

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. MAGNETIC MATERIALS

*Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 4. С. 261–266.
ISSN 1609–3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-4-261-266*

УДК 621.318.134

ВЛИЯНИЕ БАЗОВОГО СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРЫ НИКЕЛЬ–ЦИНКОВЫХ ФЕРРИТОВ НА УРОВЕНЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Никель–цинковые ферриты относятся к перспективным радиопоглощающим материалам, так как они интенсивно поглощают электромагнитные волны в интервале частот от 50 до 1000 МГц. Проведены исследования электромагнитных свойств Ni–Zn–ферритовых радиопоглощающих материалов, полученных по различным технологическим режимам. Предложена модель, позволяющая оценить диэлектрическую проницаемость ферритового материала в зависимости от параметров микроструктуры и электрофизических свойств границ зерен. Установлено влияние базового состава и микроструктуры на уровень поглощения электромагнитного излучения Ni–Zn–ферритовыми радиопоглощающими материалами. Установлено, что увеличение содержания избытка Fe₂O₃ до 51 % (мол.) приводит к смещению частотного интервала поглощения электромагнитного излучения в сторону низких частот. Это можно объяснить увеличением магнитной и диэлектрической проницаемостей феррита. Показано, что более эффективно введение избытка Fe₂O₃ на стадии измельчения синтезированной шихты. Обнаружено, что увеличение температуры спекания до 1350 °С также обеспечивает смещение частотного интервала поглощения электромагнитного излучения в сторону низких частот. Вероятно, это обусловлено увеличением магнитной и диэлектрической проницаемостей феррита и смещением частоты резонанса доменных стенок в результате формирования крупнозернистой структуры.

Ключевые слова: радиопоглощающие Ni–Zn–ферриты, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость, микроструктура, базовый состав.

© 2015 г. В. Г. Андреев¹, С. Б. Меньшова¹,
В. Г. Костишин², Д. Н. Читанов², А. Н. Климов¹,
А. Ю. Кирина¹, Р. М. Вергазов³, С. Б. Бибииков⁴,
М. В. Прокофьев⁵

¹Кузнецкий институт информационных и управленческих технологий
(филиал Пензенского государственного университета),
ул. Маяковского, д. 57А, Кузнецк, 442537, Россия

²Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп. д. 4, Москва, 119049, Россия

³Пензенский государственный университет,
ул. Красная, д. 40, Пенза, 440026, Россия

⁴ФГБУН Институт биохимической физики
им. Н. М. Емануэля Российской академии наук,
ул. Косыгина, д. 4, Москва, 119334, Россия

⁵Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)
Волоколамское ш., д. 4, Москва, 125871, Россия

Введение

В настоящее время актуальна задача разработки материалов, обладающих высоким уровнем поглощения электромагнитной энергии в широком частотном диапазоне. В области частот менее

1 ГГц применяют Ni–Zn– и Mn–Zn–ферритовые материалы [1]. На свойства готового материала оказывают влияние как природа атомов металлов, входящих в состав феррита, их количественное соотношение, так и характер их распределения внутри кристаллов [2].

Андреев Валерий Георгиевич¹ — доктор техн. наук, профессор, e-mail: kiut@sura.ru; **Меньшова Светлана Борисовна**¹ — кандидат техн. наук, научный сотрудник, e-mail: savva_72@mail.ru; **Костишин Владимир Григорьевич**² — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: drvgkostishyn@mail.ru; **Читанов Денис Николаевич**² — кандидат физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, e-mail: denchitanov@mail.ru; **Климов Алексей Николаевич**¹ — инженер, e-mail: nibbana@mail.ru; **Кирина Алина Юрьевна**¹ — инженер, e-mail: kiut@sura.ru; **Вергазов Рашит Мунирович**³ — инженер, e-mail: cnit@pnzgu.ru; **Бибииков Сергей Борисович**⁴ — кандидат физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, e-mail: sb@deom.chph.ras.ru; **Прокофьев Михаил Владимирович**⁵ — кандидат хим. наук, доцент, e-mail: mai@mai.ru

Исследования направлены на поиск оптимального сочетания базового состава, легирующих добавок и технологии изготовления, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства поглотителей электромагнитных волн [3]. Установлено, что увеличение количества Fe_2O_3 в базовом составе приводит к уменьшению удельного электрического сопротивления Mn—Zn— ферритов и сдвигу частоты поглощения в сторону меньших значений [4, 5]. Повышение содержания Fe_2O_3 сверх стехиометрического состава обуславливает рост магнитной проницаемости и точки Кюри у высокопроницаемых Ni—Zn— ферритов [6].

Важной характеристикой радиопоглощающих ферритовых пластин является коэффициент ослабления отраженного электромагнитного излучения. Ниже рассмотрено влияние Fe_2O_3 на частотную зависимость поглощения Ni—Zn— ферритов. Коэффициент ослабления в значительной степени зависит от интерференционных явлений при отражении электромагнитных волн. Кроме того, он зависит от процессов поглощения электромагнитного излучения в результате резонансных явлений в феррите. Интерференционный минимум отражения соответствует толщине пластины d :

$$d = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1)$$

где λ_0 , λ — длина электромагнитной волны в вакууме и феррите соответственно; ϵ , μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости феррита.

С увеличением магнитной и диэлектрической проницаемостей феррита длина электромагнитной волны в феррите падает. Это позволяет уменьшить толщину ферритовых пластин, обеспечивающих интерференционный минимум отражения, что особенно важно при низких частотах.

Поэтому ниже уделено внимание разработке способов повышения магнитной и диэлектрической проницаемостей феррита.

В проведенных ранее исследованиях отмечалось значительное влияние магнитной и диэлектрической проницаемостей на формирование радиопоглощающих свойств Ni—Zn— ферритов [7].

Теоретическая часть

Рассмотрим модель, позволяющую рассчитать диэлектрическую проницаемость ферритового материала в зависимости от параметров микроструктуры и электрофизических свойств границ зерен.

В Mn—Zn— ферритах, в базовом составе которых содержание оксида железа превышает 50 % (мол.), по мере увеличения в них ионов Fe^{2+} наблюдаются высокие значения диэлектрической проницаемости. Это можно объяснить повышением электропроводности зерен при сохранении низкой электропроводности их границ. Известно [6], что электропроводность границ зерен Mn—Zn— ферритов

на несколько порядков превышает электросопротивление в объеме зерен. Аналогичное состояние может быть достигнуто в Ni—Zn— ферритах при избытке оксида железа сверх 50 % (мол.) Поэтому поведение границ зерен в области высоких частот аналогично поведению шунтирующих конденсаторов с емкостью $C_{\text{дг}}$:

$$C_{\text{дг}} = \epsilon_0 \epsilon_{\Gamma} \frac{D^2}{d}, \quad (2)$$

где ϵ_0 , ϵ_{Γ} — диэлектрические проницаемости вакуума и зернограничной фазы соответственно; D — средний размер зерна; d — средняя толщина межзеренной границы.

Для оценки диэлектрической проницаемости феррита в этом случае можно рассмотреть образец кубической формы с размером ребра L , расположенный между обкладками плоского конденсатора (рис. 1). Реальный вид микроструктуры образца Ni—Zn— феррита показан на рис. 2.

Емкость такого конденсатора можно рассчитать как

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{\text{ф}} \frac{L^2}{L} = \epsilon_0 \epsilon_{\text{ф}} L, \quad (3)$$

где $\epsilon_{\text{ф}}$ — диэлектрическая проницаемость феррита.

При уменьшении толщины образца до размера зерна D его емкость C_D возрастает в n раз (где $n = L/D$):

$$C_D = \epsilon_0 \epsilon_{\text{ф}} \frac{L^2}{D}. \quad (4)$$

Такой образец со стороной L содержит примерно n^2 зерен и межзеренных границ. Емкость рассматриваемой системы C_D можно представить как сумму

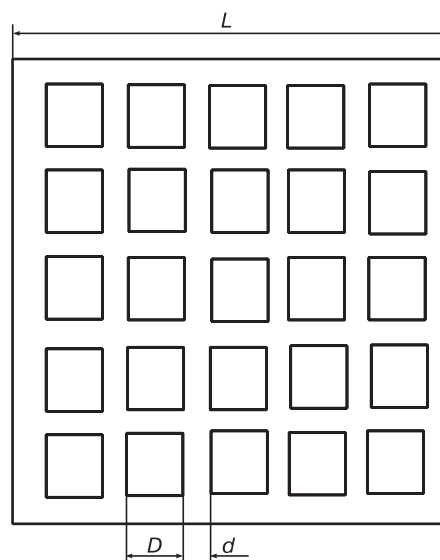


Рис. 1. Модель микроструктуры феррита: L — размер образца; D — размер зерна; d — толщина границы зерна

Fig. 1. Ferrite Microstructure Model: L is the Specimen Size, D is the Grain Size and d is the Grain Boundary Thickness

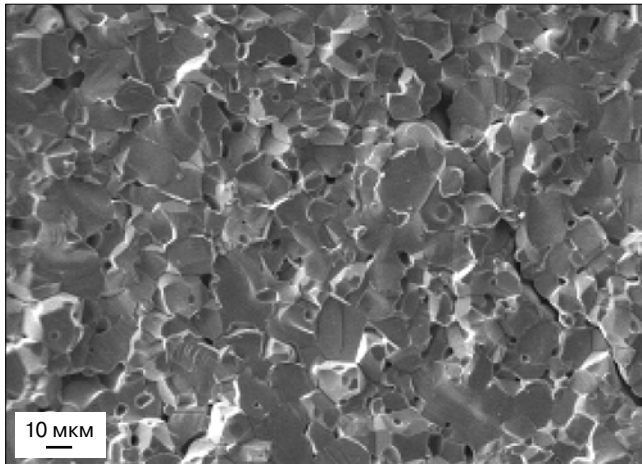


Рис. 2. Изображение микроструктуры реального образца Ni—Zn-феррита, полученное на сканирующем микроскопе фирмы Carl Zeiss Jena

Fig. 2. Image of the Microstructure of a Ni—Zn Ferrite Specimen Obtained under a Carl Zeiss Jena SEM

n^2 емкостей межзеренных границ C_T параллельно соединенных конденсаторов:

$$C_D = n^2 \epsilon_0 \epsilon_r \frac{D^2}{d}, \quad (5)$$

где ϵ_r — диэлектрическая проницаемость границы зерна.

Приравнивая выражения (4) и (5), и с учетом того, что $n = L/D$, получим

$$\epsilon_{\phi} = \epsilon_r \frac{D}{d}. \quad (6)$$

Внутри прослойки феррита толщиной L будет содержаться примерно n слоев зерен и межзеренных границ, которые можно представить в виде последовательно соединенных конденсаторов. С учетом этого емкость феррита уменьшается в n раз:

$$C = n \epsilon_0 \epsilon_r \frac{D^2}{d}. \quad (7)$$

Следовательно, с учетом $n = L/D$ можно записать

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{LD}{d}. \quad (8)$$

Приравнивая выражения (3) и (5), получим

$$\epsilon_{\phi} = \epsilon_r \frac{D}{d}. \quad (9)$$

Таким образом, эффективная диэлектрическая проницаемость ферритов в приведенной модели определяется диэлектрической проницаемостью зернограничной фазы, средним размером зерен и толщиной межзеренных границ. При этом большие значения отношения D/d определяют высокие значения эффективной диэлектрической проницаемости ферритов.

Известно, что свойства ферритов обусловлены характером распределения атомов элементов, вхо-

дящих в состав феррита [8, 9]. Ранее проведенные исследования показали [2], что атомы никеля и железа располагаются, как правило, внутри зерен (рис. 3, а и б, см. третью стр. обложки). А атомы висмута входят в состав зернограничных прослоек (рис. 3, а и в, см. третью стр. обложки). Атомы цинка входят в состав как зерен, так и зернограничных прослоек. Примесные атомы элементов, не предусмотренные базовым составом феррита, как правило, также расположены по границам зерен. Выделение примесных атомов (Bi, Ti, Ca и других) увеличивает диэлектрическую проницаемость зернограничной фазы ϵ_r и, таким образом, диэлектрическую проницаемость феррита [10, 11].

Следовательно, с целью повышения диэлектрической проницаемости Ni—Zn-ферритов необходимо повысить содержание оксида железа в базовом составе сверх 50 % (мол.) (А значит, и содержание ионов Fe^{2+} , участвующих в перераспределении зарядов в материале). Кроме того, необходимо увеличить средний размер зерен и диэлектрическую проницаемость зернограничной фазы и при этом уменьшить толщину границ зерен [12—16]. Технологически это можно осуществить, используя добавки: оксид висмута и частицы более крупной фракции того же состава, что и изготавливаемый ферритовый материал [4]. Добавки, вводимые в базовый состав перед спеканием, способствуют формированию крупнозернистой структуры [13, 14].

Экспериментальная часть

Для проверки влияния базового состава и среднего размера зерна были изготовлены экспериментальные партии ферритовых радиопоглощающих материалов состава $(NiO)_{0,4}(ZnO)_{0,6}(Fe_2O_3)_{1+\delta}$, где $0 \leq \delta \leq 0,03$. Ферриты изготавливали по стандартной керамической технологии, включающей следующие основные технологические операции:

- смешение исходных оксидов в заданных пропорциях;
- измельчение смеси в вибромельнице (1-е измельчение);
- синтез ферритовой шихты при температуре 920 °С;
- измельчение синтезированной шихты в вибромельнице (2-е измельчение);
- введение связки;
- прессование колец;
- спекание.

С целью получения образцов с различным размером зерна температуру спекания изменяли в пределах 1300—1360 °С.

Партии с избытком Fe_2O_3 сверх стехиометрии изготавливали двумя способами. В первом способе избыток Fe_2O_3 закладывали на операции смешения исходных оксидов. Во втором избыток Fe_2O_3 вводили в шихту перед вторым измельчением.

Образцы Ni—Zn-ферритов опытных партий были выполнены в форме колец с наружным диаметром 16 мм, внутренним диаметром 7 мм и высотой 6,5 мм.

Исследование микроструктуры и количественный анализ образцов выполняли на сканирующем электронном микроскопе фирмы Carl Zeiss Jena марки SEM LEO-420 с микрозондовой приставкой INKA ENERGY-400. Рентгеноструктурный анализ осуществляли на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3» с излучением $\text{CuK}\alpha$. Для проведения микроструктурного и рентгеноструктурного анализа из каждой партии было отобрано по 5 образцов. Результаты проведенных исследований подтвердили наличие только шпинельной фазы в образцах.

Для определения электромагнитных свойств из каждой партии также было отобрано по 5 образцов. Разброс экспериментальных данных внутри выборки не превышал 5%. Измерения магнитной и диэлектрической проницаемостей, коэффициентов отражения в режиме короткого замыкания от образцов на металлической пластине в диапазоне частот 0,3—1300 МГц проводили на лабораторном стенде. Этот стенд создан на базе измерителя комплексных коэффициентов передачи «Обзор-103», сопряженного с компьютерной системой регистрации и обра-

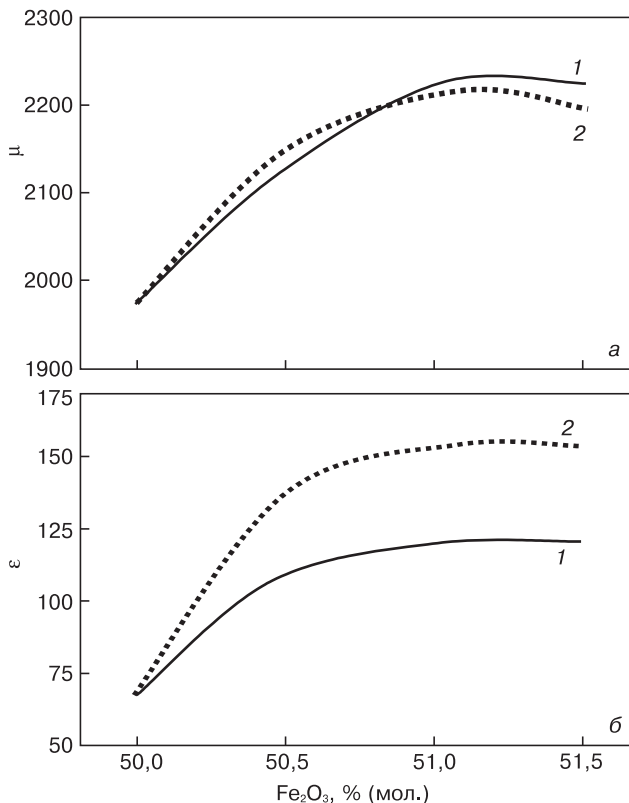


Рис. 4. Влияние избытка Fe_2O_3 сверх стехиометрии на магнитную (а) и диэлектрическую (б) проницаемости Ni—Zn-феррита при частоте 100 кГц, спеченного при 1350 °С: 1 — 1-й способ изготовления с избытком Fe_2O_3 ; 2 — 2-й способ изготовления с избытком Fe_2O_3

Fig. 4. Effect of Fe_2O_3 Excess on (a) Magnetic and (б) Dielectric Constants of Ni—Zn Ferrite Sintered at 1350 °C for 100 kHz: (1) 1st Sintering Method with Fe_2O_3 Excess (2) 2nd Sintering Method with Fe_2O_3 Excess

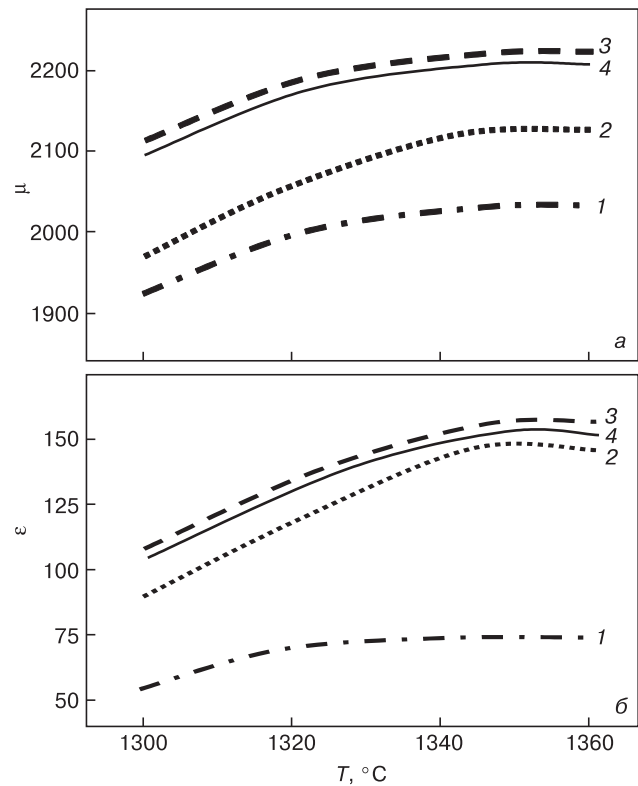


Рис. 5. Влияние избытка Fe_2O_3 сверх стехиометрии и температуры спекания на магнитную (а) и диэлектрическую (б) проницаемости Ni—Zn-феррита при частоте 100 кГц: 1 — стехиометрический состав; 2 — 50,5 % (мол.) Fe_2O_3 ; 3 — 51; 4 — 51,5

Fig. 5. Effect of Fe_2O_3 Excess and Sintering Temperature on (a) Magnetic and (б) Dielectric Constants of Ni—Zn Ferrite for 100 kHz: (1) Stoichiometric Composition, (2) 50.5 mol.% Fe_2O_3 , (3) 51 mol.% Fe_2O_3 and (4) 51.5 mol.% Fe_2O_3

ботки сигнала. Образцы помещали в коаксиальную измерительную ячейку с рабочим сечением в области размещения образца 16/7 мм, согласованную с коаксиальным измерительным трактом.

Результаты и их обсуждение

Влияние избытка Fe_2O_3 на магнитную и диэлектрическую проницаемости образцов при частоте 200 кГц представлено на рис. 4. Из данных рис. 4 видно, что увеличение избытка до Fe_2O_3 51% (мол.) приводит к увеличению магнитной и диэлектрической проницаемостей ферритов. Однако более существенное увеличение диэлектрической проницаемости достигается при введении избытка Fe_2O_3 перед вторым измельчением. Возможно, это обусловлено избыточной концентрацией ионов Fe^{2+} вдоль границ зерен феррита в рассматриваемом случае.

На рис. 5 показано влияние температуры спекания на магнитную и диэлектрическую проницаемости ферритов при различных значениях избытка Fe_2O_3 , изготовленных вторым способом. Увеличение магнитной и диэлектрической проницаемостей ферритов с ростом температуры спекания до 1350 °С объясняется увеличением среднего размера зерна.

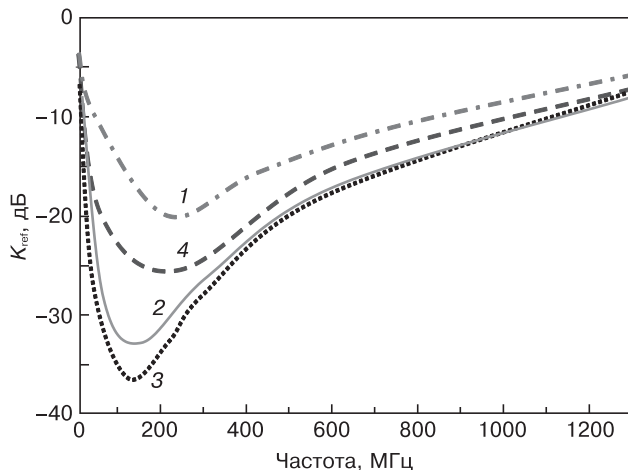


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента ослабления отраженного сигнала по мощности от поверхности Ni—Zn-феррита, спеченного при температуре 1350 °С: 1 — стехиометрический состав; 2 — 50,5 % (мол.) Fe₂O₃; 3 — 51 % (мол.) Fe₂O₃; 4 — 51,5 % (мол.) Fe₂O₃

Fig. 6. Frequency Curves of Ni—Zn Ferrite Surface Reflected Signal Power Attenuation Ratio, Sintering Temperature 1350 °C: (1) Stoichiometric Composition, (2) 50.5 mol.% Fe₂O₃, (3) 51 mol.% Fe₂O₃ and (4) 51.5 mol.% Fe₂O₃

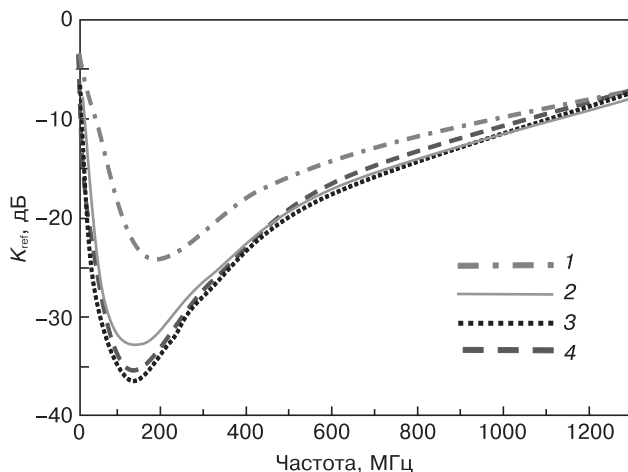


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента ослабления отраженного сигнала по мощности от поверхности Ni—Zn-феррита, содержащего 51 % (мол.) Fe₂O₃ и спеченного при различных температурах T, °С: 1 — 1300; 2 — 1330; 3 — 1350; 4 — 1360

Fig. 7. Frequency Curves of Ni—Zn Ferrite Surface Reflected Signal Power Attenuation Ratio for 51 mol.% Fe₂O₃ Composition and Different Sintering Temperatures: (1) 1300, (2) 1330, (3) 1350 and (4) 1360 °C

На рис. 6 и 7 приведены частотные зависимости коэффициентов ослабления отраженного сигнала по мощности. Избыток Fe₂O₃ получали вторым способом.

Таким образом, характеристики коэффициентов отражения показали, что наилучшими эксплуатационными показателями обладают образцы, полученные при температуре спекания 1350 °С и содержащие 51 % (мол.) Fe₂O₃. Это можно объяснить увеличением магнитной и диэлектрической проницаемостей феррита и крупнозернистой структурой, приводящими к смещению частот резонанса доменных стенок и интерференционного минимума в область низких частот.

Заключение

Показано, что увеличение содержания избытка Fe₂O₃ до 51 % (мол.) приводит к смещению частотного интервала поглощения электромагнитного излучения в сторону низких частот. Это можно объяснить увеличением магнитной и диэлектрической проницаемостей феррита. При этом более эффективно введение избытка Fe₂O₃ на стадии второго измельчения.

Обнаружено, что увеличение температуры спекания до 1350 °С также обеспечивает смещение частотного интервала поглощения электромагнитного излучения в сторону низких частот. Это может быть обусловлено увеличением магнитной и диэлектрической проницаемостей феррита и смещением частоты резонанса доменных стенок в результате формирования крупнозернистой структуры.

Библиографический список

1. Kim, D. Developments of new em wave absorbers. / D. Kim // Internat. Symp. on Electrical and Electronics Eng. – HCM City, (Vietnam), 2005. – P. 23–29.
2. Лапшин, Э. В. Влияние параметров микроструктуры на радиофизические характеристики Ni—Zn-ферритовых материалов / Э. В. Лапшин, С. Б. Бибииков, М. В. Прокофьев, Р. М. Вергазов // Изв. вузов. Поволжский регион. Техн. науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 123–135.
3. Pat. N 8138959 B2. H01F1/34B2, H05K9/00M2, H01F1/36, C04B35/26H (US). Radio wave absorption material and radio wave absorber / S. Itoh, Y. Miyoshi, 18.10.2007.
4. Pat. N US7108799 B2. H01Q17/00, C04B35/26H, C04B35/057, C04B35/626A6H (US). Electromagnetic wave absorber formed of Mn—Zn ferrite / O. Kobayashi, K. Ito, M. Norizuki, 30.01.2004.
5. Pat. N 6984338 B2. C04B35/26H, H01F1/34B2 (US). A mixed oxides of iron, zinc, titanium, tin, manganese and calcium; high electrical resistance, permeability, soft magnetism in a high frequency band, stable grain structure; power supply switches, electromagnetic wave absorbers / O. Kobayashi, O. Yamada, K. Ito, 28.01.2004.
6. Goncar, A. Problems of increasing of thermostability of highly permeable Ni—Zn ferrites and for telecommunications / A. Goncar, V. Andreev, L. Letyuk // J. Magn. Mag. Mater. – 2003. – V. 254–255. – P. 544–546.
7. Kostishin, V. G. Influence of technological factors on dielectric permeability and radio-wave absorbing characteristics of nickel—zinc ferrites / V. G. Kostishin, R. M. Vergazov, V. G. Andreev, S. B. Bibikov // Russ. Microelectron. – 2012. – V. 41, N. 8. – P. 469–473. DOI: 10.1134/S1063739712080094
8. Канева, И. И. Исследование возможности получения марганец—цинкового феррита по короткой технологической схеме / И. И. Канева, В. Г. Костишин, В. Г. Андреев, А. Н. Николаев, Е. И. Волкова // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2013. – № 1. – С. 23–27. DOI: 10.17073/1609-3577-2013-1-23-27
9. Непомнящий, В. В. Влияние различных технологических методов изготовления порошковых постоянных магнитов на их свойства / В. В. Непомнящий, Т. В. Мосина, А. К. Радченко, В. А. Назаренко // Порошковая металлургия. – 2009. – № 1/2. – С. 143–147.
10. Махнач, Л. В. Влияние оксидных добавок с перовскитоподобной структурой на микроструктуру и некоторые свойства магний—цинкового феррита / Л. В. Махнач, В. А. Ломоносов, В. В. Саевич, М. В. Новицкая, В. В. Паньков // Вестн. БГУ. – 2011. – Сер. 2. – № 1. – С. 10–14.
11. Sunny, V. A flexible microwave absorber based on nickel ferrite nanocomposite / V. Sunny, P. Kurian, P. Mohanan, P. A. Joy, M. R. Anantharaman // J. Alloys and Compounds. – 2010. – V. 489, iss. 1. – P. 297–303. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.09.077
12. Костишин, В. Г. Влияние микроструктуры на свойства радиопоглощающих никель—цинковых ферритов / В. Г. Костишин, Р. М. Вергазов, В. Г. Андреев, С. Б. Бибииков, С. В. Подгорная, А. Т. Морченко // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2010. – № 4. – С. 18–22.
13. Kong, I. Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite—thermoplastic natural rubber nanocomposites / I. Kong, S. H. Ahmad, M. H. Abdullah, D. Hui, A. N. Yusoff, D. Puryanti //

J. Magnetism and Magnetic Materials. – 2010. – V. 322, iss 21. – P. 3401–3409. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.06.036

14. Kostishyn, V. G. Effect of the microstructure on the properties of radio-absorbing nickel–zinc ferrites / V. G. Kostishyn, R. M. Vergazov, V. G. Andreev, S. B. Bibikov, S. V. Podgornaya, A. T. Morchenko // Russ. Microelectron. – 2011. – V. 40, N 8. – P. 574–577. DOI: 10.1134/S1063739711080117

15. Пат. № 2417268 (РФ). Радиопоглощающий феррит / В. Г. Костишин, Л. В. Кожитов, Р. М. Вергазов, В. Г. Андреев, А. Т. Морченко, 27.04.2011.

16. Пат. № 2447551 (РФ). Безэховая камера / В. Г. Костишин, Л. В. Кожитов, В. Г. Андреев, А. Т. Морченко, А. Ю. Молчанов, 10.04.2012.

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2015 г.

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2015, vol. 18, no. 4, pp. 261–266.

Effect of the base composition and microstructure on the level of absorption of electromagnetic radiation in nickel–zinc ferrite

Valery G. Andreev¹ — Dr. Sci. (Eng.), Professor; **Svetlana B. Menshova**¹ — Cand. Sci. (Eng.), Researcher (sava_72@mail.ru); **Vladimir G. Kostishin**² — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of Department of the Technology of Electronic Materials (drvkgostishyn@mail.ru); **Denis N. Chitanov**² — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of Laboratory (denchitanov@mail.ru); **Alexey N. Klimov**¹ — Engineer (nibbana@mail.ru); **Alina Yu. Kirina**¹ — Engineer (kiiut@sura.ru); **Rashit M. Vergazov**³ — Engineer (cnit@pnzgu.ru); **Sergey B. Bibikov**⁴ — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of Laboratory (sb@deom.chph.ras.ru); **Mikhail V. Prokofev**⁵ — Cand. Sci. (Chem.), Ass. Professor (mai@mai.ru)

¹ **Kuznetsk Institute of Information and Management Technologies (branch of Penza State University)**, 57A Mayakovsky Str., Kuznetsk, Penza region 442530, Russia,

² **National University of Science and Technology «MISIS»**, 4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia,

³ **Penza State University**, 40 Krasnaya Str., Penza 440026, Russia,

⁴ **N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics RAS (IBCP RAS)**, 4 Kosygin Str., Moscow 119334, Russia,

⁵ **Moscow Aviation Institute (National Research University)**, 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125993, Russia

Abstract. Promising absorbing materials include Ni–Zn–ferrites, as they quite intensively absorb electromagnetic waves in the 50 MHz to 1000 MHz frequency range. In this paper we have studied the electromagnetic properties of Ni–Zn ferrite absorbing materials obtained in different technological modes. We propose a model that allows one to evaluate the dielectric constant of the ferrite material depending on the parameters of the microstructure and electrical properties of grain boundaries. Influence of base composition and microstructure on the level of absorption of electromagnetic radiation by Ni–Zn ferrite absorbing materials has been found. An increase in Fe₂O₃ excess to 51 % has been found to shift the frequency interval of electromagnetic radiation absorption towards lower frequencies, and this effect can be explained by an increase in the dielectric and magnetic constants of ferrite. Introduction of excess Fe₂O₃ in step 2 of grinding proved to be more efficient. An increase in the sintering temperature to 1350 °C also provides for a shift of electromagnetic radiation absorption frequency interval towards lower frequencies, which can be explained by an increase of the dielectric and magnetic constants of ferrite and resonance frequency shift of domain walls due to the formation of a coarse-grained structure.

Keywords: ferrite radio-absorbing materials, magnetic permeability, dielectric permeability, microstructure, basic composition

References

1. Kim D. Developments of new em wave absorbers. *International Symposium on Electrical & Electronics Engineering*. 2005 Oct. 11, 12 205 HCM City, Vietnam, pp. 23–29.

2. Lapshin E. V., Bibikov S.B., Prokofev M.V., Vergazov R.M. Effect of microstructure parameters on radio physical characteristics of the Ni–Zn ferrite materials. *Izv. vuzov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki = Math. universities. Volga region. Technical sciences*. 2010, no. 3 (15), pp. 123–135. (In Russ.)

3. Shinroh Itoh, Yasuharu Miyoshi. Radio wave absorption material and radio wave absorber. *US Patent № 8138959 B2*. H01F1/34B2, H05K9/00M2, H01F1/36, C04B35/26H. 18.10.2007.

4. Osamu Kobayashi, Kiyoshi Ito, Masashi Norizuki. Electromagnetic wave absorber formed of Mn–Zn ferrite. *US Patent No. US7108799 B2*. H01Q17/00, C04B35/26H, C04B35/057, C04B35/626A6H. 30.01.2004.

5. Osamu Kobayashi, Osamu Yamada, Kiyoshi Ito. A mixed oxides of iron, zinc, titanium, tin, manganese, and calcium; high electrical resistance, permeability, soft magnetism in a high frequency band, stable grain structure; power supply switches, electromagnetic wave absorbers. *US Patent No. 6984338 B2*. C04B35/26H, H01F1/34B2. 28.01.2004.

6. Goncar A., Andreev V., Letyuk L. Problems of increasing of thermostability of highly permeable Ni–Zn ferrites and for telecommunications. *J. Magnetism and Magnetic Materials*. 2003, vol. 254–255. pp. 544–546.

7. Kostishin V. G., Vergazov R. M., Andreev V. G., Bibikov S. B. Influence of Technological Factors on Dielectric Permeability and Radio-Wave Absorbing Characteristics of Nickel–Zinc Ferrites. *Russian Microelectronics*. 2012, vol. 41, no. 8, pp. 469–473.

8. Kaneva I. I., Kostishyn V. G., Andreev V. G., Nikolaev A. N., Volkova E. I. Study the possibility of obtaining a manganese–zinc ferrite on the short flowsheet. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2013, no. 1, pp. 23–27. DOI: 10.17073/1609-3577-2013-1-23-27 (In Russ.)

9. Nepomnyashchii V. V., Mosina T. V., Radchenko A. K., Nazarenko V. A. Influence of different technological methods of manufacturing powder permanent magnets on their properties. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2009, no. 1/2, pp. 143–147. (In Russ.)

10. Makhnach L.V., Lomonosov V. A., Saevich V. V., Novitskaya M. V., Pan'kov V. V. Effect oxide with perovskite structure additives on the microstructure and properties of some zinc–magnesium ferrite. *Vestnik BGU = Bulletin BSU*. 2011, vol. 2, no 1, pp. 10–14.

11. Sunny V., Kurian Ph., Mohanan P., Joy P. A., Anantharaman M. R. A flexible microwave absorber based on nickel ferrite nanocomposite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010, vol. 489, no. 1, pp. 297–303. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.09.077

12. Kostishyn V. G., Vergazov R. M., Andreev V. G., Bibikov S. B., Podgornaya S. V., Morchenko A. T. Effect of microstructure on the properties of radar absorbing nickel–zinc ferrite. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2010, no. 4, pp. 18–22. (In Russ.)

13. Ing Kong, Sahrim Hj Ahmad, Mustaffa Hj Abdullah, David Hui, Ahmad Nazlim Yusoff, Dwi Puryanti, Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite–thermoplastic natural rubber nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010, vol. 322, no. 21, pp. 3401–3409. DOI: 10.1016/j.jmmm.2010.06.036

14. Kostishyn V. G., Vergazov R. M., Andreev V. G., Bibikov S. B., Podgornaya S. V., Morchenko A. T. Effect of the microstructure on the properties of radio-absorbing nickel–zinc ferrites. *Russian Microelectronics*. 2011, vol. 40, no. 8, pp. 574–577.

15. Kostishyn V. G., Kozhitov L. V., Vergazov R. M., Andreev V. G., Morchenko A. T. Radar-absorbing ferrite. *RF patent*. number 2417268 from 27.04.2011.

16. Kostishyn V. G., Kozhitov L. V., Andreev V. G., Morchenko A. T., Molchanov A. U. Anechoic chamber. *RF patent*. number 2447551 from 10.04.2012.

Received April 15, 2015