



Конденсированные среды и межфазные границы

Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3115>

ISSN 1606-867X

Поступила в редакцию 20.08.2020

eISSN 2687-0711

Принята к публикации 07.10.2020

Опубликована онлайн 25.12.2020

УДК 536.46, 549.73, 537.86, 537.9, 537.622, 537.226.1

Синтез, микроструктурные и электромагнитные характеристики кобальт-цинкового феррита

©2020 А. И. Горячко✉, С. Н. Иванин, В. Ю. Бузько

Кубанский государственный университет,
ул. Ставропольская, 14, Краснодар 350040, Российская Федерация

Аннотация

В данной работе был синтезирован кобальт-цинковый феррит ($\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$) глицин-нитратным методом с последующим отжигом в высокотемпературной печи при температуре 1300 °С. С помощью методов энергодисперсионного и рентгенофазового анализа, а также растровой электронной микроскопии определены качественный состав и его микроструктурные характеристики.

Из анализа микрофотографий обнаружено, что полученный после термического отжига микропорошок кобальт-цинкового феррита обладает средним размером частиц 1.7 ± 1 мкм. Анализ рентгенограммы показал, что отожжённый микропорошок кобальт-цинкового феррита имеет кубическую кристаллическую структуру с параметром решетки $a = 8.415$ Å. Используя уравнения Шеррера и Вильямсона-Холла рассчитаны средние размеры областей когерентного рассеяния, соизмеримые с размером кристаллитов: по Шерреру $D = 28.26$ нм и по Вильямсону-Холлу $D = 33.59$ нм и значение микронапряжений $\epsilon = 5.62 \times 10^{-4}$ в структуре феррита.

С помощью векторного анализатора цепей определены электромагнитные свойства композитного материала на основе синтезированного кобальт-цинкового феррита. Методом Николсона-Росса-Вейра определены частотные зависимости значений магнитной и диэлектрической проницаемостей из измеренных S-параметров композитного материала (50 % ферритового наполнителя по массе и 50 % парафина) в диапазоне 0.015–7 ГГц. При анализе графиков зависимости магнитной проницаемости от частоты электромагнитного излучения была обнаружена резонансная частота $f_r \approx 2.3$ ГГц. Обнаруженный магнитный резонанс области УВЧ диапазона позволяет считать полученный материал перспективным для использования в качестве эффективных поглотителей электромагнитного излучения в диапазоне 2–2.5 ГГц.

Ключевые слова: глицин-нитратный синтез, кобальт-цинковый феррит, ферритмагнетик, микроструктура, композитные материалы, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость.

Для цитирования: Горячко А. И., Иванин С. Н., Бузько В. Ю. Синтез, микроструктурные и электромагнитные характеристики кобальт-цинкового феррита. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020; 22(4): 446–452. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3115>

For citation: Goryachko A.I., Ivanin S.N., Buz'ko V. Yu. Synthesis, microstructural and electromagnetic characteristics of cobalt-zinc ferrite. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020; 22(4): 446–452. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3115>

✉ Горячко Александр Иванович, e-mail: Alexandr_g_i@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

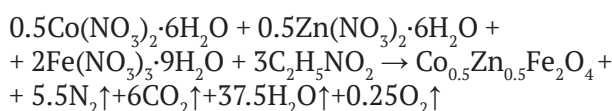
Разработка методов получения порошковых металл-оксидных магнитных материалов является актуальной задачей в настоящее время. Подобными материалами выступают ферриты, являющихся твердыми растворами на основе оксида железа (III) [1–3]. Как известно в промышленности довольно часто используются ферритовые шпинели на основе цинка. В качестве основных являются марганец-цинковые и никель-цинковые ферриты с кубической кристаллической решеткой. Однако недостатком данных ферритов является довольно низкая резонансная частота. Замещение марганца или никеля на кобальт позволяет значительно изменить магнитные свойства, а именно сместить резонанс в более высокие частоты и, следовательно, увеличить предел Сноека [4].

В настоящее время существуют различные методы получения как нано- так и микроразмерных порошков ферритов по керамической технологии и из растворов солей [5–7]. Метод получения в значительной степени влияет на форму и размер частиц, что в совокупности определяет микроструктурные и электромагнитные свойства материала [8–10]. Так, например, одним из самых распространенных методов получения ферритового порошка является керамический синтез [11–14]. Однако недостатком данного метода является длительный высокотемпературный отжиг, что приводит к неоднородности частиц, проявлению анизотропии и к слабой воспроизводимости электромагнитных свойств, поэтому перспективными методами получения ферритовых материалов выступают химические синтезы. При получении феррита с помощью химического синтеза можно снизить энергозатраты и значительно повысить однородность частиц [15]. К основным химическим методам получения ферритов из солей нитратов металлов относятся: нитрат-мочевинный [16, 17], нитрат-цитратный [18, 19], а также использованный в данной работе глицин-нитратный метод [20–22] и др. Преимущество глицин-нитратного метода в том, что необходимая температура смеси при которой проходит пирохимическая реакция, составляет примерно 150 °С, что значительно ниже, чем у нитрат-мочевинного и нитрат-цитратного синтезов.

Целью данной работы был синтез кобальт-цинкового феррита глицин-нитратным методом, высокотемпературный отжиг при температуре 1300 °С и исследование его микроструктурных и электромагнитных характеристик.

2. Экспериментальная часть

Для синтеза $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита были использованы реактивы: $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х.ч., РФ), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х.ч., РФ), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (ч.д.а., РФ), аминокислота (C₂H₅NO₂, х.ч., РФ). Используемые нитраты металлов и аминокислота были взяты в необходимых стехиометрических количествах и предварительно растворены в бидистиллированной воде. Затем полученную смесь постепенно нагревали в течение 1 часа до температуры 150 °С при постоянном перемешивании. Через определенное время, после испарения излишнего объема бидистиллированной воды, раствор представлял из себя вязкий гелеобразный продукт. При дальнейшем нагревании полученный вязкий гель самовоспламенялся с последующим горением в течение 5–6 секунд. В процессе термолиза образовывалось высокопористое слабомагнитное пенообразное вещество светло-коричневого цвета. Уравнение протекающей пирохимической реакции можно представить следующим образом:



После завершения реакции и последующего остывания образец феррита был измельчен в керамической ступке в течение 30 минут. Затем, для удаления остаточных примесей, полученный синтезированный порошок прокаливали в высокотемпературной печи «Nabertherm Top 16/R + V400» при температуре 1300 °С в течение 1 часа. После остывания прокаленный порошок феррита дополнительно измельчали в керамической ступке в течение 10 минут до получения однородного микропорошка.

Фотографии микроструктуры исследуемого $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита были получены на растровом электронном микроскопе «JEOL JSM-7500F», а энергодисперсионный анализ выполнен с использованием приставки «INCA X-Sight».

Рентгенофазовый анализ образца кобальт-цинкового феррита проводился с использованием порошкового дифрактометра «Shimadzu XRD-7000». Образец был исследован при комнатной температуре в диапазоне углов 2θ от 3° до 70° с шагом сканирования 0.02°.

Для исследования электромагнитных свойств кобальт-цинкового феррита был изготовлен композитный материал на основе парафина с концентрацией ферритового наполнителя 50 % по массе. Образец был изготовлен в форме то-

роида толщиной 4 мм, с внешним 7 мм и внутренним 3.05 мм диаметрами. Электромагнитные характеристики (магнитная и диэлектрическая проницаемости) были рассчитаны из экспериментально измеренных S-параметров с использованием векторного анализатора цепей «Deerace KC901V» в диапазоне 0.015–7 ГГц.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен спектр энергодисперсионного анализа (ЭДА) с выбранной зоной анализа для исследуемого микропорошка $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, отожженного при температуре 1300 °С в течение 1 часа. Полученные результаты ЭДА анализа показывают наличие основных элементов: Co (12.68 %), Zn (12.24 %), Fe (45.21 %) и O (29.86 %) в составе исследуемого микропорошка.

На рис. 2а, представлена фотография микропорошка отожженного $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Исходя из анализа полученной фотографии, можно отме-

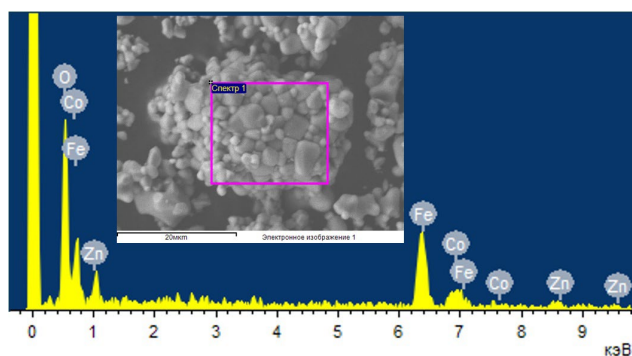


Рис. 1. Спектр энергодисперсионного анализа с выбранной зоной для исследуемого $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, отожженного при температуре 1300 °С

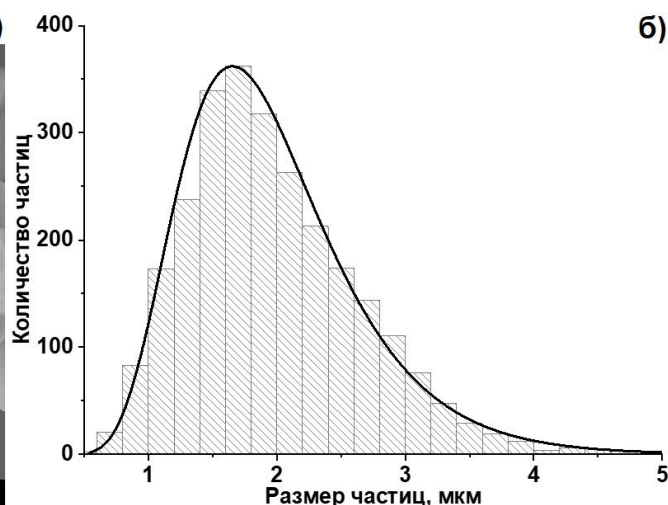
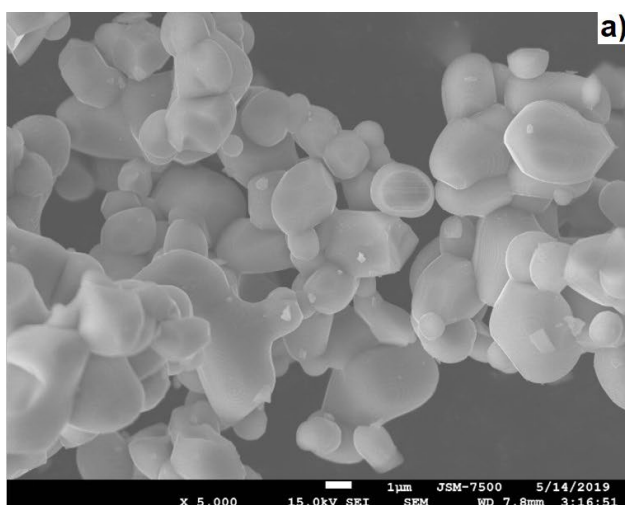


Рис. 2. Микрофотография исследуемого порошка при увеличении $\times 5000$ (а) и гистограмма распределения частиц по размеру (б) для $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ после отжига в течение 1 часа при температуре 1300 °С

тить, что после термического отжига при температуре 1300 °С исследуемый образец представлял из себя микрочастицы сферической формы. При детальном рассмотрении микроструктуры порошка можно наблюдать как отдельные, так и сплавленные частицы феррита. На основании анализа микрофотографий исследуемого $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ была рассчитана гистограмма распределения частиц по размеру в зависимости от их количества (рис. 4б). Гистограмма распределения частиц по размеру была получена на основании анализа 2700 частиц с помощью программы “ImageJ”. Для каждой отдельной частицы определяли эквивалентный диаметр по результатам измерений ее длины и ширины по методике из работы [23]. На основании полученных данных из гистограммы отожженного $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита можно наблюдать относительно узкое распределение частиц по размеру. Рассчитанный средний размер частиц синтезированного кобальт-цинкового феррита составляет 1.7 ± 1 мкм, что свидетельствует о высокой степени однородности частиц в исследованном образце.

На рис. 3 представлена рентгенограмма для исследуемого микропорошка $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, а обработанные данные рентгенограммы представлены в табл. 1.

Анализ полученных данных показывает, что характерные пики на рентгенограмме соответствуют чистой кубической шпинельной фазе [24]. Используя уравнение (1), определено, что отожженный микропорошок феррита имеет кубическую структуру с параметром кристаллической решетки $a = 8.415$ Å. Рассчитанный параметр кристаллической решетки для исследуемо-

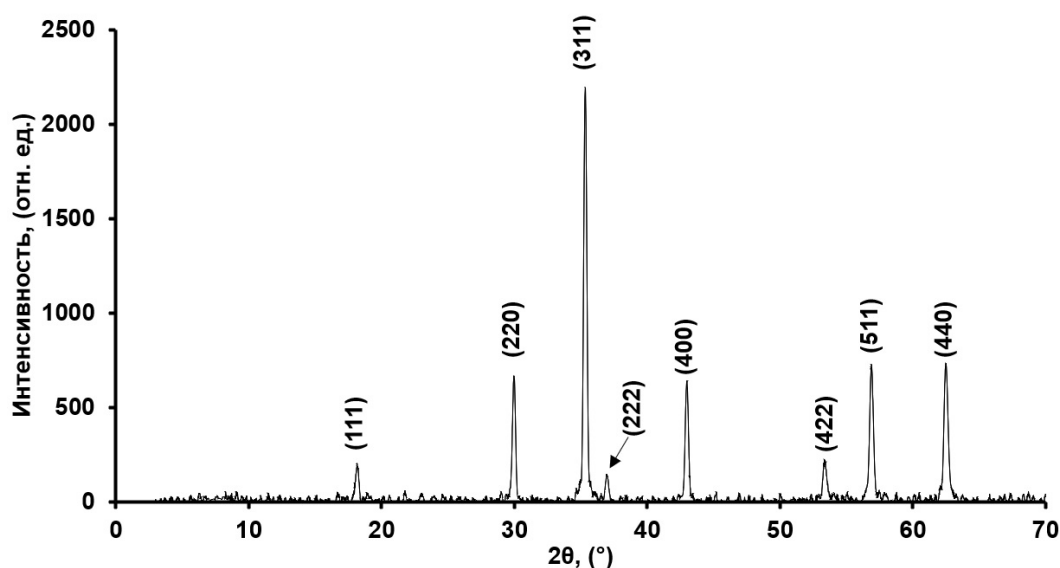


Рис. 3. Рентгенограмма исследуемого микропорошка $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ после отжига в течение 1 часа при температуре 1300°C

Таблица 1. Данные рентгенограммы для исследуемого $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита

№ пика	угол, 2θ	Интенсивность, [%]	d-spacing, [Å]	FWHM, рад
1	18.18	9.6	4.876	0.00489
2	29.98	29.6	2.978	0.00471
3	35.36	100	2.536	0.00488
4	36.96	7.6	2.430	0.00488
5	43.00	20.3	2.102	0.00506
6	53.34	8.1	1.716	0.00617
7	56.90	26	1.617	0.00610
8	62.48	34.3	1.485	0.00612

го феррита хорошо согласуется с данными работы [25], значение которого составляет $a = 8.418 \text{ \AA}$, для $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита после 6-часового отжига при 1000°C [25].

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{(h^2 + l^2 + k^2)}{a^2}. \quad (1)$$

Средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) – D , соизмеримым с размером кристаллитов, для образца был рассчитан из данных рентгенофазового анализа (РФА) по формуле Шеррера (2) [19]:

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}. \quad (2)$$

где $k = 0.9$ для сферических частиц; $\lambda = 0.154$ – длина волны CuK_α излучения, нм; β – значение полуширины на полувысотах интегральных пиков, рад., θ – брэгговский угол, рад;

Рассчитанное значение ОКР по Шерреру для исследуемого феррита составляет: $D = 28.26$ нм.

Дополнительно для исследуемого феррита были рассчитаны значения ОКР и микронапряжений с помощью метода Вильямсона–Холла (рис. 3) по уравнению (3):

$$\text{FWHM} \cdot \cos\theta = \frac{\lambda}{D} + 4\epsilon \cdot \sin\theta, \quad (3)$$

где FWHM – значение полуширины на полувысотах интегральных пиков, рад; θ – брэгговский угол, рад; $\lambda = 0.154$ – длина волны CuK_α излучения, нм; D – искомый размер ОКР, нм; ϵ – значение микронапряжения.

Расчет размеров ОКР и микронапряжений по методу Вильямсона–Холла для микропорошка $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ дал следующие результаты: размеры ОКР – 33.59 нм, что незначительно отличается от данных, полученных по методу Шеррера; значение микронапряжений $\epsilon = 5.62 \times 10^{-4}$.

Значения магнитной ($\mu = \mu' + i\mu''$) и диэлектрической ($\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$) проницаемости в комплексном виде для композитного материала на

основе исследуемого $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ рассчитывали из экспериментально измеренных значений S_{11} и S_{21} по алгоритму Николсона–Росса–Вейра [26–29]. Тангенсы углов магнитных и диэлектрических потерь были вычислены по следующим формулам (4):

$$\text{tg } \delta_{\mu} = \frac{\mu''}{\mu'} \quad \text{tg } \delta_{\epsilon} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

На рис. 4а представлены графики зависимости μ' и μ'' для исследуемого композитного материала ($\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /парафин = 1/1 по массе) в диапазоне частот 0.015–7 ГГц. В области низких частот (0.015–0.5 ГГц) наблюдается незначительное уменьшение μ' со значения 1.85 до 1.69. Однако с увеличением частоты электромагнитного излучения (> 0.5 ГГц) на графике присутствует ярко выраженное резкое уменьшение значения μ' до 1.041 при частоте 7 ГГц. При анализе

данных μ'' обнаружено, что максимальное значение магнитных потерь наблюдается на частоте $f_r \approx 2.3$ ГГц, что хорошо согласуется с данными работы [30], где максимальное значение магнитных потерь наблюдается в диапазоне 2.2–2.4 ГГц [30]. Обнаруженный максимум μ'' , значение которого равно 0.323, соответствует резонансной частоте для изготовленного композитного материала. На основании полученных данных μ' и μ'' рассчитан тангенс угла магнитных потерь на резонансной частоте, который равен $\text{tg } \delta_{\mu} \approx 0.252$.

Графики зависимостей ϵ' и ϵ'' для изготовленного композитного материала на основе $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ показаны на рис. 4б. Согласно экспериментальным данным видно, что значение как для ϵ' , так и ϵ'' для исследуемого композитного образца практически не изменяется во всем исследуемом частотном диапазоне, на основании чего можно сделать вывод, что среднее значение диэлектрической проницаемости для кобальт-цинкового феррита в исследуемом диапазоне частот составляет $\epsilon' \approx 3.12$ и $\epsilon'' \approx 0.014$. Из рассчитанных данных ϵ' и ϵ'' следует, что среднее значение тангенса угла диэлектрических потерь во всем измеряемом диапазоне составляет $\text{tg } \delta_{\epsilon} \approx 0.0045$.

Так как полученные значения для ϵ' , ϵ'' и $\text{tg } \delta_{\epsilon}$ являются достаточно низкими и практически не изменяются во всем исследуемом диапазоне частот, можно сделать вывод, что диэлектрические параметры незначительно влияют на радиопоглощающие (за исключением смещения резонансной частоты) или радиозащитные характеристики исследованного композитного материала.

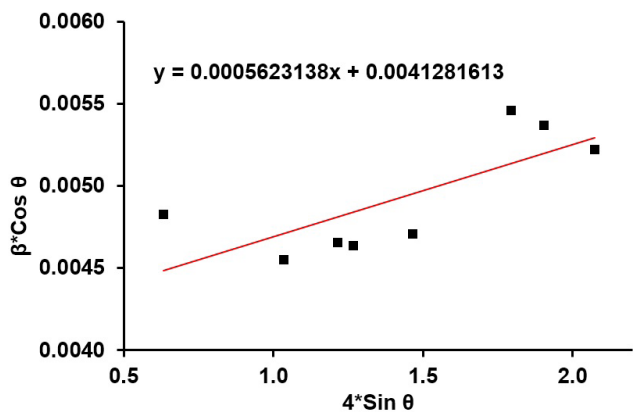


Рис. 4. График Вильямсона–Холла для исследуемого $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

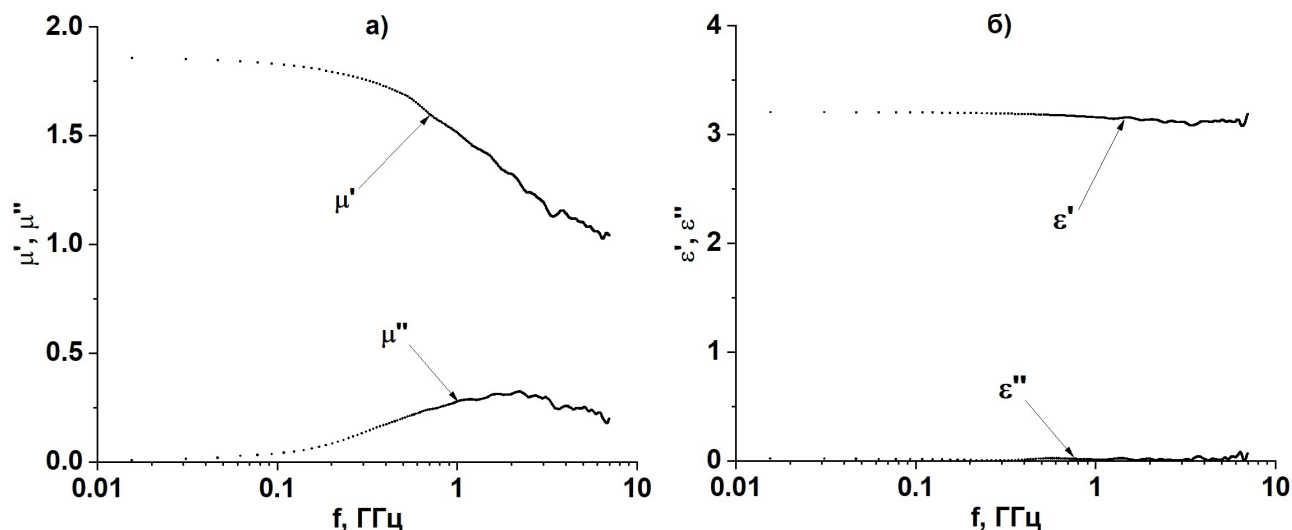


Рис. 5. Графики частотных зависимостей магнитной (а) и диэлектрической (б) проницаемости для изготовленного композитного материала на основе $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

4. Заключение

Таким образом, глицин-нитратным синтезом после одночасового термического отжига при 1300 °С и последующего растирания был получен гранулированный феррит $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ с гранулами микронного размера, состоящими (по данным РФА) из нанокристаллов со средними размерами ~25–35 нм. Методом ЭДА и РФА подтверждено, что синтезированный феррит после термического отжига не содержал примесей других элементов или наличия побочных фаз. Анализ данных РФА показал, что исследуемый $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррит обладает кубической кристаллической решеткой. Из полученных микрофотографий и гистограммы распределения частиц по размеру установлено, что после высокотемпературного отжига $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при температуре 1300 °С в течение 1 часа полученный порошок феррита обладает достаточно высокой однородностью по форме и размеру частиц. При анализе графиков зависимости магнитной проницаемости от частоты электромагнитного излучения был обнаружен магнитный резонанс на частоте 2.3 ГГц. Обнаруженный магнитный резонанс области УВЧ диапазона позволяет считать полученный материал перспективным для использования в качестве эффективных поглотителей электромагнитного излучения в диапазоне 2–2.5 ГГц.

Благодарности

Работа выполнена на базе НОЦ ЦКП «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» Кубанского государственного университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Thakur P., Chahar D., Taneja S., Bhalla N. and Thakur A. A review on MnZn ferrites: Synthesis, characterization and applications. *Ceramics International*. 2020;46(10): 15740–15763. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.287>
2. Pullar R. C. Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics. *Progress in Materials Science*. 2012;57(7): 1191–1334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>
3. Kharisov B. I., Dias H. V. R., Kharissova O. V. Mini-review: Ferrite nanoparticles in the catalysis. *Arabian Journal of Chemistry*. 2019;12(7): 1234–1246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.10.049>

4. Stergiou C. Microstructure and electromagnetic properties of Ni-Zn-Co ferrite up to 20 GHz. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016;2016: 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/1934783>
5. Economos G. Magnetic ceramics: I, General methods of magnetic ferrite preparation. *Journal of the American Ceramic Society*. 1955;38(7): 241–244. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1955.tb14938.x>
6. Yurkov G. Y., Shashkeev K. A., Kondrashov S. V., Popkov O. V., Shcherbakova G. I., Zhigalov D. V., Pankratov D. A., Ovchenkov E. A., Koksharov Y. A. Synthesis and magnetic properties of cobalt ferrite nanoparticles in polycarbosilane ceramic matrix. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;686: 421–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.025>
7. Karakaş Z. K., Boncukçuoğlu R., Karakaş İ. H. The effects of fuel type in synthesis of NiFe_2O_4 nanoparticles by microwave assisted combustion method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016; 707: 012046. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/707/1/012046>
8. Shirsath S. E., Jadhav S. S., Mane M. L., Li S. *Handbook of sol-gel science and technology*. Springer, Cham.; 2016. p. 1–41. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19454-7_125-1
9. Vyzulin S. A., Kalikintseva D. A., Miroshnichenko E. L., Buz'ko V. Y., Goryachko A. I. Microwave absorption properties of nickel-zinc ferrites synthesized by different means. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018;82(8): 943–945. DOI: <https://doi.org/10.3103/s1062873818080439>
10. Janasi S. R., Emura M., Landgraf F. J. G., Rodrigues D. The effects of synthesis variables on the magnetic properties of coprecipitated barium ferrite powders. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002;238(2-3): 168–172. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0304-8853\(01\)00857-5](https://doi.org/10.1016/s0304-8853(01)00857-5)
11. Ahmed Y. M. Z. Synthesis of manganese ferrite from non-standard raw materials using ceramic technique. *Ceramics International*. 2010;36(3): 969–977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.11.020>
12. Mahadule R. K., Arjunwadkar P. R., Mahabole M. P. Synthesis and characterization of $\text{Ca}_x\text{Sr}_y\text{Ba}_{1-x-y}\text{Fe}_{12-z}\text{La}_z\text{O}_{19}$ by standard ceramic method. *International Journal of Metals*. 2013;2013: 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/198970>
13. Tarța V. F., Chicinaș I., Marinca T. F., Neamțu B. V., Popa F., Prica C. V. Synthesis of the nanocrystalline/nanosized NiFe_2O_4 powder by ceramic method and mechanical milling. *Solid State Phenomena*. 2012;188: 27–30. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.188.27>
14. Pradhan A. K., Saha S., Nath T. K. AC and DC electrical conductivity, dielectric and magnetic properties of $\text{Co}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Fe}_{2-x}\text{Mo}_x\text{O}_4$ ($x=0.0, 0.1$ and 0.2) ferrites. *Applied Physics A*. 2017;123(11): 715. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1329-z>

15. Low Z. H., Ismail I., Tan K. S. Sintering processing of complex magnetic ceramic oxides: A comparison between sintering of bottom-up approach synthesis and mechanochemical process of top-down approach synthesis. *Sintering Technology - Method and Application*. Malin Liu (ed.). 2018: 25–43. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78654>
16. Costa A. C. F. M., Morelli M. R., Kiminami R. H. G. A. Combustion synthesis: Effect of urea on the reaction and characteristics of Ni–Zn ferrite powders. *Journal of Materials Synthesis and Processing*. 2001;9(6): 347–352. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016356623401>
17. Maleknejad Z., Gheisari K., Raouf A. H. Structure, microstructure, magnetic, electromagnetic, and dielectric properties of nanostructured Mn–Zn ferrite synthesized by microwave-induced urea-nitrate process. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2016;29(10): 2523–2534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10948-016-3572-5>
18. Jalaiah K., Chandra Mouli K., Vijaya Babu K., Krishnaiah R.V. The structural, DC resistivity and magnetic properties of Mg and Zr Co-substituted $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2018;4(2): 310–318 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2018.12.004>
19. Yue Z., Zhou J., Li L., Zhang H., Gui Z. Synthesis of nanocrystalline NiCuZn ferrite powders by sol–gel auto-combustion method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2000;208(1-2): 55–60. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0304-8853\(99\)00566-1](https://doi.org/10.1016/s0304-8853(99)00566-1)
20. Chick L. A., Pederson L. R., Maupin G. D., Bates J. L., Thomas L. E., Exarhos G. J. Glycine-nitrate combustion synthesis of oxide ceramic powders. *Materials Letters*. 1990;10(1-2): 6–12. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-577x\(90\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0167-577x(90)90003-5)
21. Salunkhe A. B., Khot V. M., Phadatare M. R., Pawar S. H. Combustion synthesis of cobalt ferrite nanoparticles—Influence of fuel to oxidizer ratio. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012;514: 91–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.10.094>
22. Martinson K. D., Cherepkova I. A., Sokolov V. V. Formation of cobalt ferrite nanoparticles via glycine-nitrate combustion and their magnetic properties. *Glass Physics and Chemistry*. 2018;44(1): 21–25. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1087659618010091>
23. Kuzmin V. A., Zagrai I. A. A comprehensive study of combustion products generated from pulverized peat combustion in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;891: 012226. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012226>
24. Maleki A., Hosseini N., Taherizadeh A. Synthesis and characterization of cobalt ferrite nanoparticles prepared by the glycine-nitrate process. *Ceramics International*. 2018;44(7): 8576–8581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.063>
25. Waje S. B., Hashim M., Wan Yusoff W. D., Abbas Z. Sintering temperature dependence of room temperature magnetic and dielectric properties of $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ prepared using mechanically alloyed nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010;322(6): 686–691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2009.10.041>
26. Nicolson A. M., Ross G. F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1970;19(4): 377–382. DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.1970.4313932>
27. Rothwell E. J., Frasc J. L., Ellison S. M., Chahal P., Ouedraogo R.O. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials. *Progress In Electromagnetics Research*. 2016;157: 31–47. DOI: <https://doi.org/10.2528/pier16071706>
28. Vicente A. N., Dip G. M., Junqueira C. The step by step development of NRW method. Proceedings Article in: *2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)*. 29 Oct. –1 Nov. 2011. 738–742. DOI: <https://doi.org/10.1109/imoc.2011.6169318>
29. Ivanin S. N., Buz'ko V. Yu., Goryachko A. I., Panyushkin V. T. Electromagnetic characteristics of heteroligand complexes of gadolinium stearate. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(8): 1623–1627. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024420080130>
30. Liu Y.-W., Zhang J., Gu L.-S., Wang L.-X., Zhang Q.-T. Preparation and electromagnetic properties of nanosized $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite. *Rare Metals*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0670-7>

Информация об авторах

Горячко Александр Иванович, аспирант кафедры теоретической физики и компьютерных технологий физико-технического факультета, Кубанский государственный университет, Краснодар, Российская Федерация; e-mail: Alexandr_g_i@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6480-353X>.

Иванин Сергей Николаевич, аспирант, Кубанский государственный университет, Краснодар, Российская Федерация; e-mail: Ivanin18071993@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9352-5970>.

Бузько Владимир Юрьевич, к. х. н., доцент кафедры радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета, Кубанский государственный университет, Краснодар, Российская Федерация; e-mail: Buzkonmr@maul.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6335-0230>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.