

УДК 54-16+54-31+54.05:542+357.226.2+537.226.3+537.621.3

СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНОГО НИКЕЛЬ-ЦИНКОВОГО ФЕРРИТА, ПОЛУЧЕННОГО РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

© 2021 г. В. Ю. Бузько¹*, И. И. Шамрай¹, М. Ю. Рябова¹, Г. В. Киреева¹, А. И. Горячко¹¹Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040 Россия

*e-mail: buzkonmr@mail.ru

Поступила в редакцию 15.03.2020 г.

После доработки 18.08.2020 г.

Принята к публикации 20.08.2020 г.

Исследованы электронные и электромагнитные свойства синтезированных образцов наноразмерного никель-цинкового феррита состава $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Микроструктурные, электронные и электромагнитные характеристики образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, приготовленных пирохимическим нитрат-мочевинным и золь–гель нитрат-цитратным методами, различались. Синтезированный пирохимическим нитрат-мочевинным методом $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ со средним размером наночастиц 33 нм обладает высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемости, тангенса угла магнитных потерь в диапазоне частот 1–7 ГГц по сравнению с образцом $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ со средним размером наночастиц 46 нм, полученным золь–гель нитрат-цитратным методом.

Ключевые слова: никель-цинковый феррит, наночастицы, электронные характеристики, электромагнитные свойства, радиопоглощение

DOI: 10.31857/S0002337X21010024

ВВЕДЕНИЕ

Наноразмерный никель-цинковый феррит эквивалентного состава $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ широко применяется в качестве эффективного магнитного радиопоглощающего наполнителя [1–5]. Электронные и электромагнитные характеристики нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, полученных разными методами, сильно различаются [6–13]. По данным работ [14–19], нанопорошки $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, полученные различными методами, имеют отличающиеся спектры оптического пропускания и светоотражения. Рассчитанные величины ширины оптической энергетической щели (E_g) для нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ варьируются от 1.45 до 2.56 эВ [14–19], что свидетельствует о различии диэлектрических проницаемостей для образцов, полученных разными методами.

Для наноразмерных материалов E_g зависит от размера наночастиц R , согласно уравнению в рамках приближения эффективной массы [20]

$$E_g = E_{bulk} + \frac{h^2}{8R^2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) - \frac{1.786e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r R^2},$$

где E_{bulk} – ширина запрещенной зоны для полупроводникового материала, m_e^* и m_h^* – эффективные массы электрона и дырки, h – константа Планка.

Таким образом, можно предполагать связь между размером наночастиц $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и E_g из оптических измерений.

Анализ опубликованных величин E_g из оптических спектров для нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ [14–19], представленных в табл. 1, позволяет считать, что корреляция между средним размером наночастиц $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и величинами E_g отсутствует. Можно сделать вывод, что на величину E_g нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ сильно влияет метод синтеза, определяющий электромагнитные характеристики, а не размер частиц.

Значения электропроводности на постоянном токе для нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (табл. 2), приведенные в работах [21–24], свидетельствуют о сильном влиянии метода синтеза на электропроводность. Ранее показано [25], что метод синтеза сильно влияет на магнитные, поглощающие и СВЧ-свойства наноразмерного $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

В данной работе исследованы свойства нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, синтезированных пирохимическим нитрат-мочевинным (НМ) и золь–гель нитрат-цитратным (ЗГНЦ) методами. Температурно-временные режимы отличались от условий синтеза в работе [25].

Таблица 1. Значения E_g для наноразмерных порошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, рассчитанные из данных оптических измерений

Метод синтеза, условия прокаливания	Размер наночастиц, нм	E_g , эВ (метод)	Источник
НМ, микроволновое сгорание	47 ± 2	1.80 (R)*	[14]
Механохимический, при 700°C	17 ± 11	2.02 (T)**	[15]
ЗГНЦ, при 400°C в течение 4 ч	9.8 ± 0.1	2.56 (T)	[16]
Золь–гель-метод с поливиниловым спиртом	8 ± 2	1.45 (T)	[17]
Золь–гель-метод с этаноламином	10.7 ± 1	2.49 (T)	[18]
ЗГНЦ	16.8 ± 1	1.98 (T)	[19]
НМ при 500°C в течение 1 ч	$33 \pm 9(\text{СЭМ})/31.8 \pm 1(\text{РФА})$	$1.70 \pm 0.03 (R)$	Данная работа
ЗГНЦ при 500°C в течение 1 ч	$46 \pm 13(\text{СЭМ})/47.3 \pm 1(\text{РФА})$	$2.01 \pm 0.04 (R)$	Данная работа

Примечание. R – спектрофотометрия диффузного отражения, T – абсорбционная спектрофотометрия.

Таблица 2. Электропроводность на постоянном токе нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$

σ , См/см					
[21]	[22]	[23]	[24]	НМ	ЗГНЦ
2.05×10^{-7}	4.44×10^{-8}	4.54×10^{-8}	1.41×10^{-6}	$(2.36 \pm 0.19) \times 10^{-8}$	$(1.45 \pm 0.15) \times 10^{-8}$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе были использованы реактивы: $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (“х. ч.”), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (“х. ч.”), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (“ч. д. а.”), лимонная кислота $\text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{COH}-\text{COOH}-\text{CH}_2-\text{COOH}$ (“х. ч.”), мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ (“х. ч.”).

Для метода ЗГНЦ исходные реактивы растворялись в бидистиллированной воде и постепенно подогревались в течение 3 ч до выпаривания воды и образования вязкого полимерного геля, который в нагретом состоянии переносился в керамический тигель для дальнейшего термолиза со скоростью 15°C/мин. При $t > 300^\circ\text{C}$ металлокомплексный гель выгорал с образованием магнитного порошка $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, который для удаления остатков примесей прокаливался при 500°C в течение 1 ч на воздухе при непрерывном перемешивании.

При НМ-синтезе кристаллогидраты нитратных солей в необходимой пропорции тщательно перетирались с порошком мочевины в керамической ступке, затем однородная вязкая масса переносилась в керамический тигель и на электронноуправляемой электроплитке постепенно подогревалась со скоростью 15°C/мин. При $t > 250^\circ\text{C}$ происходило самовозгорание реакционной смеси и наблюдалось образование магнитного порошка

феррита. Полученный образец $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ также прокаливался при 500°C в течение 1 ч для устранения нежелательных остатков термолиза нитратных солей.

Таким образом, нанопорошки $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ были синтезированы при оптимальной скорости нагрева реакционной смеси 15°C/мин и после протекания реакции термолиза прокаливались для удаления примесей остаточных солей в течение 60 мин при 500°C.

Рентгенофазовый анализ образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ проводился с использованием порошкового дифрактометра Shimadzu XRD-7000, а их микроструктура исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JSM – 7500F. Параметр кристаллической решетки образцов феррита определяли с усреднением по всем пикам. Размер нанокристаллитов феррита из данных рентгеновской дифракции порошков определяли по формуле Шеррера:

$$D_{hkl} = \frac{kx\lambda}{\beta_{hkl} \cos \theta}, \quad (1)$$

где D_{hkl} – средний размер кристаллита, k – коэффициент, равный 0.9 (для кубической структуры), λ – длина волны использованного рентгеновского излучения (для использованной медной рентгеновской трубки $\lambda = 0.15406$ нм), β_{hkl} – ис-

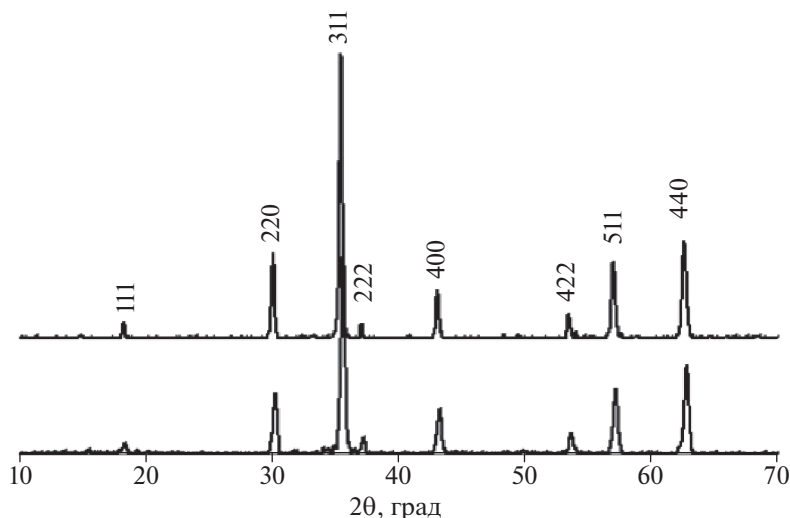


Рис. 1. Порошковые рентгенограммы образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$: 1 – НМ-синтез, 2 – ЗГНЦ-синтез.

тинная ширина профиля дифракционной линии, θ – положение главного дифракционного пика.

Средний диаметр наночастиц $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ и гистограмму их распределения по размеру рассчитывали по электронным микрофотографиям на основании анализа размеров 520–550 измеренных наночастиц.

Спектры оптического диффузного отражения нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ измерялись на спектрофотометре “Hitachi U-3900” с двухканальной интегрирующей сферой. Значения ширины запрещенной зоны E_g из оптических измерений диффузного светотражения определялись по уравнению [26]:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (2)$$

где α – коэффициент светопоглощения, $h\nu$ – энергия фотона, A – константа для прямозонного перехода. Коэффициент светопоглощения определялся из величины светотражения R для порошка исследуемого феррита [26]

$$2\alpha t = \ln[(R_{\text{макс}} - R_{\text{мин}})/(R - R_{\text{мин}})], \quad (3)$$

где t – толщина слоя порошка образца.

Проводимость на постоянном токе нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ была измерена двухзондовым методом в пластиковых трубках 5.0×2.0 мм при ~ 1 Т/см² с использованием цифрового измерителя сопротивлений УТ-601 с усреднением по пяти измерениям.

Электромагнитные характеристики определялись для композитов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /парафин (1 : 1). S -параметры нанокompозитов измерялись в коаксиальной ячейке для шайб 7×3.05 мм толщиной 4.0 мм с использованием векторного анализатора цепей Деерасе КС901V в диапазоне 0.03–7 ГГц. Со-

ставляющие комплексной магнитной и диэлектрической проницаемостей рассчитаны из значений параметров S_{11} и S_{21} по алгоритму Николсона–Росса–Вейра [27, 28]; значения тангенсов углов магнитных и диэлектрических потерь вычислялись по формулам

$$\text{tg}\delta_m = \frac{\mu''}{\mu'}; \quad \text{tg}\delta_e = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгенофазового порошкового анализа (рис. 1) показали, что оба образца $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ являются однофазными кубическими наноразмерными шпинелями с параметрами кристаллической решетки $a = 8.359 \pm 0.005$ Å для НМ-синтеза и $a = 8.393 \pm 0.006$ Å для ЗГНЦ-синтеза без значимого количества примесей. Рассчитанный размер нанокристаллитов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ составил 31.8 нм для образца НМ-синтеза и 47.3 нм для образца ЗГНЦ-синтеза.

Микрофотографии образцов, полученные методом СЭМ, представлены на рис. 2. На основании обработки данных СЭМ (рис. 2), определено, что средний диаметр наночастиц $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, синтезированного НМ-способом, составляет 33 ± 9 нм, ЗГНЦ-способом – 46 ± 13 нм. По форме кривой распределения наночастиц по размерам в образцах $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (рис. 3) можно предполагать, что при ЗГНЦ-синтезе происходит процесс вторичной перекристаллизации наночастиц феррита с образованием более крупных наночастиц. Возможным объяснением различия в размере наночастиц $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в зависимости от способа синтеза может быть тот факт, что при НМ-синтезе феррит образуется в результате быстрого

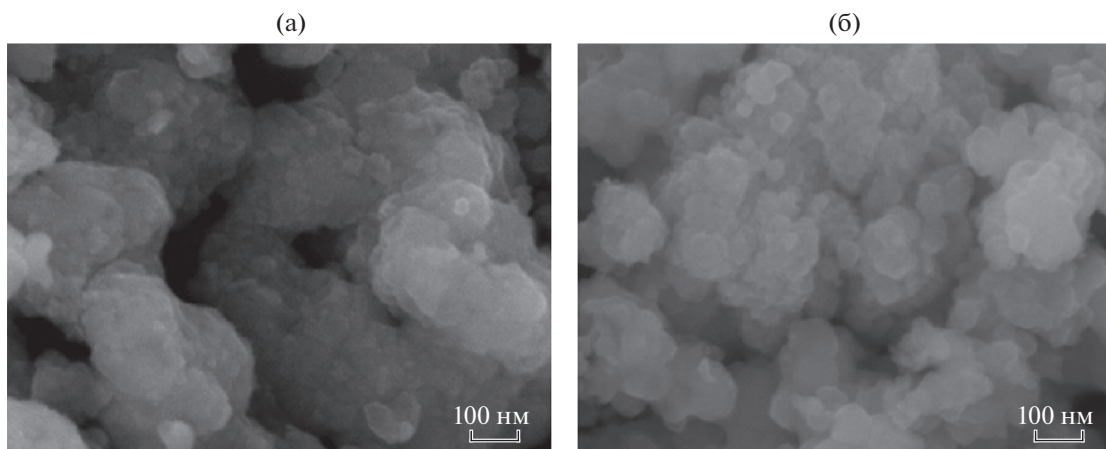


Рис. 2. Микрофотографии образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$: а – НМ-синтез, б – ЗГНЦ-синтез.

возгорания реакционной смеси при нагреве и температура в зоне реакционного поля за 0,4–0,5 с при этом может достигнуть 800°C [16, 25]. Это приводит к интенсивному разбрасыванию наночастиц в пространстве тигля с образованием их сплавленных агрегатов с микро/нанопорами. В процессе ЗГНЦ-синтеза при возгорании металлокомплексного геля наблюдается повышение температуры до $340\text{--}360^\circ\text{C}$ из-за экзотермического окисления цитратного металлокомплексного геля нитрозными газами, но горение происходит в течении 3–4 с без интенсивного перемешивания нанопорошка, при этом наночастицы феррита укрупняются. Указанные энергетические

различия в методах синтеза определяют разную микроструктуру нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Рассчитанные из спектров оптического диффузного светоотражения (рис. 4) значения E_g для синтезированных нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, представлены в табл. 1, они находятся в хорошем согласии с результатами [14–19]. Анализ данных показывает отсутствие корреляции между величиной E_g и средним размером наночастиц в исследованных ранее [14–19] и в настоящей работе нанопорошках $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Рассчитанные значения электрической проводимости на постоянном токе для нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, приведенные в табл. 2, хорошо согласуются с данными [21–24]. Видно, что $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, синтезированный ЗГНЦ-

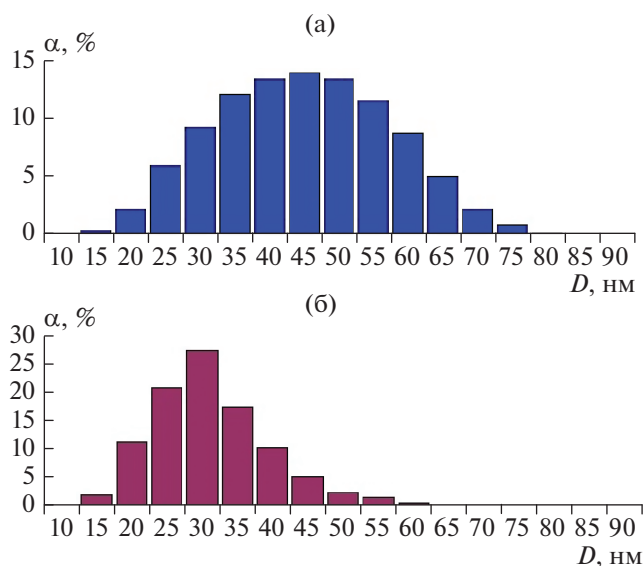


Рис. 3. Распределение по размеру наночастиц в образцах $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$: а – НМ-синтез, б – ЗГНЦ-синтез.

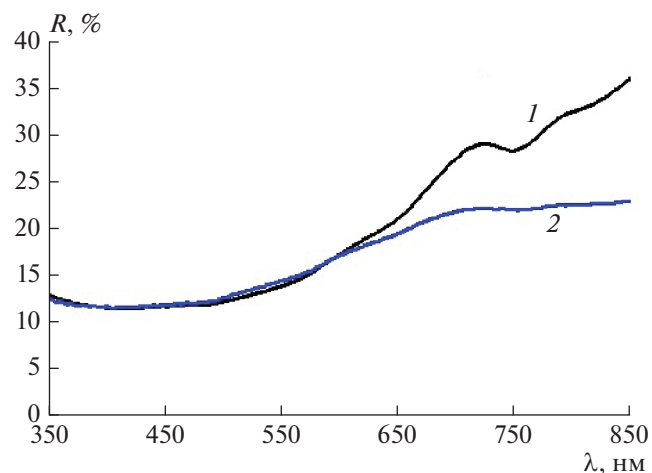


Рис. 4. Спектры оптического диффузного отражения нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$: 1 – НМ-синтез, 2 – ЗГНЦ-синтез.

Таблица 3. Электромагнитные характеристики образцов наноразмерного $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в парафине (50 мас. %)

μ' (1 ГГц)		μ' (6 ГГц)		tg μ		ϵ' (1 ГГц)		ϵ' (6 ГГц)		tg ϵ	
НМ	ЗГНЦ	НМ	ЗГНЦ	НМ	ЗГНЦ	НМ	ЗГНЦ	НМ	ЗГНЦ	НМ	ЗГНЦ
1.64	1.45	1.01	1.03	0.24–0.19	0.23–0.15	3.66	3.24	3.61	2.98	0.02–0.05	0.07–0.06

методом, характеризуется меньшей электрической проводимостью.

Электромагнитные характеристики для композитов из нанопорошков $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в виде значений действительных частей магнитной и диэлектрической проницаемостей для двух частот и тангенсов углов потерь в диапазоне 1–7 ГГц представлены в табл. 3. Разница в магнитной проницаемости нанокompозитов при частоте 1 ГГц составляет 10.8%, а для диэлектрической проницаемости – 11.2%. Магнитные потери композитов в диапазоне частот 1–7 ГГц показывают близкие значения, тогда как диэлектрические потери для нанопорошка $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, полученного НМ-методом, ниже. Электромагнитные характеристики композитов на основе полученных нами образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ хорошо согласуются с данными [7, 29].

Сравнение электромагнитных характеристик композитов на основе двух разных образцов $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ позволяет сказать, что синтезированный НМ-способом $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ в области частот 1–7 ГГц обладает большими значениями электромагнитных характеристик по сравнению с образцом, полученным ЗГНЦ-способом. Высокая температура синтеза, характерная для НМ-способа, по-видимому, способствует получению нанопорошка $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ с оптимальными электромагнитными характеристиками для использования в качестве магнитно-диэлектрического поглотителя для УВЧ- и ближней СВЧ-областей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что электронные, магнитные и диэлектрические свойства наноразмерного магнитного порошка $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ значительно зависят от метода его синтеза. Наилучшими свойствами с точки зрения применения в качестве радиопоглощающего наполнителя обладает порошок $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, синтезированный пирохимическим НМ-методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peng C.H., Wang H.W., Kan S.W., Chen S.Y. Electromagnetic Wave Absorption Behavior of NiZn-ferrite Prepared via Hydrothermal Method // Mater. Sci. Forum. 2005. V. 480–481. P. 595–602.
2. Ma R.T., Shao Z.C., Zhang C.L., Li H., Tian Y.W. Preparation and Microwave Properties of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanocrystalline Powder Prepared by Polyacrylamide Gel Process // Chin. J. Proc. Eng. 2007. V. 7. № 3. P. 610–614.
3. Lima U.R., Nasar M.C., Nasar R.S., Rezende M.C., Araujo J.H. Ni–Zn Nanoferrite for Radar-absorbing Material // J. Magn. Magn. Mater. 2008. V. 320. P. 1666–1670.
4. Azadmanjiri J. Structural and Electromagnetic Properties of Ni-Zn Ferrites Prepared by Sol–Gel Combustion Method // Mater. Chem. Phys. 2008. V. 109. P. 109–112.
5. Вызулин С.А., Бузько В.Ю., Каликинцева Д.А., Мирошниченко Е.Л. Влияние состава на ФМР-характеристики $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 1. С. 118–121.
6. Hsiang H.I., Chen W.S., Chang Y.L., Hsu F.C., Yen F.S. Ferrite Load Effects on the Mechanical and Electromagnetic Properties of NiZn Ferrite Powders-epoxy Resin Coatings // Am. J. Mater. Sci. 2011. V. 1. № 1. P. 40–44.
7. Wei C., Shen X., Song F., Zhu Y., Wang Y. Double-layer Microwave Absorber Based on Nanocrystalline $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4/\alpha\text{-Fe}$ Microfibers // Mater. Design. 2012. V. 35. P. 363–368.
8. Wang C., Shen Y., Wang X., Zhang H., Xie A. Synthesis of Novel NiZn-ferrite/Polyaniline Nanocomposites and Their Microwave Absorption Properties // Mater. Sci. Semicond. Proc. 2013. V. 16. P. 77–82.
9. Flaifel M.H., Ahmad S.H., Abdullah M.H., Rasid R., Shaari A.H., El-Saleh A.A., Appadu S. Preparation, Thermal, Magnetic and Microwave Absorption Properties of Thermoplastic Natural Rubber Matrix Impregnated with NiZn Ferrite Nanoparticles // Compos. Sci. Technol. 2014. V. 96. P. 103–108.
10. Tripathi K.C., Abbas S.M., Sharma R.B., Alegaonkar P.S., Verma M., Kumar S. Electromagnetic and Microwave Absorption Properties of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nano Ferrite/PU Based Nano-Composite. // IJSART. 2015. V. 1. № 9. P. 25–29.
11. Tripathi K.C., Abbas S.M., Alegaonkar P.S., Sharma R.B. Microwave Absorption Properties of Ni–Zn Ferrite Nano-Particle Based Nanocomposite // IJARSET. 2015. V. 2. № 2. P. 436–468.

12. *Acikalın E., Coban K., Sayinti A.* Nanosized Hybrid Electromagnetic Wave Absorbing Coatings // *Prog. Organ. Coat.* 2016. V. 98. P. 2–5.
13. *Tripathi K.C., Abbas S.M., Sharma R.B., Alegaonkar P.S., Verma M.* Microwave Absorption Properties of MWCNT and NiZn Ferrite Nano-fillers/TPU Based Nano-Composites // *IJARSET.* 2016. V. 3. № 3. P. 1598–1604.
14. *Vijaya J., Bououdina M.* Structural, Optical and Magnetic Properties of Ni–Zn Ferrite Nanoparticles Prepared by a Microwave Assisted Combustion Method // *JNN.* 2016. V. 16. P. 689–697.
15. *Kannan Y.B., Saravanan R., Srinivasan N.* Sintering Effect on Structural, Magnetic and Optical Properties of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Ferrite Nanoparticles // *J. Magn. Mater.* 2017. V. 423. P. 217–225.
16. *Tehrani F.S., Daadmehr V., Rezakhani A.T., Hosseini Akbarnejad R., Gholipour S.* Structural, Magnetic, and Optical Properties of Zinc- and Copper-Substituted Nickel Ferrite Nanocrystals // *J. Supercond. Nov. Magn.* 2012. V. 25. № 7. P. 2443–2455.
17. *Thomas J.J., Krishnan S., Sridharan K., Philip R., Kalarikkal N.* A Comparative Study on the Optical Limiting Properties of Different Nano Spinel Ferrites with Z-scan Technique // *Mater. Res. Bull.* 2012. V. 47. № 8. P. 1855–1860.
18. *Pawar C.S., Gujar M.P., Mathe V.L.* Optical Properties of Spin-Deposited Nanocrystalline Ni–Zn Ferrite Thin Films Processed by Sol-Gel // *J. Supercond. Nov. Magn.* 2017. V. 30. № 3. P. 615–625.
19. *Ajmal M., Islam M.U.* Structural, Optical and Dielectric Properties of Polyaniline- $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanocomposites // *Physica B.* 2017. V. 521. P. 355–360.
20. *Brus L.* Electronic Wave Functions in Semiconductor Clusters: Experiment and Theory // *J. Phys. Chem.* 1986. V. 90. № 2. P. 2555–2560.
21. *Mandal S.K., Singh S., Dey P., Roy J.N., Mandal P.R., Nath T.K.* Frequency and Temperature Dependence of Dielectric and Electrical Properties of TFe_2O_4 ($T = \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$) Ferrite Nanocrystals // *J. Alloys Compd.* 2016. № 656. P. 887–896.
22. *Venkatesh D., Ramesh K.V., Sastry C.V.S.S.* Effect of Sintering Temperature on Micro Structural and Impedance Spectroscopic Properties of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nano Ferrite // *AIP Conf. Proc.* 2017. V. 13. № 1859. P. 20–35.
23. *Zhou X., Shen L., Li L., Zhou S., Huang T., Hu C., Pan W., Jing X., Sunc J., Gao L., Huang Q.* Microwave Sintering Carbon Nanotube/ $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Composites and Their Electromagnetic Performance // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2013. V. 33. P. 2119–2126.
24. *Dar M.A., Moosvi S.K., Ahmad J.* Synthesis and Characterization of $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5-x}\text{Fe}_2\text{Ca}_x\text{O}_4$ Ferrite Nanocrystals for High Frequency Applications // *IJARSE.* 2017. V. 6. № 7. P. 519–528.
25. *Vyzulin S.A., Kalikintseva D.A., Miroshnichenko E.L., Buz'ko V.Yu., Goryachko A.I.* Microwave Absorption Properties of Nickel–Zinc Ferrites Synthesized by Different Means // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2018. V. 82. № 8. P. 943–945.
26. *Hapke B.* Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. Cambridge University Press, 2012. V. 5. P. 513.
27. *Nicolson A.M., Ross G.F.* Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-domain Technique. // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1970. V. 19. № 4. P. 377–382.
28. *Weir W.B.* Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave frequencies // *Proc. IEEE.* 1974. V. 62. № 1. P. 33–36.
29. *Verma A., Saxena A.K., Dube D.C.* Microwave Permittivity and Permeability of Ferrite–polymer Thick Films // *J. Magn. Mater.* 2003. V. 263. № 1–2. P. 228–234.