ and the perovskite-like phase LaFeO_3 . XRD carried out after sintering showed that the high-temperature heating process did not affect the changes in the phase composition of the sample phases. Dilatometric shrinkage curves obtained after sintering showed that the addition of La reduces the rate of compaction of the samples at the stage of their heating. The sintered samples were characterized by a density of 4.34, 3.84, 3.93 g/cm³ and a porosity of 0.7, 16, and 18%, respectively, having an increased mass content of La(OH)_3 at the synthesis stage. A decrease in the grain sizes was also observed. An increase in the amount of lanthanum hydroxide La(OH)_3 additive from 0 to 4.4 and 13.9 wt % led to an increase in the concentration of the synthesized LaFeO_3 phase in the samples to 4.2 and 16.6 wt %, resulting in decreased specific saturation magnetization values from 59.4 to 58.2 and 49.7 G·cm³/g and the initial magnetic permeability from 41.6 to 22.8 and 19.5, respectively. TG and DSC showed that high-temperature sintering of lithium ferrite without additives leads to the predominant formation of the disordered β -phase $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$, which has a reduced Curie temperature of 626°C. This process is associated with a violation of the stoichiometric composition of the samples for lithium and oxygen due to the release of these elements from the samples during high-temperature sintering.

Conclusions. The high values of the Curie temperature of 631°C confirm that the addition of lanthanum during the production of lithium ferrite prevents the violation of the stoichiometric composition of the ferrite during sintering due to the construction of an additional LaFeO_3 lattice. The addition of lanthanum was also found to lead to a significant increase in specific electrical resistance from $5 \cdot 10^2$ to $6 \cdot 10^9$ and $1 \cdot 10^{12}$ Ohm·cm, which may be associated with both a change in the microstructure of the samples and a change in their phase composition.

Keywords

lithium ferrite, lanthanum, magnetic properties, electrical properties, structure, rare earth element

Submitted: 11.09.2024

Revised: 08.11.2024

Accepted: 19.02.2025

For citation

Elkina Yu.S., Vlasov V.A., Lysenko E.N., Surzhikov A.P. The influence of lanthanum content in the $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--La(OH)}_3$ system on phase formation and properties of composite material. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2025;20(2):156–166. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2025-20-2-156-166>

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом число статей, направленных на изучение ферритов, продолжает неуклонно расти, включая литий-содержащие ферриты, имеющие различные технологические применения. За счет высокой температуры Кюри и намагниченности насыщения литиевый феррит $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ используется в различных микроволновых устройствах, а также в литий-ионных батареях в качестве катодного материала и в газовых датчиках [1–4]. Все эти области применения так или иначе предполагают определенное сочетание магнитных и электрических свойств данного феррита. Чтобы этого добиться, в литиевый феррит внедряют различные ионы металлов, такие как Ti, Zn, Ni, Mg, Mn, Co и т.д. В работах [5–8] было показано, что варьированием различных комбинаций по замещению можно улучшить некоторые характеристики, однако во многих случаях это приводит к ухудшению других характеристик. В связи с этим существует необходимость в улучшении электрофизических и магнитных свойств литиевых ферритов.

В последнее время ученые активно ведут исследования по изучению свойств различных ферритов с редкоземельными элементами [9–13]. Неспаренные 4f-электроны, находящиеся на внешнем орбитальном уровне редкоземельных элементов, играют большую роль в возникновении магнитной анизотропии из-за их орбитальной формы [10]. Это значит, что добавление таких ионов, как самарий, лантан, гадолиний и др. в шпинельные ферриты способно изменить их электрические и магнитные свойства. При этом работ, посвященных изучению влияния различных редкоземельных элементов на свойства литиевых ферритов очень мало.

Известно, что помимо варьирования состава ферритов за счет введения определенных компонентов, способ получения ферритов также оказывает влияние на их свойства [3, 10, 12, 14–16]. В случае использования традиционной и широко распространенной керамической технологии для получения ферритов применяют оксиды и карбонаты в качестве исходных реагентов. На основании данных из [17] было показано, что при твердофазном взаимодействии реагентов $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3$ в разных весовых соотношениях замещенной фазы литиевого феррита не образуется, а происходит образование двух фаз, включающих незамещенный литиевый феррит $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ и SmFeO_3 и влияющих на конечные свойства феррита.

В данной работе методами рентгенофазового анализа (РФА), термогравиметрии (ТГ), дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), а также

сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) проведены исследования структуры и свойств литиевого феррита, модифицированного лантаном.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными реагентами для получения литиевого феррита, модифицированного лантаном, были оксид железа Fe_2O_3 (ч.д.а., ЗАО «Вектон», Россия), карбонат лития Li_2CO_3 (ос.ч. 20-2, ЗАО «Вектон», Россия) и гидроксид лантана $\text{La}(\text{OH})_3$ (99.99%, MOS International Co., Китай). Весовые соотношения данных компонентов $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{La}(\text{OH})_3$ составили 91.5/8.5/0 мас. % (образец N0), 87.3/8.3/4.4 мас. % (образец N1) и 78.2/7.9/13.9 мас. % (образец N2).

Перед смешиванием производили высушивание порошков в сушильном шкафу в течение 120 мин при температуре 200°C для удаления лишней влаги. Смешивание данных компонентов происходило в шаровой мельнице E-max (Retsch, Германия) с использованием стальных шаров диаметром 5 мм при 300 об/мин в течение 15 мин. Далее образцы компактировались методом холодного прессования в виде таблеток на ручном гидравлическом прессе ПГр-10 (ЛабТулс, Россия). Предварительный синтез полученных образцов проводили в лабораторной печи при температуре 900°C в течение 240 мин в атмосфере воздуха. Затем образцы измельчали в агатовой ступке и к полученным порошкам добавляли 12 мас. % поливинилового спирта (95.3%, MCD Chemicals, Китай). Далее порошки компактировались в таблетки и спекались в dilatометре DIL 402C (Netzsch, Германия) при температуре 1100°C в течение 2 ч.

Изучение фазового состава полученных образцов было проведено с помощью РФА на дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific, Швейцария) с использованием Cu-K_α излучения. Диапазон измерения составил $2\theta = 10^\circ\text{--}90^\circ$. Для идентификации фаз и определения количественных характеристик использовали программное обеспечение Powder Cell 2.5 с базой данных PDF-4+ Международного центра Дифракционных данных (ICDD¹).

С помощью ТГ и ДСК анализов была исследована температура Кюри (T_C) и тепловые эффекты во время нагрева образцов в термическом анализаторе в STA 449C Jupiter (Netzsch, Германия). Температура Кюри T_C получена при дифференцировании ТГ-кривой литиевого феррита в деривативно термогравиметрическую кривую (ДТГ), пик которой, согласно методике, представленной

¹ URL: <http://www.icdd.com>. Дата обращения: 13.02.2023 г. / Accessed February 13, 2023.

в работе [18], соответствует значению температуры Кюри. Термический анализ проводили с применением внешнего магнитного поля во время всего процесса нагрева до 900°C .

Методом СЭМ на приборе ТМ-3000 (*Hitachi*, Япония) было проведено исследование микроструктурных особенностей литиевых образцов.

Намагниченность насыщения (σ_s) измерялась при комнатной температуре с помощью импульсного магнитометра Н-04 (ТГУ, Россия). Измерения начальной магнитной проницаемости происходило с помощью индуктивного метода на прецизионном измерителе LCR Keysight E4980AL (*Agilent*, США). Температурная зависимость удельного электрического сопротивления образцов измерялась двухзондовым методом по технологии, изложенной в работе [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе получения композиционного материала была проведена реакция твердофазного взаимодействия между исходными компонентами в определенном весовом соотношении, указанном в методике эксперимента.

После синтеза по результатам РФА был установлен качественный и количественный фазовый состав образцов (табл. 1 и рис. 1), который показал образование двух отдельных фаз: шпинельной фазы $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ (PDF № 01-070-5669¹) и перовскитоподобной фазы с орторомбической структурой LaFeO_3 (PDF № 01-077-9980¹). Наличие рефлексов при $2\theta \approx 15^\circ$, 23° и 26° и параметр решетки $\sim 8.33 \text{ \AA}$ согласуются с литературными данными [20] и указывают на формирование упорядоченной кубической фазы $\alpha\text{-Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ [21].

Таблица 1. Фазовый состав синтезированных образцов

Table 1. Phase composition of synthesized samples

Образец Sample	Фазовый состав Phase composition	Параметры решетки, $\text{\AA}$ Lattice parameters, $\text{\AA}$	Концентрация, мас. % Concentration, wt %
N0	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	$a = b = c = 8.3328 (\pm 0.002)$	100
	LaFeO_3	—	—
N1	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	$a = b = c = 8.3279 (\pm 0.002)$	95.7
	LaFeO_3	$a = 5.5549 (\pm 0.002)$ $b = 7.8495 (\pm 0.003)$ $c = 5.5477 (\pm 0.003)$	4.3
N2	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	$a = b = c = 8.3310 (\pm 0.002)$	81.9
	LaFeO_3	$a = 5.5501 (\pm 0.002)$ $b = 7.8613 (\pm 0.003)$ $c = 5.5572 (\pm 0.003)$	18.1

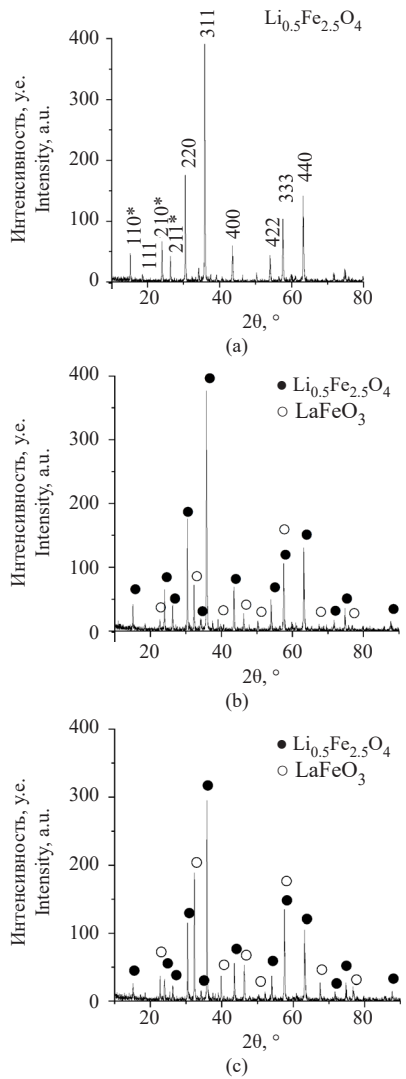


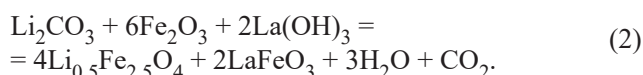
Рис. 1. Рентгенограммы образцов после синтеза, где (a) N0; (b) N1; (c) N2

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of samples after synthesis, where is (a) N0; (b) N1; (c) N2

Образование вторичной фазы протекает по следующему механизму (1):



Ее концентрация зависит от содержания введенного исходного реагента $\text{La}(\text{OH})_3$, так что с увеличением вводимых ионов лантана содержание LaFeO_3 увеличивается. Таким образом, на основе данных РФА видно, что реакция твердофазного взаимодействия между исходными реагентами протекает без внедрения La в кристаллическую структуру литиевого феррита, то есть происходит образование двухфазного композита. Предположительно, реакция в процессе синтеза между исходными реагентами $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{La}(\text{OH})_3$ протекает по схеме (2):



Далее был проведен процесс спекания, в ходе которого получены dilatометрические кривые, изображенные на рис. 2.

До температуры неизотермического нагрева 800°C происходит расширение материала у всех образцов, что связано с увеличением объема газовых пор. Затем происходит резкое изменение длины образцов при температуре около 900°C , связанное с их уплотнением. При этом скорость усадки у образца N0 выше, чем у N1 и N2. К концу изотермической выдержки образец N0 демонстрирует наибольшую усадку. Из усадочных кривых видно, что введение лантана уменьшает скорость уплотнения образцов на стадии их нагрева. Причем скорость усадки образцов N1 и N2 практически одинакова.

Данные, полученные при измерении гидростатической плотности и пористости, указанные в табл. 2,

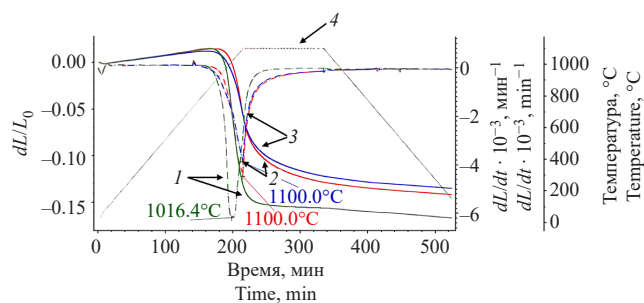


Рис. 2. Дилатометрические кривые, полученные при спекании образцов при 1100°C (кривая усадки — сплошные линии, скорость усадки — пунктирные линии): 1 (зеленые линии) образец N0; 2 (красные линии) образец N1; 3 (синие линии) образец N2; 4 температурная программа

Fig. 2. Dilatometric curves obtained by sintering samples at 1100°C (shrinkage curve — solid lines, shrinkage rate — dotted lines): 1 (green lines) sample N0; 2 (red lines) sample N1; 3 (blue lines) sample N2; 4 temperature program

подтвердили данные дилатометрии. С введением лантана происходит снижение плотности ($\rho_{\text{гидр}}$) и увеличение пористости образцов (Q).

Таблица 2. Значение плотности и пористости композиционных образцов

Table 2. Density and porosity of composite samples

Образец Sample	Плотность $\rho_{\text{гидр}}$, г/см ³ Density ρ_{hydr} , g/cm ³	Пористость Q , % Porosity Q , %	Размер зерна D , мкм Grain size D , μm
N0	4.34	0.7	4.78
N1	3.84	16.0	1.63
N2	3.93	18.0	1.57

Рентгенограммы образцов после процесса спекания представлены на рис. 3.

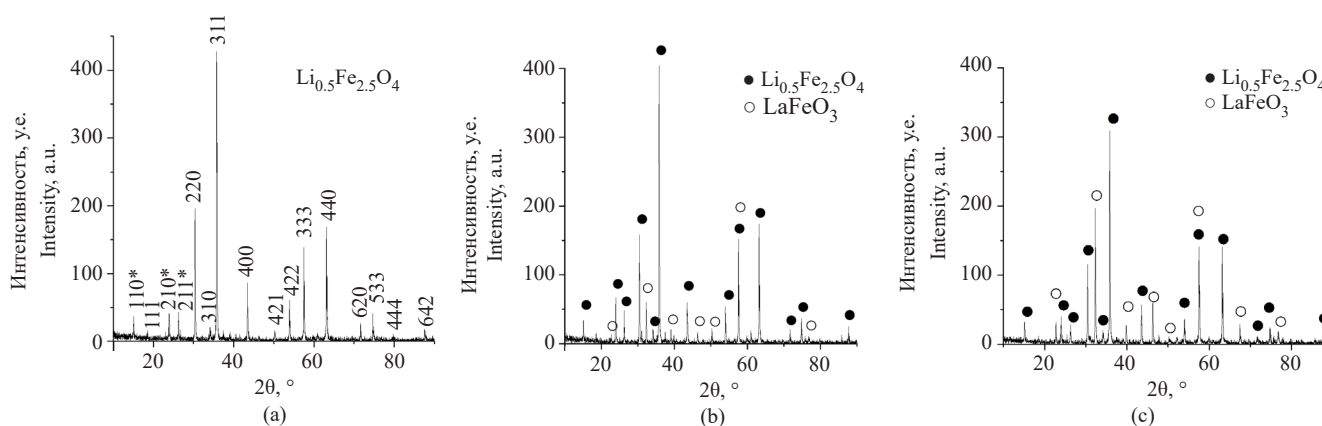


Рис. 3. Рентгенограммы образцов после спекания: (a) N0; (b) N1; (c) N2

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of samples after sintering: (a) N0; (b) N1; (c) N2

Проведенный РФА после спекания показал, что после данного процесса качественное содержание фаз не изменилось и спеченные образцы содержат фазы $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ и LaFeO_3 . Во время спекания (табл. 3) количественное содержание фаз у образца N1 практически не изменяется, а для образца N2 происходит небольшое уменьшение концентрации фазы $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ и увеличение количества вторичной фазы LaFeO_3 по сравнению с данными синтеза.

СЭМ-изображения поверхности образцов приведены на рис. 4. Снимки образцов N1 и N2 подтверждают выводы о формировании двухфазного продукта после спекания, т.к. на них отчетливо видны два контраста [17], которые соответствуют ферритовой фазе (серый оттенок) и фазе LaFeO_3 (белый оттенок). Добавление La также влияет на микроструктуру конечных керамических образцов. Значения среднего размера зерна указано в табл. 2. Введение La приводит к уменьшению размера

зерна ферритовой фазы [22], однако концентрация редкоземельного элемента существенно не влияет на дальнейшее изменение данного параметра.

В данной работе также были проведены исследования удельного электрического сопротивления (ρ). Как видно из табл. 4, происходит резкий рост электросопротивления с увеличением содержания добавки, что может быть связано с увеличением количества вторичной фазы LaFeO_3 , а также высокой пористостью и малой плотностью образцов. Исследования удельной намагниченности насыщения (σ_s) показали, что при введении малого содержания La происходит небольшое уменьшение данного параметра. Более существенные изменения происходят в начальной магнитной проницаемости (μ_0) феррита [17, 23–27]. Вероятно, это связано с количественным увеличением фазы LaFeO_3 , которая имеет антиферромагнитную природу и в определенных обстоятельствах ведет себя как парамагнетик.

Таблица 3. Фазовый состав спеченных образцов

Table 3. Phase composition of sintered samples

Образец Sample	Фазовый состав Phase composition	Параметры решетки, Å Lattice parameters, Å	Концентрация, мас. % Concentration, wt %
N0	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	$a = b = c = 8.3327 (\pm 0.002)$	100
	LaFeO_3	—	—
N1	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	$a = b = c = 8.3275 (\pm 0.002)$	95.8
	LaFeO_3	$a = 5.5506 (\pm 0.002)$ $b = 7.8418 (\pm 0.003)$ $c = 5.5838 (\pm 0.003)$	4.2
N2	$\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$	$a = b = c = 8.3304 (\pm 0.002)$	83.4
	LaFeO_3	$a = 5.5539 (\pm 0.002)$ $b = 7.8593 (\pm 0.003)$ $c = 5.5535 (\pm 0.003)$	16.6

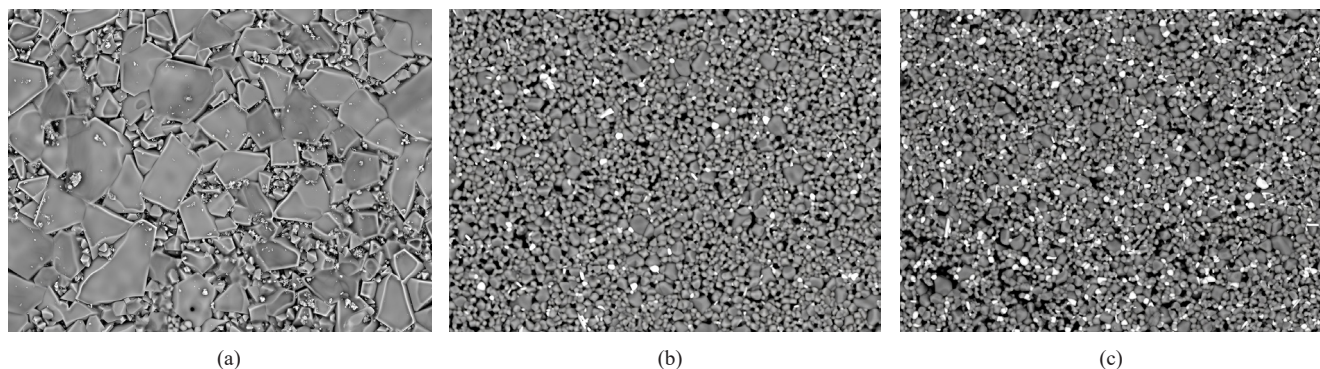


Рис. 4. СЭМ-изображения поверхности литиевого феррита, модифицированного лантаном: (a) N0; (b) N1; (c) N2

Fig. 4. Scanning electron microscopy images of lithium ferrite modified with lanthanum: (a) N0; (b) N1; (c) N2

Таблица 4. Электрические и магнитные свойства образцов

Table 4. Electrical and magnetic properties of samples

Образец Sample	ρ , Ом·см ρ , Ohm·cm	σ_s , Гс·см ³ /г σ_s , G·cm ³ /g	μ_0	T_C , °C
N0	$5 \cdot 10^2$	59.4	41.6	626
N1	$6 \cdot 10^9$	58.2	22.8	631
N2	$1 \cdot 10^{12}$	49.7	19.5	630

Дополнительно был проведен термический анализ спеченных образцов, графики которых изображены рис. 5. Как показано в работах [17–19, 21], тепловой эндотермический эффект на ДСК кривой в области температур $\sim 700\text{--}760^\circ\text{C}$ связан с фазовым переходом из упорядоченной α -фазы в неупорядоченную β -фазу незамещенного литиевого феррита $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$.

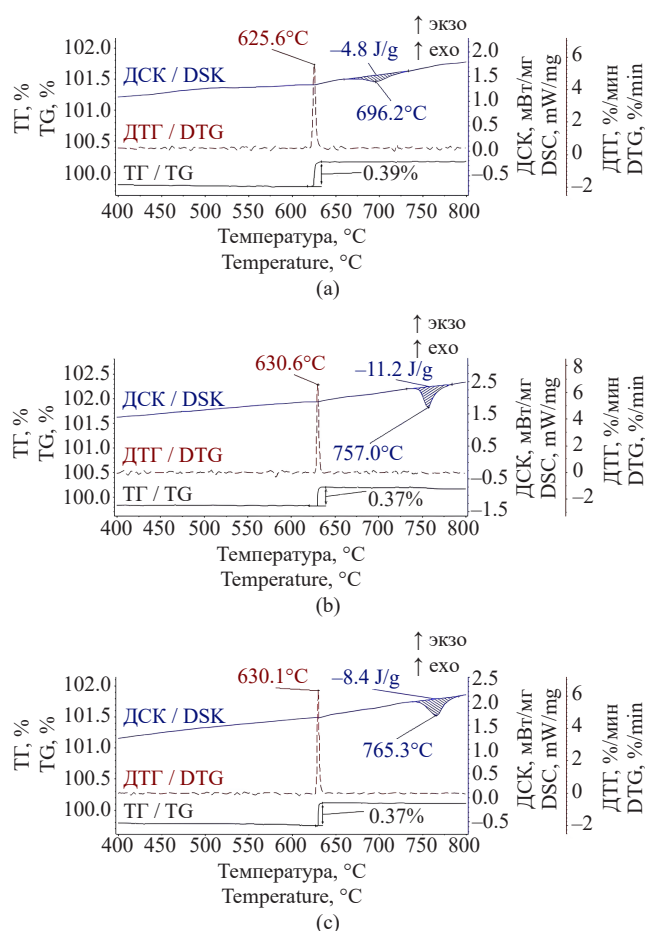

Рис. 5. ТГ и ДСК кривые, полученные после спекания при 1100°C для образцов (a) N0; (b) N1; (c) N2

Fig. 5. Thermogravimetric and differential calorimetric curves obtained after sintering at 1100°C for samples (a) N0; (b) N1; (c) N2

Как было показано в работах [17, 18, 21, 28] энтальпия перехода $\alpha \rightarrow \beta$ $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ по данным площади пика ДСК-анализа феррита составляет 12–13 Дж/г. В данном исследовании значение параметра энтальпии для образца N0 снизилось более чем на 60%. Для образцов N1 и N2 значение снижения энтальпии составило около 10 и 30% соответственно. Также стоит отметить, что при увеличении содержания лантана температурный диапазон теплового эффекта сдвигается в область более высоких температур с $660\text{--}730^\circ\text{C}$ (образец N0) до $732\text{--}783^\circ\text{C}$ и $740\text{--}790^\circ\text{C}$ для N1 и N2 соответственно. В табл. 3 указаны значения T_C для различных образцов. Значение T_C для литиевого феррита N0 немного занижено по сравнению с образцами N1 и N2, температура которых близка к указанной в исследованиях [17, 18, 21].

Предполагается, что заниженные значения температуры Кюри и площади пиков ДСК в литиевом феррите $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ без добавления лантана свидетельствуют о нарушении порядка структуры феррита при высокотемпературном спекании вследствие потери кислорода и лития образцом [20]. Как показано в работах [18, 21], во время спекания происходит частичное образование разупорядоченной фазы $\beta\text{-Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$. Введение La препятствует нарушению стехиометрического состава спеченного литиевого феррита за счет перестройки внутренней кристаллической структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовано влияние содержания лантана в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Li}_2\text{O--La}(\text{OH})_3$ на фазообразование, а также изучены структурные и электромагнитные свойства композиционного материала на основе литиевого феррита $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$. Показано, что в процессе синтеза образцов происходит формирование двухфазного композита, который состоит из шпинельной фазы $\alpha\text{-Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ и перовскитоподобной фазы LaFeO_3 , концентрации которых зависят от соотношений исходных компонентов и существенно не меняются во время высокотемпературного спекания.

Исследование структурных характеристик показало, что повышение концентрации лантана на этапе синтеза приводит к уменьшению плотности и увеличению пористости спеченных образцов. Введение лантана также оказывает влияние на упорядоченность структуры феррита при высокотемпературном спекании, препятствуя нарушению его стехиометрического состава. При этом происходит небольшое ухудшение магнитных свойств и значительное улучшение электрических характеристик.

Данные показали, что для модификации свойств литиевого феррита редкоземельными элементами целесообразно использовать малые добавки лантана

для возможного его использования в микроволновой технике.

Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на варьирование малых количеств вводимого лантана, а также изменение температурно-временных режимов спекания с целью получения более плотной и менее пористой ферритовой керамики с хорошим сочетанием электромагнитных свойств.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект FSWW-2023-0011).

Acknowledgments

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in part of the science program (project FSWW-2023-0011).

Вклад авторов

Ю.С. Елькина — проведение и составление методологии исследования, анализ полученных данных, написание первоначального варианта статьи.

В.А. Власов — проведение и составление методологии исследования, курирование данных.

Е.Н. Лысенко — проверка, курирование данных.

А.П. Суржиков — концептуализация, привлечение финансирования.

Authors' contributions

Yu.S. Elkina — investigation, methodology, formal analysis, writing the original draft.

V.A. Vlasov — formal analysis, investigation, supervision.

E.N. Lysenko — validation, data curation.

A.P. Surzhikov — conceptualization, funding acquisition.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmad M., Shahid M., Alanazi Y.M., Rehman A. ur., Asif M., Dunnill C.W. Lithium ferrite ($\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$): synthesis, structural, morphological and magnetic evaluation for storage devices. *J. Mater. Res. Technol.* 2022;18:3386–3395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.113>
2. Khot S.S., Shinde N.S., Basavaiah N., Watawe S.C., Vaidya M.M. Magnetic properties of LiZnCu ferrite synthesized by the microwave sintering method. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;374:182–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.039>
3. Aravind G., Raghasudha M., Ravinder D., Manivel Raja M., Meena S.S., Bhatt P., Hashim M. Study of structural and magnetic properties of Li–Ni nanoferrites synthesized by citrate-gel auto combustion. *Ceram. Int.* 2016;42(2): 2941–2950. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.077>
4. Никишина Е.Е. Гетерофазный синтез феррита кобальта. *Тонкие химические технологии.* 2021;16(6):502–511. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-6-502-511>
5. Исаев И.М., Костишин В.Г., Коровушкин В.В., Салогуб Д.В., Шакирзянов Р.И., Тимофеев А.В., Миронович А.Ю. Магнитные и радиопоглощающие свойства поликристаллического феррита-шпинели $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$. *Журн. техн. физики (ЖТФ).* 2021;91(9):1376–1380. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51217.74-21>
6. Исаев И.М., Костишин В.Г., Коровушкин В.В., Шипко М.Н., Тимофеев А.В., Миронович А.Ю., Салогуб Д.В., Шакирзянов Р.И. Кристаллохимия и магнитные свойства поликристаллических ферритов-шпинелей $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$. *Журн. неорган. химии.* 2021;66(12):1792–1800. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21120059>
7. Карева К.В., Сураев А.С., Червинская А.С., Доценко О.А., Кушнарев Б.О., Минин Р.В., Журавлев В.А., Вагнер Д.В. Структурные характеристики и магнитные свойства синтезированных керамическим методом ферритмагнетиков $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$. *Известия вузов. Физика.* 2023;66(12):5–11.

REFERENCES

1. Ahmad M., Shahid M., Alanazi Y.M., Rehman A. ur., Asif M., Dunnill C.W. Lithium ferrite ($\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$): synthesis, structural, morphological and magnetic evaluation for storage devices. *J. Mater. Res. Technol.* 2022;18:3386–3395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.113>
2. Khot S.S., Shinde N.S., Basavaiah N., Watawe S.C., Vaidya M.M. Magnetic properties of LiZnCu ferrite synthesized by the microwave sintering method. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;374:182–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.08.039>
3. Aravind G., Raghasudha M., Ravinder D., Manivel Raja M., Meena S.S., Bhatt P., Hashim M. Study of structural and magnetic properties of Li–Ni nanoferrites synthesized by citrate-gel auto combustion. *Ceram. Int.* 2016;42(2): 2941–2950. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.077>
4. Nikishina E.E. Heterophase synthesis of cobalt ferrite. *Fine Chem. Technol.* 2021;16(6):502–511. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-6-502-511>
5. Isaev I.M., Kostishin V.G., Korovushkin V.V., et al. Magnetic and Radio-Absorbing Properties of Polycrystalline $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ Spinel Ferrite. *Tech. Phys.* 2021;66(11):1216–1220. <https://doi.org/10.1134/S1063784221090085> [Original Russian Text: Isaev I.M., Kostishin V.G., Korovushkin V.V., Salogub D.V., Shakirzyanov R.I., Timofeev A.V., Mironovich A.Yu. Magnetic and Radio-Absorbing Properties of Polycrystalline $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$ Spinel Ferrite. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.* 2021;91(9):1376–1380 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51217.74-21>]
6. Isaev I.M., Kostishin V.G., Korovushkin V.V., et al. Crystal chemistry and magnetic properties of polycrystalline spinel ferrites $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021;66(12):1917–1924. <https://doi.org/10.1134/S0036023621120056>

8. Пунда А.Ю., Гафарова К.П., Живулин В.Е., Чернуха А.С., Зыкова А.Р., Гудкова С.А., Песин Л.А., Вяткин Г.П., Винник Д.А. Синтез и структура гексаферрита бария $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0\text{--}1$). *Журн. общей химии*. 2024;94(2): 285–291. <https://doi.org/10.31857/s0044460x24020149>
9. Maksoud M.I.A.A., El-Ghandour A., Ashour A.H., Atta M.M., Abdelhaleem S., El-Hanbaly A.H., Fahim R.A., Kassem S.M., Shalaby M.S., Awed A.S. La^{3+} doped $\text{LiCo}_{0.25}\text{Zn}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrite nanocrystals: Insights on structural, optical and magnetic properties. *J. Rare Earths*. 2021;39(1):75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.12.017>
10. Khan M.A., Sabir M., Mahmood A., Asghar M., Mahmood K., Khan M.A., Ahmad I., Sher M., Warsi M.F. High frequency dielectric response and magnetic studies of $\text{Zn}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanocrystalline ferrites synthesized via micro-emulsion technique. *Magn. Magn. Mater.* 2014;360:188–192. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.02.059>
11. Ahmad I., Abbas T., Ziya A.B., Maqsood A. Structural and magnetic properties of erbium doped nanocrystalline Li–Ni ferrites. *Ceram. Int.* 2014;40(6):7941–7945. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.142>
12. Jiang J., Liangchao L., Feng X. Structural analysis and magnetic properties of Gd-doped Li–Ni ferrites prepared using rheological phase reaction method. *J. Rare Earths*. 2007;25(1):79–83. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60049-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60049-0)
13. Mahmoudi M., Kavanlouei M., Maleki-Ghaleh H. Effect of composition on structural and magnetic properties of nanocrystalline ferrite $\text{Li}_{0.5}\text{Sm}_x\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$. *Powd. Metall. Met. Ceram.* 2015;54:31–39. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9676-9>
14. Nikumbh A.K., Pawar R.A., Nighot D.V., Gugale G.S., Sangale M.D., Khanvilkar M.B., Nagawade A.V. Structural, electrical, magnetic and dielectric properties of rare-earth substituted cobalt ferrites nanoparticles synthesized by the co-precipitation method. *J. Magn. Magn. Mater.* 2014;355:201–209. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.11.052>
15. Садыков С.А., Каллаев С.Н., Эмиров Р.М., Алиханов Н.М.-Р. Электрические свойства керамики BiFeO_3 , легированной Sm. *Физика твердого тела*. 2023;65(10):1727–1736. <https://doi.org/10.61011/FTT.2023.10.56320.149>
16. Хабиров Р.Р., Масс А.В., Кузьмин Р.И., Руктуев А.А., Черкасова Н.Ю., Агафонов М.Ю., Королева В.А., Миллер А.А. Особенности формирования структуры и свойств Mn–Zn-ферритов, полученных методом золь-гель синтеза. *Письма в ЖТФ*. 2024;50(9):21–26. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.09.57563.19834>
17. Lysenko E.N., Vlasov V.A., Nikolaeva S.A., Nikolaev E.V. TG, DSC, XRD, and SEM studies of the substituted lithium ferrite formation from milled $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3$ precursors. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2023;148(4):1445–1453. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11665-1>
18. Lysenko E.N., Surzhikov A.P., Astafyev A.L. Thermomagnetometric analysis of lithium ferrites. *J. Therm. Anal. Colorim.* 2019;136(2):441–445. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7678-9>
19. Lysenko E.N., Nikolaeva S.A., Surzhikov A.P., Ghyngazov S.A., Plotnikova I.V., Zhuravlev A., Zhuravleva E.V. Electrical and magnetic properties of ZrO_2 -doped lithium-titanium-zinc ferrite ceramics. *Ceram. Int.* 2019;45(16):20148–20154. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.282>
20. Ridley D.H., Lessoff H., Childress J.D. Effect of lithium and oxygen losses on magnetic and crystallographic properties of spinel lithium ferrite. *J. Am. Ceram. Soc.* 1970;53(6):304–311. <https://doi.org/10.1111/J.1151-2916.1970.TB12113.X>
- [Original Russian Text: Isaev I.M., Kostishin V.G., Korovushkin V.V., Shipko M.N., Timofeev A.V., Mironovich A.Yu., Salogub D.V., Shakirzyanov R.I. Crystal chemistry and magnetic properties of polycrystalline spinel ferrites $\text{Li}_{0.33}\text{Fe}_{2.29}\text{Zn}_{0.21}\text{Mn}_{0.17}\text{O}_4$. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*. 2021;66(12):1792–1800 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044457X21120059>]
7. Kareva K.V., Suraev A.S., Chervinskaya A.S., Dotsenko O.A., Kushnarev B.O., Minin R.V., Zhuravlev V.A., Wagner D.V. Structural characteristics and magnetic properties of $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrimagnets synthesized by the ceramic method. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2023;66(12):5–11 (in Russ.).
8. Punda A.Yu., Gafarova K.P., Zhivulin V.E., Chernukha A.S., Zykova A.R., Gudkova S.A., Pesin L.A., Vyatkin G.P., Vinnik D.A. Synthesis and structure of barium hexaferrite $\text{BaFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0\text{--}1$). *Zhurnal obshchei khimii*. 2024;94(2):285–291 (in Russ.). <https://doi.org/10.3157/s0044460x24020149>
9. Maksoud M.I.A.A., El-Ghandour A., Ashour A.H., Atta M.M., Abdelhaleem S., El-Hanbaly A.H., Fahim R.A., Kassem S.M., Shalaby M.S., Awed A.S. La^{3+} doped $\text{LiCo}_{0.25}\text{Zn}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel ferrite nanocrystals: Insights on structural, optical and magnetic properties. *J. Rare Earths*. 2021;39(1):75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.12.017>
10. Khan M.A., Sabir M., Mahmood A., Asghar M., Mahmood K., Khan M.A., Ahmad I., Sher M., Warsi M.F. High frequency dielectric response and magnetic studies of $\text{Zn}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanocrystalline ferrites synthesized via micro-emulsion technique. *Magn. Magn. Mater.* 2014;360:188–192. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.02.059>
11. Ahmad I., Abbas T., Ziya A.B., Maqsood A. Structural and magnetic properties of erbium doped nanocrystalline Li–Ni ferrites. *Ceram. Int.* 2014;40(6):7941–7945. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.142>
12. Jiang J., Liangchao L., Feng X. Structural analysis and magnetic properties of Gd-doped Li–Ni ferrites prepared using rheological phase reaction method. *J. Rare Earths*. 2007;25(1):79–83. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(07\)60049-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(07)60049-0)
13. Mahmoudi M., Kavanlouei M., Maleki-Ghaleh H. Effect of composition on structural and magnetic properties of nanocrystalline ferrite $\text{Li}_{0.5}\text{Sm}_x\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$. *Powd. Metall. Met. Ceram.* 2015;54:31–39. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9676-9>
14. Nikumbh A.K., Pawar R.A., Nighot D.V., Gugale G.S., Sangale M.D., Khanvilkar M.B., Nagawade A.V. Structural, electrical, magnetic and dielectric properties of rare-earth substituted cobalt ferrites nanoparticles synthesized by the co-precipitation method. *J. Magn. Magn. Mater.* 2014;355:201–209. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.11.052>
15. Sadykov S.A., Kallaev S.N., Emirov R.M., Alikhanov N.M.-R. Electrical properties of Sm-doped BiFeO_3 ceramics. *Phys. Solid State*. 2023;65(10):1654–1663. <https://doi.org/10.61011/PSS.2023.10.57217.149>
- [Original Russian Text: Sadykov S.A., Kallaev S.N., Emirov R.M., Alikhanov N.M.-R. Electrical properties of Sm-doped BiFeO_3 ceramics. *Fizika tverdogo tela*. 2023;65(10):1727–1736 (in Russ.). <https://doi.org/10.61011/FTT.2023.10.56320.149>]
16. Khabirov R.R., Mass A.V., Kuzmin R.I., Ruktuev A.A., Cherkasova N.Yu., Agafonov M.Yu., Koroleva V.A., Miller A.A. Features of the formation of the structure and properties of Mn–Zn ferrites obtained by sol-gel synthesis. *Tech. Phys. Lett.* 2024;50(9):17–21. <https://doi.org/10.61011/TPL.2024.05.58414.19834>

21. Surzhikov A.P., Frangulyan T.S., Ghyngazov S.A., Lysenko E.N. Investigation of structural states and oxidation processes in $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_{4-8}$ using TG analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012;108(3):1207–1212. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1734-z>
22. Bulai G., Diamandescu L., Dumitru I., Gurlui S., Feder M., Caltun O.F., Effect of rare earth substitution in cobalt ferrite bulk materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;390:123–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.089>
23. Mohanty V., Cheruku R., Vijayan L., Govindaraj G. Ce-substituted Lithium Ferrite: Preparation and Electrical Relaxation Studies. *J. Mater. Sci. Technol.* 2014;30(4):335–341. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.10.028>
24. Al-Hilli M.F., Li S., Kassim K.S. Structural analysis, magnetic and electrical properties of samarium substituted lithium–nickel mixed ferrites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2012;324(5):873–879. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.10.005>
25. An S.Y., Shim I.B., Kim C.S. Synthesis and magnetic properties of LiFe_5O_8 powders by a sol–gel process. *J. Magn. Magn. Mater.* 2005;290–291:1551–1554. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.244>
26. Mazen S.A., Abu-Elsaad N.I. Characterization and magnetic investigations of germanium-doped lithium ferrite. *Ceram. Int.* 2014;40(7):11229–11237. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.03.167>
27. Abdellatif M.H., El-Komy G.M., Azab A.A., Magnetic characterization of rare earth doped spinel ferrite. *J. Magn. Magn. Mater.* 2017;442:445–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.07.020>
28. Berbenni V., Marini A., Capsoni D. Solid state reaction study of the system $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$. *Z. Naturforschung – Sect. J. Phys. Sci.* 1998;53:997–1003. <https://doi.org/10.1515/zna-1998-1212>
- [Original Russian Text: Khabirov R.R., Mass A.V., Kuzmin R.I., Rukhtuev A.A., Cherkasova N.Yu., Agafonov M.Yu., Koroleva V.A., Miller A.A. Features of the formation of the structure and properties of Mn–Zn ferrites obtained by sol-gel synthesis. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.* 2024;50(9):21–26 (in Russ.). <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.09.57563.19834>]
17. Lysenko E.N., Vlasov V.A., Nikolaeva S.A., Nikolaev E.V. TG, DSC, XRD, and SEM studies of the substituted lithium ferrite formation from milled $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Li}_2\text{CO}_3$ precursors. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2023;148(4):1445–1453. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11665-1>
18. Lysenko E.N., Surzhikov A.P., Astafyev A.L. Thermomagnetometric analysis of lithium ferrites. *J. Therm. Anal. Colorim.* 2019;136(2):441–445. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7678-9>
19. Lysenko E.N., Nikolaeva S.A., Surzhikov A.P., Ghyngazov S.A., Plotnikova I.V., Zhuravlev A., Zhuravleva E.V. Electrical and magnetic properties of ZrO_2 -doped lithium-titanium-zinc ferrite ceramics. *Ceram. Int.* 2019;45(16):20148–20154. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.282>
20. Ridley D.H., Lessoff H., Childress J.D. Effect of lithium and oxygen losses on magnetic and crystallographic properties of spinel lithium ferrite. *J. Am. Ceram. Soc.* 1970;53(6):304–311. <https://doi.org/10.1111/J.1151-2916.1970.TB12113.X>
21. Surzhikov A.P., Frangulyan T.S., Ghyngazov S.A., Lysenko E.N. Investigation of structural states and oxidation processes in $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_{4-8}$ using TG analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2012;108(3):1207–1212. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1734-z>
22. Bulai G., Diamandescu L., Dumitru I., Gurlui S., Feder M., Caltun O.F., Effect of rare earth substitution in cobalt ferrite bulk materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;390:123–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.089>
23. Mohanty V., Cheruku R., Vijayan L., Govindaraj G. Ce-substituted Lithium Ferrite: Preparation and Electrical Relaxation Studies. *J. Mater. Sci. Technol.* 2014;30(4):335–341. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.10.028>
24. Al-Hilli M.F., Li S., Kassim K.S. Structural analysis, magnetic and electrical properties of samarium substituted lithium–nickel mixed ferrites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2012;324(5):873–879. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.10.005>
25. An S.Y., Shim I.B., Kim C.S. Synthesis and magnetic properties of LiFe_5O_8 powders by a sol–gel process. *J. Magn. Magn. Mater.* 2005;290–291:1551–1554. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.244>
26. Mazen S.A., Abu-Elsaad N.I. Characterization and magnetic investigations of germanium-doped lithium ferrite. *Ceram. Int.* 2014;40(7):11229–11237. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.03.167>
27. Abdellatif M.H., El-Komy G.M., Azab A.A., Magnetic characterization of rare earth doped spinel ferrite. *J. Magn. Magn. Mater.* 2017;442:445–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.07.020>
28. Berbenni V., Marini A., Capsoni D. Solid state reaction study of the system $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$. *Z. Naturforschung – Sect. J. Phys. Sci.* 1998;53:997–1003. <https://doi.org/10.1515/zna-1998-1212>

Об авторах

Елькина Юлия Сергеевна, аспирант, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники диэлектриков и полупроводников, Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30). E-mail: ysm7@tpu.ru. Scopus Author ID 58892380200, ResearcherID HHS-0003-2022, SPIN-код РИНЦ 6717-1540, <https://orcid.org/0000-0002-2708-9872>

Власов Виталий Анатольевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники диэлектриков и полупроводников, Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30). E-mail: vlvtan@tpu.ru. Scopus Author ID 7202194125, ResearcherID K-1257-2013, SPIN-код РИНЦ 2003-8431, <https://orcid.org/0000-0002-5946-2117>

Лысенко Елена Николаевна, д.т.н., профессор, заведующая лабораторией, проблемная научно-исследовательская лаборатория электроники диэлектриков и полупроводников, Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30). E-mail: lysenkoen@tpu.ru. Scopus Author ID 25027787100, ResearcherID K-1582-2013, SPIN-код РИНЦ 6536-9390, <https://orcid.org/0000-0002-5093-2207>

Суржиков Анатолий Петрович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры, отделение контроля и диагностики, Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30). E-mail: surzhikov@tpu.ru. Scopus Author ID 6603494148, ResearcherID K-1224-2013, SPIN-код РИНЦ 1875-0293, <https://orcid.org/0000-0003-2795-398X>

About the Authors

Yuliya S. Elkina, Postgraduate Student, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics, Research School of High-Energy Physics, Tomsk Polytechnic University (30, Lenina pr., Tomsk, 634034, Russia). E-mail: ysm7@tpu.ru. Scopus Author ID 58892380200, ResearcherID HHS-0003-2022, RSCI SPIN-code 6717-1540, <https://orcid.org/0000-0002-2708-9872>

Vitaly A. Vlasov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics, Research School of High-Energy Physics, Tomsk Polytechnic University (30, Lenina pr., Tomsk, 634034, Russia). E-mail: vlvtan@tpu.ru. Scopus Author ID 7202194125, ResearcherID K-1257-2013, RSCI SPIN-code 2003-8431, <https://orcid.org/0000-0002-5946-2117>

Elena N. Lysenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory, Research Laboratory for Electronics, Semiconductors and Dielectrics, Research School of High-Energy Physics, Tomsk Polytechnic University (30, Lenina pr., Tomsk, 634034, Russia). E-mail: lysenkoen@tpu.ru. Scopus Author ID 25027787100, ResearcherID K-1582-2013, RSCI SPIN-code 6536-9390, <https://orcid.org/0000-0002-5093-2207>

Anatoly P. Surzhikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department, Division for Testing and Diagnostics, School of Non-Destructive Testing, Tomsk Polytechnic University (30, Lenina pr., Tomsk, 634034, Russia). surzhikov@tpu.ru. Scopus Author ID 6603494148, ResearcherID K-1224-2013, RSCI SPIN-code 1875-0293, <https://orcid.org/0000-0003-2795-398X>