

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-87-108>



УДК 621.318.12

Перспективы применения ферритов с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей в качестве радиопоглощающих материалов

В.Г. Костишин^{1,@},
Р.М. Вергазов²,
С.Б. Меньшова³,
И.М. Исаев¹

¹НИТУ «МИСиС», Москва 117049, Россия

²Колледж электронных технологий, г. Кузнецк Пензенской обл. 442500, Россия

³ГБОУ школа №962, Москва 127562, Россия,

@Автор для переписки, e-mail: drvchkostishyn@mail.ru

В работе представлен обзор исследований по влиянию основных параметров ферритов на их способность поглощения электромагнитного излучения (более 10 дБ) в мегагерцовом диапазоне. Основным преимуществом ферритов является высокий показатель преломления (более 1000) в мегагерцовом диапазоне длин волн благодаря сочетанию высоких значений магнитной и диэлектрической проницаемостей, позволяющий изготавливать эффективные радиопоглощающие покрытия малой толщины (менее 10 мм). Исследования показывают, что ослабление мощности отраженного от поверхности феррита электромагнитного излучения обусловлено как интерференционными процессами, так и процессами диссипации электромагнитной энергии при распространении в феррите. Обратной пропорциональной связью между показателем преломления и частотой электромагнитного излучения в мегагерцовом диапазоне обеспечивает условие интерференционного минимума отраженного излучения при постоянстве толщины ферритовых покрытий. Высокий показатель преломления обеспечивает замедление скорости распространения электромагнитных волн в ферритах, что усиливает процессы диссипации их энергии.

Представлены исследования по влиянию базового химического состава ферритов, легирующих добавок, параметров микроструктуры и технологических режимов на их магнитную и диэлектрическую проницаемости. Исследования показали, что избыток оксида железа сверх стехиометрии, обеспечивающий полупроводниковые свойства зерен феррита, заметно повышает диэлектрическую проницаемость. Высокие значения диэлектрической проницаемости ферритов обеспечиваются сочетанием диэлектрических свойств зернограничных прослоек и полупроводниковых свойств самих зерен, формирующих барьерную емкость границ зерен согласно механизму Окадзаки. Легирование ферритов оксидами TiO_2 , Bi_2O_3 , CaO в количестве до 1 масс.% позволяет повысить электросопротивление и диэлектрическую проницаемость зернограничных прослоек, обеспечивая повышение диэлектрической проницаемости феррита в целом. Установлено, что формирование плотной крупнозернистой структуры обеспечивает повышение как магнитной, так и диэлектрической проницаемостей.

Ключевые слова: радиопоглощающий феррит, базовый состав, легирующие добавки, микроструктура, магнитная и диэлектрическая проницаемости.

Для цитирования: Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Меньшова С.Б., Исаев И.М. Перспективы применения ферритов с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей в качестве радиопоглощающих материалов. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):87-108. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-87-108>

Prospects for the use of ferrites with high magnetic permeability and permittivity as radio-absorbing materials

Vladimir G. Kostishin^{1,@},
Rashit M. Vergazov²,
Svetlana B. Menshova³,
Igor M. Isaev¹

¹NUST "MISiS", Moscow 117409, Russia

²College of Electronic Technologies, Kuznetsk, Penza Region 442500, Russia

³GBOU school №962, Moscow 127562, Russia

@Corresponding author, e-mail: drvkostishyn@mail.ru

The paper presents an overview of studies on the influence of the main parameters of ferrites on their ability to absorb electromagnetic radiation in the megahertz range (more than 10 dB). The main advantage of ferrites is a high refractive index (more than 1000) in the megahertz range due to the combination of high values of magnetic and dielectric permeability, which makes it possible to produce radio-absorbing coatings of small thickness (less than 10 mm) that effectively absorb electromagnetic radiation. Studies show that the attenuation of the power of electromagnetic radiation reflected from the surface of the ferrite is due to both interference processes and the processes of dissipation of electromagnetic energy during propagation in the ferrite.

The inversely proportional relationship between the refractive index and the frequency of electromagnetic radiation in the megahertz range provides the condition for the interference minimum of the reflected radiation at a constant thickness of the ferrite coatings. A high refractive index slows down the speed of propagation of electromagnetic waves in ferrites, which enhances the processes of dissipation of their energy.

The paper presents studies on the influence of the basic chemical composition of ferrites, alloying additives, microstructure parameters and technological modes on their magnetic and dielectric permeability. Studies have shown that an excess of iron oxide in excess of stoichiometry, which provides the semiconducting properties of ferrite grains, significantly increases the dielectric constant. High values of the dielectric constant of ferrites are provided by a combination of the dielectric properties of grain-boundary layers and the semiconducting properties of the grains themselves, which form the barrier capacity of grain boundaries according to the Okazaki mechanism. Alloying ferrites with oxides TiO_2 , Bi_2O_3 , CaO in an amount of up to 1 wt.% allows increasing the electrical resistance and dielectric constant of grain-boundary layers, providing an increase in the dielectric constant of ferrite as a whole. It has been established that the formation of a dense coarse-grained structure provides an increase in both the magnetic permeability and permittivity.

Keywords: radio-absorbing ferrite, basic composition, alloying additives, microstructure, magnetic permeability and permittivity.

For citation: Kostishin V.G., Vergazov R.M., Menshova S.B., Isaev I.M. Prospects for the use of ferrites with high magnetic permeability and permittivity as radio-absorbing materials. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):87-108 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-87-108>

1. Основные факторы, определяющие перспективность ферритовых радиопоглощающих материалов

Широкое применение токов высокой частоты в электронных приборах создает фон электромагнитного излучения, усиление которого в результате многократного переотражения от стен в помещениях отрицательно влияет на рабочий персонал и может привести к сбоям в работе оборудования [1, 2]. Поэтому весьма актуальна проблема снижения мощности этого фона путем применения покрытий из материалов, эффективно поглощающих электромагнитное излучение. Материалы должны иметь высокое электросопротивление, термостойкость, низкую горючесть, а сами покрытия небольшую толщину.

Эффективность поглощения излучения определяется процессами диссипации и интерференции и во многом зависит от значений магнитной и диэлектрической проницаемостей материала покрытия. Из исследований А.Г. Алексеева, Е.А. Штагера, Д. Фоксвела, Д. Джаксена и др. [3–9] следует, что покрытие, используемое в качестве экрана, наилучшим образом работает при толщине, соизмеримой с длиной электромагнитной волны в материале λ_ϕ . Уменьшить длину волны в материале можно за счет увеличения показателя преломления $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ [3]:

$$\lambda_{\phi} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны в вакууме, ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала покрытия, соответственно.

В гигагерцовом диапазоне частот для поглощения электромагнитного излучения используются композиционные материалы на основе диэлектрической матрицы с проводящими включениями в виде частиц графита, карбонильного железа и др. [3–10]. Поскольку длина электромагнитной волны в гигагерцовом диапазоне не превышает 30 см, толщина покрытий из композиционных материалов, как правило, менее 10 см, несмотря на низкие значения показателя преломления этих материалов (не более 10) [5–9].

В мегагерцовом диапазоне частот (1–1 000 МГц) для поглощения электромагнитного излучения композиционные материалы используются редко из-за низких значений показателя преломления, а применяются покрытия на основе ферритов [11, 12]. Перспективность использования ферритов в качестве радиопоглощающих материалов в мегагерцовом диапазоне главным образом обусловлена возможностью создания относительно тонких покрытий, сочетающих высокую эффективность поглощения и низкую стоимость [12]. Эффективность ферритов определяется сочетанием высоких значений магнитной и диэлектрической проницаемостей, а также оптимальных значений удельного электрического сопротивления. По этим показателям ферриты находятся вне конкуренции по сравнению с другими радиопоглощающими материалами [3].

Уменьшение толщины покрытий позволяет снизить их массу и стоимость. Для разработки покрытий толщиной менее 10 мм при частотах менее 50 МГц требуется разработка материала с высоким значением произведения $\epsilon\mu$, превышающим 10^7 [12]. У известных радиопоглощающих ферритов значения магнитной проницаемости близки к предельным значениям (2000–3000 в мегагерцовом диапазоне), при этом значения диэлектрической проницаемости не превышают 100 [13, 14]. Однако имеются существенные резервы для повышения диэлектрической проницаемости ферритов. В основном они связаны с реализацией барьерного механизма электрической емкости Окадзаки путем формирования определенной микроструктуры и применением легирующих добавок [15, 16]. Это обстоятельство обуславливает актуальность исследований по повышению диэлектрической проницаемости радиопоглощающих ферритов.

Основным параметром радиопоглощающего материала является коэффициент отражения, который определяется как отношение мощности потока излучения, отраженного материалом, к падающей мощности и выражается в децибелах [3–5]. Ослабление мощности отраженной электромагнитной волны от поверхности материала сильно зависит от явлений, происходящих при интерференции падающей и отраженной волн.

Перераспределение интенсивности волн в результате суперпозиции двух и более когерентных волн известно, как интерференция электромагнитных волн. В результате в пространстве происходит чередование максимумов и минимумов интенсивности излучения. Это приводит к формированию интерференционной картины [17, 18].

Интерференция возникает при разделении первоначальной волны на две волны при его прохождении через пластину феррита, расположенную на металлической поверхности (рис. 1). Волна, проходя через ферритовую пластину толщиной d , отразится два-

ды – от внутренней (граница раздела «феррит-металл») и наружной (граница раздела «феррит-воздух») ее поверхности [12, 17]. При каждом отражении от оптически более плотной среды теряется полуволна. Поскольку потеря полуволны при отражении от наружной поверхности компенсируется потерей полуволны при отражении от металлической поверхности, отражённые волны будут иметь оптическую разность хода Δ , определяемую выражением (2) [17]:

$$\Delta = 2d\sqrt{\epsilon \mu \sin^2 \alpha}, \quad (2)$$

где α – угол падения излучения. Поскольку, величина $\sin^2 \alpha$ значительно меньше произведения $\epsilon \cdot \mu$ феррита, выражение (2) можно записать в виде:

$$\Delta = 2d\sqrt{\epsilon \cdot \mu}, \quad (3)$$

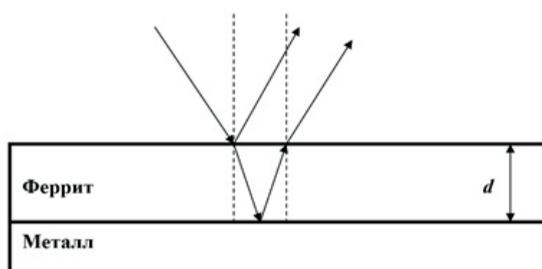


Рис. 1. Схема интерференции волн при отражении от поверхностей ферритовой пластины на металле.

Значительное гашение отраженных волн произойдет при условии интерференционного минимума, когда оптическая разность хода лучей, отраженных от наружной и внутренней поверхностей пластины будет равна [17]:

$$\Delta = \lambda(1/2 + m), \quad (4)$$

где m – целое число (0, 1, 2, 3 и т.д.).

При нулевом значении целого числа m из выражений (1) и (4) следует, что при толщине пластины, равной четверти длины электромагнитной волны в материале феррита, наблюдается основной интерференционный минимум отражения [9, 17]:

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{\lambda_{\phi}}{4}. \quad (5)$$

В пластинах с заданной толщиной интерференционный минимум должен достигаться лишь при фиксированных длинах излучения [17]

$$\lambda = \frac{4d\sqrt{\epsilon\mu}}{2m + 1}. \quad (6)$$

В случае ферритовых материалов, формируя заданные зависимости проницаемостей ϵ и μ от длины волны, обеспечивающие постоянство отношения длины волны к показателю преломления (согласно (5)) в мегагерцовом частотном диапазоне, можно обеспечить интерференционный минимум отражения от поверхности при постоянстве толщины покрытия [7].

2. Основные виды ферритов, используемых в качестве радиопоглощающих материалов

Согласно исследованиям С.Б. Бибикова, Д.Н. Покусина, Л. Гарнеро, А. Франкуа, Дж. Хьюгонина, С. Пихота [14, 18, 19] в интервале частот 100–1 000 МГц перспективно использование в качестве поглотителей электромагнитного излучения Mg-Zn-ферритов со значениями магнитной проницаемости до 1000 и диэлектрической проницаемости до 100. Преимуществом Mg-Zn-ферритов является относительная дешевизна и доступность сырьевых компонентов по сравнению с другими ферритами, поскольку они не содержат в составе соединения никеля. Использование Ni-Zn-ферритов с высокими значениями магнитной (до 2000) и диэлектрической (до 1000) проницаемостей позволяет изготавливать эффективные поглощающие слои с толщиной не более 10 мм в диапазоне частот 50–100 МГц [16]. У разработанных в настоящее время Ni-Zn-ферритов магнитная проницаемость в указанном диапазоне частот не превышает 2400, тогда как значения диэлектрической проницаемости не превышают 100 [13, 19]. Хорошими перспективами обладают Mn-Zn-ферриты, магнитная проницаемость которых достигает 10 000, а диэлектрическая проницаемость 50 000 [19].

В таблице приведены значения $\rho_{\text{эфф}}$ в зависимости от частоты [19]. Для Mn-Zn-феррита с $\mu_n = 1000$ и для Ni-Zn-феррита с $\mu_n = 700$ они рассчитаны по результатам измерений действительной и мнимой составляющих диэлектрической проницаемости ϵ' и ϵ'' , выполненных Полдером [20]. Высокие значения диэлектрической проницаемости Mn-Zn-ферритов, на порядок превышающие диэлектрическую проницаемость Ni-Zn-ферритов, объясняются формированием микроструктуры, где зерна феррита, обладающие электропроводностью из-за высокого содержания ионов Fe^{2+} , ограничены диэлектрическими зернограничными прослойками. Такая структура значительно повышает электроемкость феррита [19].

Значения диэлектрической проницаемостей и $\rho_{\text{эфф}}$ ферритов на различных частотах [13]

Феррит	f , МГц	ϵ'	$\rho_{\text{эфф}}$, Ом·м
Mg-Zn $\mu_n = 700$	0.1	1800	1350
	1	1800	1350
	10	1600	1300
	80	950	1150
Ni-Zn $\mu_n = 2000$	0.01	2100	950
	0.1	2050	950
	1	1100	910
	10	100	830
Mn-Zn $\mu_n = 10000$	0.1	75000	0.58
	1	57000	0.41
	10	35000	0.09
	80	20000	0.01

Здесь μ_n – начальная магнитная проницаемость; $\rho_{\text{эфф}}$ – эффективное удельное сопротивление в переменных полях (Ом·м); ϵ' – действительная часть диэлектрической проницаемости; f – частота.

Исследования К. Окадзаки, Н.Н. Шольца, К.А. Пискарева [13, 15] показали, что диэлектрическая проницаемость керамических материалов, в том числе и ферритов, в значительной степени определяется параметрами микроструктуры, соотношением элек-

тропроводностей зерен и границ зерен, а также легирующими микродобавками, формирующими на границах зерен прослойки с высокой диэлектрической проницаемостью. Поэтому большинство исследований направлены на разработку легирующих добавок и модификации технологических режимов получения ферритовых материалов с высокой диэлектрической проницаемостью в мегагерцовом диапазоне. Это позволяет разработать тонкие покрытия на основе ферритов для защиты от излучения в диапазоне частот от 10 до 50 МГц [14, 16, 19].

3. Факторы, влияющие на радиопоглощающие свойства ферритов

Ферриты, как правило, получают по керамической технологии, из оксидов железа, никеля, марганца, магния, цинка и др. [21–23]. Исходные компоненты перемешивают и измельчают в вибрационных мельницах, атриторах. Смесь оксидов подвергают прокатке с целью протекания синтеза феррита и проводят вторичное измельчение. Из синтезированных порошков со связкой формуют заготовки и проводят спекание в печах с контролируемой газовой средой [21–23]. На свойства феррита, получаемого по керамической технологии, влияют базовый состав и качество исходного сырья, в частности – его агломерированность, а также точное соблюдение необходимых технологических режимов. С целью управления процессами эволюции свойств дисперсных систем от исходных компонентов до готового ферритового материала целесообразно использовать модификаторы – поверхностно-активные вещества (ПАВ) и микродобавки оксидов, вводимые на стадии первого либо второго измельчения. ПАВ позволяют управлять реологическими свойствами дисперсных систем, а легирующие добавки – процессами формирования микроструктуры в процессе спекания [22–24].

Исследования показали актуальность разработок составов легирующих добавок и модифицирование самого технологического процесса получения ферритовых материалов с требуемыми свойствами [21, 22]. Таким образом, модифицирование обеспечивает возможность управления ходом технологического процесса с помощью малых воздействий, что приводит к наиболее оптимальному достижению требуемых свойств [22, 23].

Высокое значение диэлектрической проницаемости Mn-Zn-ферритов можно объяснить вкладом барьерной емкости границ зерен из-за существенной разницы электропроводности зерен и границ зерен [13, 15]. Однако, низкое удельное электросопротивление этих ферритов (0.1–10 Ом·м), обусловленное высоким содержанием оксида железа в базовом составе (51.0–53.0 моль %), приводит к значительному отражению электромагнитных волн. Поэтому современные исследования в направлении повышения качества радиопоглощающих ферритов проводятся по двум направлениям: 1 – повышение удельного сопротивления Mn-Zn-ферритов и 2 – увеличение вклада барьерной емкости в Ni-Zn-ферритах.

Исследования подтвердили, что значения проницаемостей ферритов определяются их плотностью, базовым составом, легирующими добавками и параметрами микроструктуры [25, 26]. Ряд исследований направлен на модификацию составов и применения легирующих добавок, использование новых режимов дезагрегации порошков, разработку связующих веществ с целью устранения межгранульных пор в пресс-заготовках, увеличения плотности и уровня значений диэлектрической проницаемости [27–29].

Известно [21, 22], что для достижения высокой плотности ферритов необходимо исключить крупные поры между агрегированными частицами и межгранульные поры. Установлено заметное влияние режимов измельчения порошков в вибрационной мельнице на процессы дезагрегации и влияние связующих и поверхностно-активных веществ на процессы удаления межгранульных пор при прессовании гранулированных ферритовых порошков и свойства спеченных ферритов [30, 31].

Исследования показывают, что с увеличением продолжительности измельчения растут плотность (рис. 2), магнитная и диэлектрическая проницаемости ферритов (рис. 3), что является следствием разрушения агрегатов, повышения плотности и формирования крупно-зернистой структуры [32].

В работе [32] установлено, что увеличение частоты вращения дебалансного вала вибрационной мельницы с 1 500 до 3 000 об/мин, позволило улучшить радиопоглощающие свойства ферритов и сместить пик поглощения в сторону низких частот (рис. 4). При этом время сухого измельчения сокращается до одного часа, а достигаемая насыпная плотность изменяется с 1 500 до 2 000 кг/м³ (спеченная плотность изменяется с 4 700 до 4 900 кг/м³). Это можно объяснить возрастанием силы удара шаров, пропорциональной квадрату частоты, т.е. происходит более полная дезагрегация.

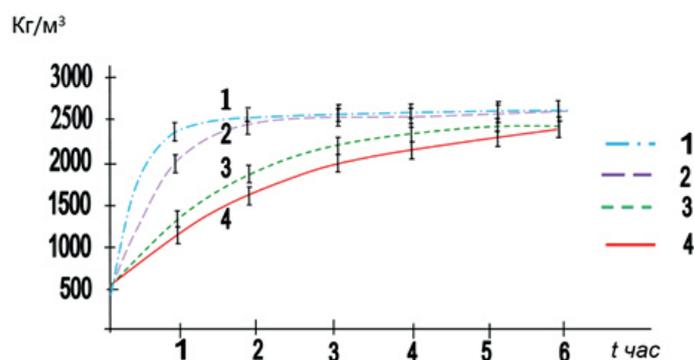


Рис. 2. Влияние типа мельницы и времени измельчения на насыпную плотность шихты феррита $Ni_{0,32}Zn_{0,68}Fe_2O_4$: 1 – вибромельница 3000 об/мин; 2 – вибромельница 1500 об/мин; 3 – атриттор; 4 – шаровая мельница.

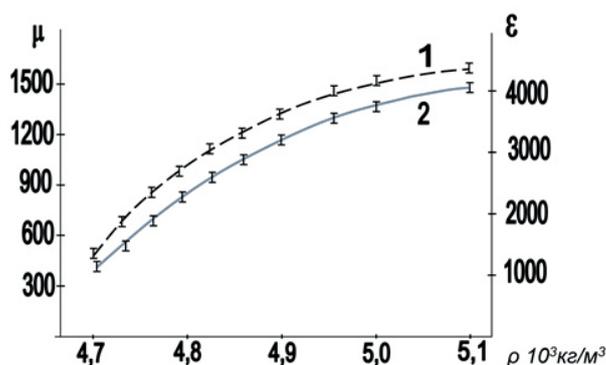


Рис. 3. Зависимости магнитной (1), диэлектрической (2) проницаемостей феррита $Ni_{0,3}Zn_{0,7}Fe_2O_4$ от плотности при частоте $f = 1$ МГц.

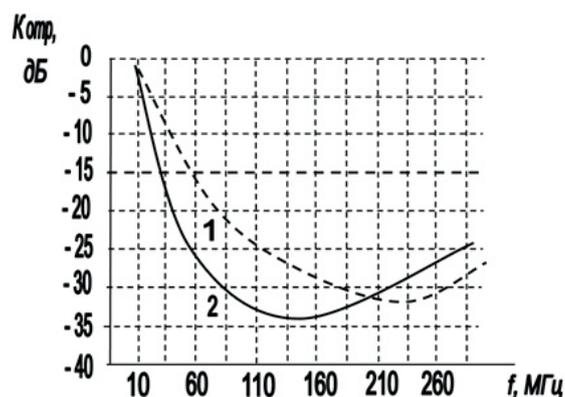


Рис. 4. Влияние частоты вращения дебалансового вала вибромельницы на частотную зависимость $K_{отр}$ феррита $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$: 1 – 1500 об/мин, 2 – 3000 об/мин. Время измельчения 2 часа.

В работах [33, 34] предложены новые модифицирующие составы поверхностно-активных веществ на основе олеата триэтаноламмония для измельчения порошков, а также связующие вещества на основе полиакрилатов и цитратов, обеспечивающие пластификацию гранулированных порошков. Разработанная связка позволяет на 20–30% снизить усилие прессования и повысить плотность пресс-заготовок на 5–7%.

Проведенные исследования показали [31, 34], что использование разработанной связки обеспечивает значительное снижение энергозатрат в производстве пресс-порошков, на операции прессования сырых заготовок, позволяет повысить плотность ферритовых пресс-заготовок и спеченных ферритов на 10–14%, что приводит к увеличению магнитной и диэлектрической проницаемостей и смещает в область низких частот пик уровня поглощения излучения.

С целью увеличения насыпной плотности пресс-порошка используют также предварительное уплотнение массы со связкой перед гранулированием, обеспечивающее повышение плотности гранул [21]. При этом установлено, что полученные по такой технологии пресс-порошки требуют повышенных давлений прессования для удаления межгранульных пор. С целью обеспечения деформации гранул использовали модифицированные связки, содержащие 0.5 масс. % цитрата триэтаноламмония [21, 22]. Разработанные в [31, 35] технологии гранулирования позволяют повысить плотность пресс-заготовок и плотность спеченных ферритов за счет активации спекания. При этом формируется более крупнозернистая структура, обеспечивающая большие значения диэлектрической проницаемости, что дает возможность сместить диапазон поглощения излучения в область низких частот (рис. 5).

Исследования, проведенные в работах [29, 36] на Ni-Zn-ферритах, показали, что с увеличением температуры от комнатной до 95–100 °С диэлектрическая проницаемость ферритов увеличивается и заметно снижается с дальнейшим возрастанием температуры, причем температура, соответствующая пиковым значениям диэлектрической проницаемости, примерно совпадает с температурой Кюри образцов (рис. 6–8) и повторяет ход температурной зависимости магнитной проницаемости. Данные, представленные на рис. 6 и 7, получены на образцах, спеченных и охлажденных в воздушной среде, а данные на рис. 8 – на образцах, полученных охлаждением в среде с пониженным парциальным

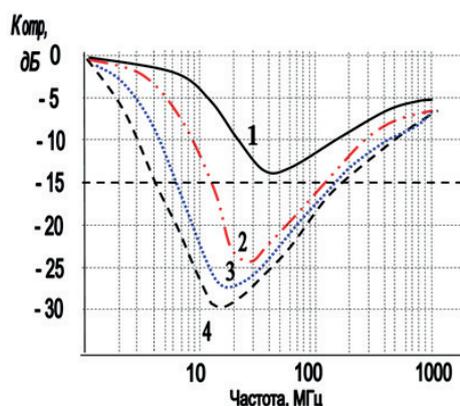


Рис. 5. Влияние давления предварительного прессования массы перед протиркой через сетку на частотную зависимость $K_{отр}$ феррита $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$: 1 – 0 МПа; 2 – 100 МПа; 3 – 400 МПа; 4 – 400 МПа с введением 0.5 масс. % цитрата триэтаноламмония.

давлением кислорода после спекания. Отмеченные закономерности примерно одинаковы как для легированных оксидами кальция и титана образцов, так и для образцов, не содержащих легирующих добавок.

Исследования [28, 37] показали, что легирование оксидами титана образцов, содержащих в базовом составе оксид железа сверх стехиометрии, повышает уровень поглощения электромагнитного излучения при частотах менее 100 МГц (рис. 9). Значительное влияние на диэлектрическую проницаемость ферритов оказывает величина парциального давления кислорода в зоне охлаждения после спекания [37]. Это связано с изменением электропроводности зерен в результате изменения концентрации ионов Fe^{2+} . Повышение уровня поглощения, видимо, связано с уменьшением длины волны излучения в феррите из-за повышения их диэлектрической проницаемости в результате формирования емкостного барьерного механизма Окадзаки в зернограничных прослойках.

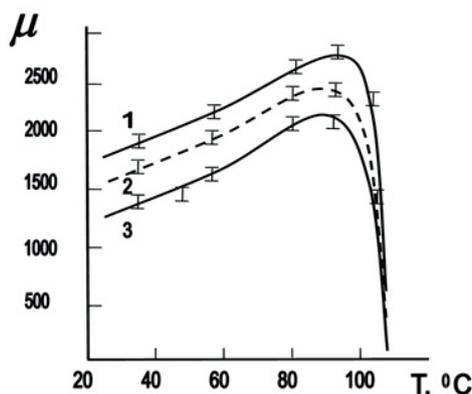


Рис. 6. Температурные зависимости магнитной проницаемости феррита $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$ при частоте 1 МГц: 1 – без добавок; 2 – с добавкой 0.5 % масс. TiO_2 ; 3 – с добавкой 0.2 % масс. CaO и 0.5 % масс. TiO_2 .

Данные рентгенофазового анализа на установке «Дрон-3» не подтвердили образование сегнетоэлектрических фаз типа титаната кальция $CaTiO_3$ на границах зерен [38]. Поэтому начальный рост диэлектрической проницаемости до магнитной точки Кюри можно объяснить ослаблением магнитного обменного взаимодействия в ферритах, что

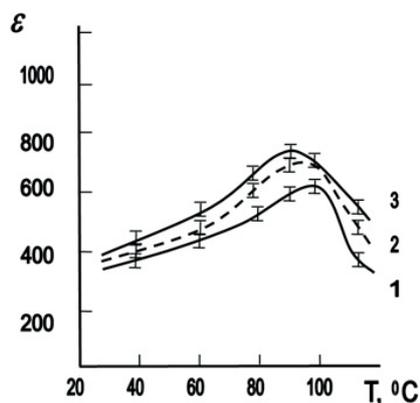


Рис. 7. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости феррита $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$ при частоте 1 МГц: 1 – без добавок; 2 – с добавкой 0.5 масс. % TiO_2 ; 3 – с добавкой 0.2 масс. % CaO и масс. 0.5 % TiO_2 .

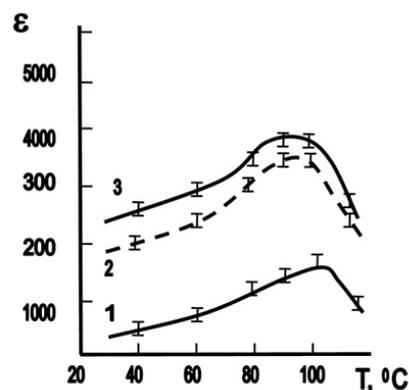


Рис. 8. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости феррита $Ni_{0.30}Zn_{0.65}Fe_{0.05}Fe_2O_4$ при частоте 1 МГц: 1 – без добавок; 2 – с добавкой 0,5 % масс. TiO_2 ; 3 – с добавкой 0.2 % масс. CaO и 0.5 % масс. TiO_2 .

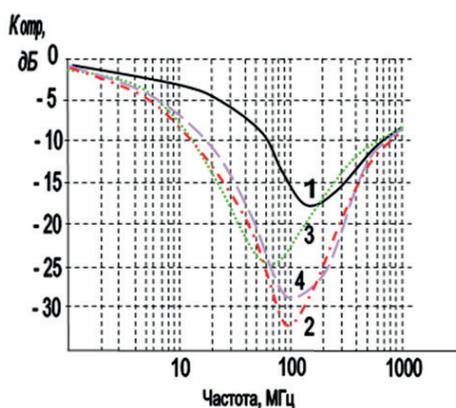


Рис. 9. Влияние частоты на коэффициент ослабления отраженной мощности от ферритовой пластины толщиной 6 мм: 1 – $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$; 2 – $Ni_{0.30}Zn_{0.65}Fe_{0.05}Fe_2O_4$ с добавкой 0.2 % масс. CaO и 0.5 % масс. TiO_2 ; 3 – $Ni_{0.30}Zn_{0.65}Fe_{0.05}Fe_2O_4$ без добавок; 4 – $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$ при охлаждении после спекания в среде с пониженным парциальным давлением кислорода.

повышает их электрическую поляризацию в результате облегчения смещения анионов и катионов в поле внешнего электромагнитного излучения.

Рост диэлектрической проницаемости ферритов, наблюдаемый при увеличении температуры спекания, как и рост их магнитной проницаемости, можно объяснить увеличе-

нием среднего размера зерен [39]. Это явление позволяет получить ферритовые материалы с сочетанием высоких значений магнитной и диэлектрической проницаемостей, что обеспечивает смещение частотного интервала поглощения излучения в область низких частот.

Выше температуры Кюри исчезает магнитный порядок в ферритах и процессы поляризации протекают без участия сил обменного взаимодействия [40]. Уменьшение диэлектрической проницаемости с дальнейшим увеличением температуры связано с хаотическим движением ионов под действием энергии теплового движения. Для выяснения более полной картины температурной зависимости диэлектрической проницаемости ферритов требуются дополнительные исследования [29].

Для оценки диэлектрической проницаемости ферритов часто используется модель К. Окадзаки (рис. 10) [15]. Согласно этой модели, высокие значения диэлектрической проницаемости Ni-Zn-ферритов, обладающих полупроводниковой электропроводностью, должны сохранять диэлектрические свойства границ зерен. В случае, когда электросопротивление зернограницных прослоек ферритов на несколько порядков превышает электросопротивление зёрен, границы зёрен формируют барьерные емкости (C_i) [25]:

$$C_i = \varepsilon_0 \varepsilon_r D^2 / d, \quad (7)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε_r – проницаемость зернограницной прослойки; D – средний размер зерна; d – толщина зернограницной прослойки.

Для упрощения расчета диэлектрической проницаемости оценивается емкость феррита в форме куба с размером ребра L , расположенного между медными пластинами (рис. 10а). Ёмкость системы [25]:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_\phi L^2 / L = \varepsilon_0 \varepsilon_\phi L, \quad (8)$$

где: ε_ϕ – диэлектрическая проницаемость феррита.

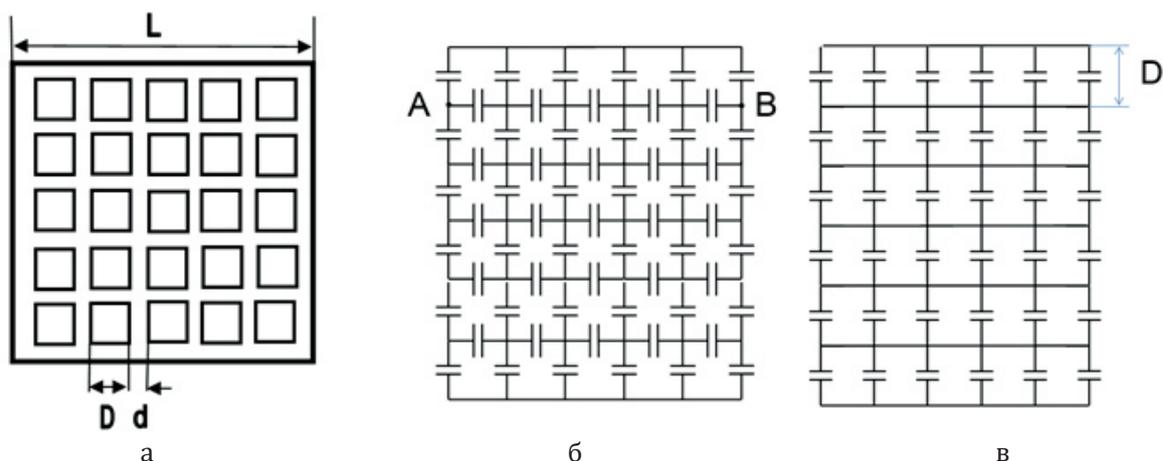


Рис. 10. Модель микроструктуры феррита и соответствующие ей эквивалентные схемы конденсаторов.

Модель структуры на рис. 10а можно заменить эквивалентными схемами конденсаторов (рис. 10б и 10в) [25]. С учетом примерного равенства потенциалов точек А и В можно показать, что диэлектрическая проницаемость ферритов зависит от диэлектрической проницаемости зернограницной фазы и параметров микроструктуры:

$$\varepsilon_{\phi} = \varepsilon_T \cdot D/d. \quad (9)$$

Крупнозернистая структура и высокая диэлектрическая проницаемость зернограничных прослоек определяют высокие значения диэлектрической проницаемости ферритов [38]. Следовательно, для увеличения диэлектрической проницаемости в ферритах необходимо увеличить средний размер зёрен (рис. 11), уменьшить толщину границ зёрен и увеличить диэлектрическую проницаемость зёрнограничной фазы.

В [41] показано, что введение в состав Ni-Zn-ферритового порошка со средним размером частиц 2–5 мкм, 0.5–1% масс. крупных фракций частиц феррита соответствующего состава размером 60–200 мкм, полученных измельчением спеченных изделий, приводит к размытию пика, соответствующего резонансу доменных стенок. Это можно объяснить формированием разнотернистой микроструктуры (рис. 12).

Установлено [42], что введение оксида висмута в порошок феррита перед спеканием приводит к образованию легкоплавкой эвтектики выше 800 °С, что активирует процессы массопереноса и формирует крупнозернистую структуру. Это увеличивает диэлектрическую проницаемость феррита.

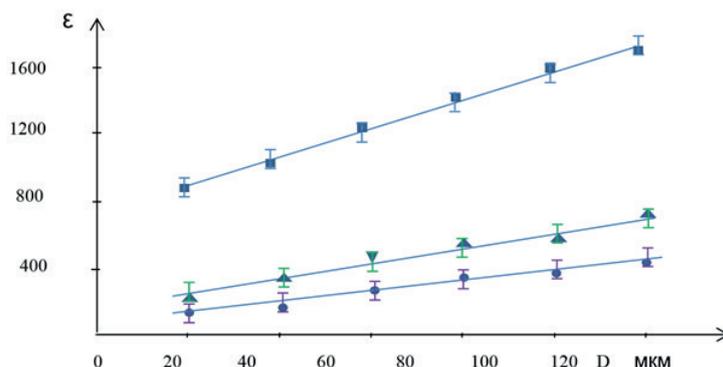


Рис. 11. Зависимость диэлектрической проницаемости феррита $\text{Ni}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ от размера зерен при $f = 1$ МГц.

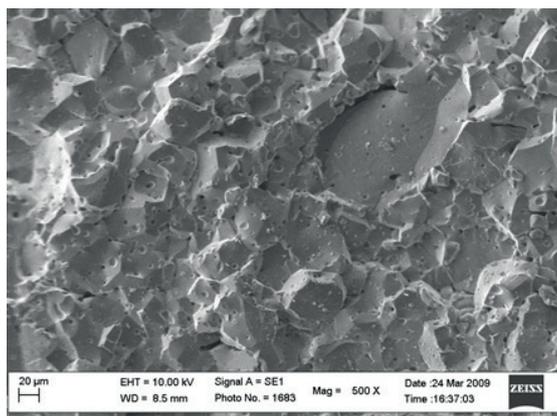


Рис. 12. Микроструктура $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, полученного предварительным введением в шихту перед спеканием крупных частиц феррита размером 60–200 мкм.

В [42] показано, что количество оксида висмута не должно превышать 1 масс. %. При более высоких количествах происходит снижение уровня параметров.

Возрастание уровня поглощения в Ni-Zn-ферритах, содержащих более 50 моль. % Fe_2O_3 и легированных оксидом висмута [42] (рис. 13), можно объяснить формированием

крупной разнотельной структуры с определенной электропроводностью зерен и тонкими светлыми прослойками из оксида висмута (рис. 14 и 15), эффективно закрепляющими доменные границы по границам зерен. В этом случае возможен резонанс доменных стенок [38].

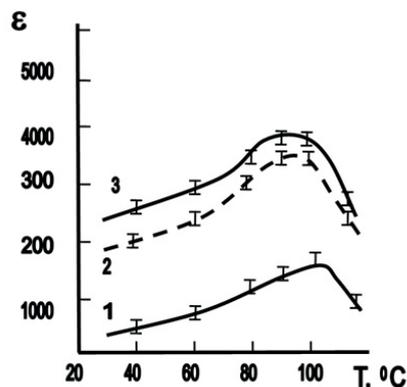


Рис. 13. Частотная зависимость коэффициента ослабления мощности отраженного сигнала от поверхности феррита $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$: 1 – 50 моль. % Fe_2O_3 и без добавок; 2 – с 50 моль. % Fe_2O_3 и 1 % масс. Bi_2O_3 ; 3 – с 52.4 моль. % Fe_2O_3 и 1 % масс. Bi_2O_3 .

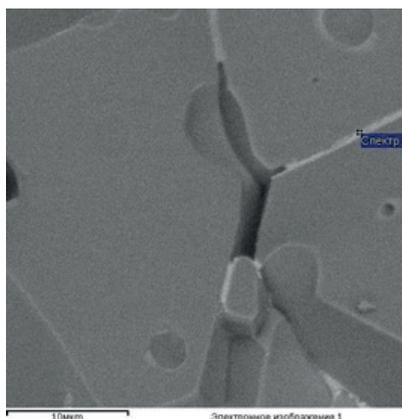


Рис. 14. Микроструктура $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$ феррита, легированного 1 % масс. оксидом висмута.

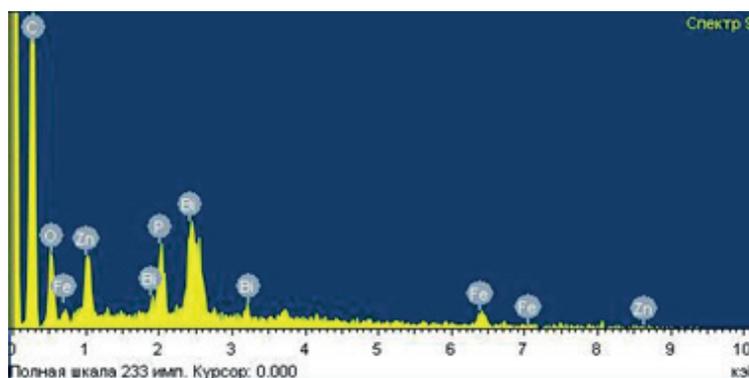


Рис. 15. Рентгеновские спектры зернограницной фазы феррита $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$, легированного 1% масс. оксидом висмута.

Исследования [43] показали, что зависимости магнитной и диэлектрической проницаемостей Ni-Zn-ферритов от частоты поля (рис. 16) обеспечивают минимум отражения от поверхности в широком частотном диапазоне.

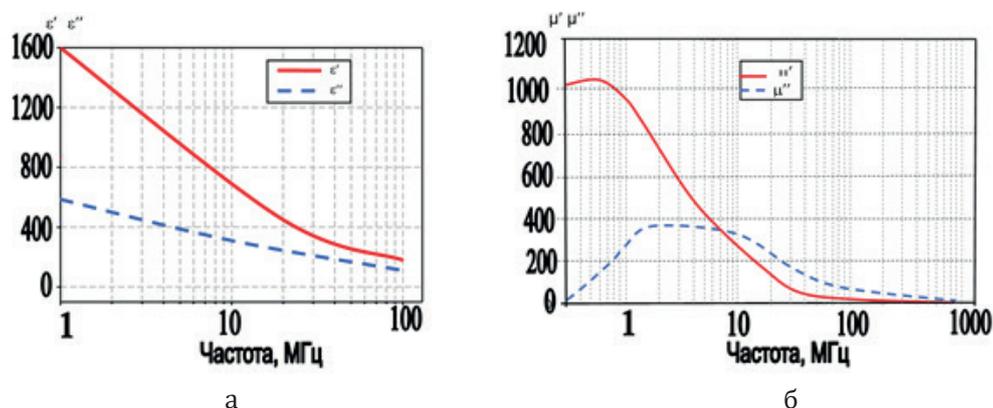


Рис. 16. Спектры ферритов $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$, полученных охлаждением после спекания в среде с пониженным парциальным давлением кислорода: а – комплексной диэлектрической проницаемости; б – комплексной магнитной проницаемости.

Толщина пластин [44], обеспечивающая минимум отражения в интервале 10–100 МГц, слабо зависит от частоты и составляет примерно 12 мм для образцов, спеченных в нормальной атмосфере и 6.5 мм для образцов, спеченных в среде с пониженным парциальным давлением кислорода (рис. 17).

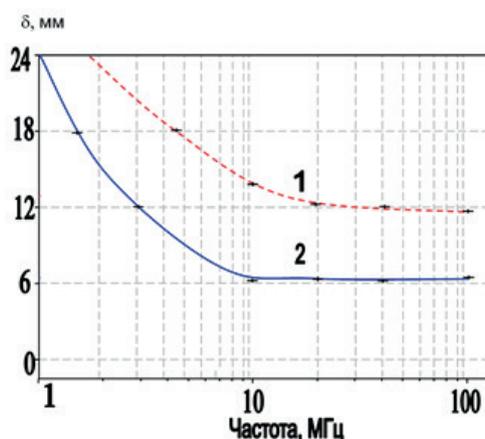


Рис. 17. Зависимости оптимальной толщины пластин феррита $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ от частоты, обеспечивающей условие ослабления отражения излучения более 15 дБ: 1 – спекание и последующее охлаждение в воздушной среде; 2 – спекание в воздушной среде и охлаждение в среде с пониженным парциальным давлением кислорода

В работах [43, 44] были исследованы системы на основе Mn-Zn-ферритов, которые обладают высокими значениями магнитной проницаемости более 2000 и диэлектрической проницаемости более 50 000. Следовательно, показатель преломления Mn-Zn-ферритов $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ будет больше Ni-Zn, а длина волны в ферритовой пластине – меньше.

Возрастание диэлектрической проницаемости Mn-Zn-ферритов до 200 °С, близкой к температуре Кюри, как и в случае Ni-Zn-ферритов можно объяснить ослаблением энергии обменного взаимодействия (рис. 18 и 19) [44].

Однако [43, 44], Mn-Zn-ферриты из-за низкого электросопротивления не могут быть использованы в качестве радиопоглощающего материала. Для повышения электросопротивления до 1–10 кОм·м Mn-Zn-ферриты легировали оксидами висмута и титана [44].

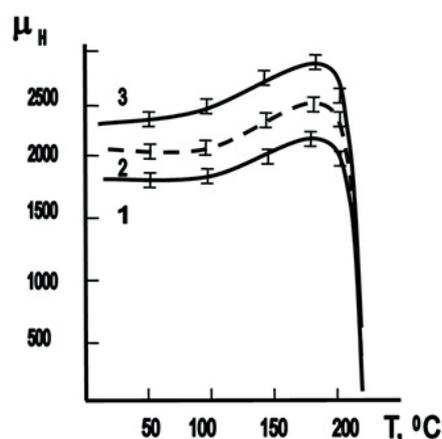


Рис. 18. Температурные зависимости магнитной проницаемости феррита $Mn_{0.602}Zn_{0.274}Fe_{0.124}Fe_2O_4$ при частоте 100 кГц: 1 – 1 280; 2 – 1 310; 3 – 1 340 °С.

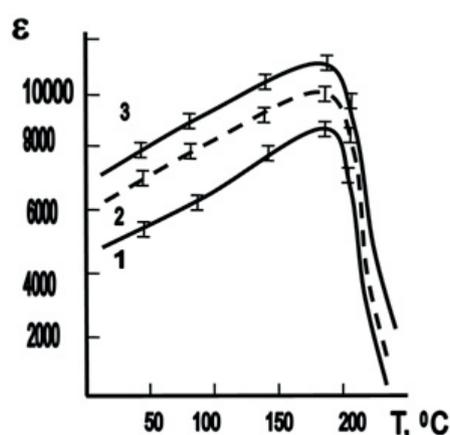


Рис. 19. Влияние температуры спекания на температурную зависимость диэлектрической проницаемости феррита $Mn_{0.602}Zn_{0.274}Fe_{0.124}Fe_2O_4$ при частоте 100 кГц: 1 – 1 280; 2 – 1 310; 3 – 1 340 °С.

Высокие значения магнитной и диэлектрической проницаемостей в Mn-Zn-ферритах, содержащих оксид железа 50.5–51.0 моль. % и легированных оксидом висмута, обладающих повышенным электросопротивлением зерен и крупной разномзернистой структурой с тонкими прослойками из оксида висмута, обеспечивают эффективное поглощение излучения (рис. 20) в интервале частот от 10 МГц до 100 МГц [44, 45].

Установлено, что наиболее эффективными оказались добавки TiO_2 (рис. 20). Добавки 4-х валентного титана, как и в случае ранее исследованных ферритов, приводят к связыванию ионов Fe^{2+} вдоль границ зерен [45]. Граница зерна будет иметь очень высокое значение электросопротивления по сравнению с глубиной зерна. Кроме этого, добавки TiO_2 формируют зернограницные прослойки с высокой диэлектрической проницаемостью.

В случае Mn-Zn-ферритов, как и в случае Ni-Zn-ферритов, структура с электропроводящими зернами и границами зерен с высоким электросопротивлением и диэлектрической проницаемостью способствует получению материала с высокой диэлектрической проницаемостью в целом [45]. Это объясняет возрастание уровня поглощения в интервале частот от 10 МГц до 100 МГц в Mn-Zn-ферритах, имеющих избыток оксида железа сверх стехиометрии и легированных оксидом титана.

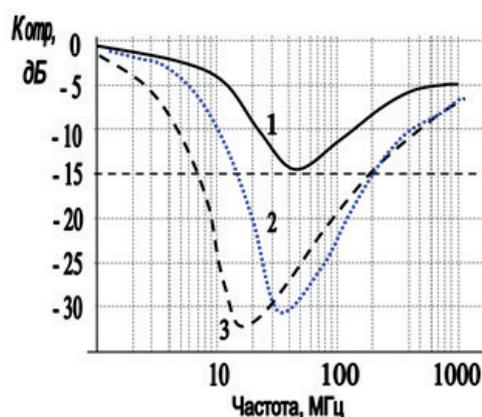


Рис. 20. Зависимость коэффициента ослабления мощности отраженного излучения Mn-Zn-феррита базового состава $Mn_{0.602}Zn_{0.274}Fe_{0.124}Fe_2O_4$:
1 – без добавок; 2 – с 1 % масс. оксида висмута; 3 – с 0.5 % масс. оксида титана.

4. Основные выводы

Проведенные исследования показали, что среди радиопоглощающих материалов в мегагерцовом диапазоне частот перспективными являются поликристаллические ферриты с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей, получаемые по керамической технологии. На основе этих ферритов изготавливаются радиопоглощающие покрытия малой толщины (менее 10 мм), эффективные в мегагерцовом диапазоне излучения. Исследования показывают, что ослабление мощности отраженного от поверхности феррита электромагнитного излучения обусловлено как интерференционными процессами, так и процессами диссипации электромагнитной энергии при распространении в феррите. Обратная пропорциональная связь между показателем преломления и частотой электромагнитного излучения в мегагерцовом диапазоне обеспечивает условие интерференционного минимума отраженного излучения при постоянстве толщины ферритовых покрытий. Высокий показатель преломления обеспечивает замедление скорости распространения электромагнитных волн в ферритах, что усиливает процессы диссипации их энергии.

В работе рассмотрены результаты изучения отечественных и зарубежных исследователей, в том числе авторов статьи, влияния базового химического состава ферритов, легирующих добавок, параметров микроструктуры и технологических режимов измельчения порошков, режимов спекания на их магнитную и диэлектрическую проницаемости. Исследования, проведенные Шольц Н.Н., Пискаревым К.А. и Покусиним Д.Н., показали, что высокие значения диэлектрической проницаемости ферритов обеспечиваются сочетанием диэлектрических свойств зернограничных прослоек и полупроводниковых свойств самих зерен, формирующих барьерную емкость границ зерен согласно механизму Окадзаки. Исследования Бибикова С.Б., Костишина В.Г. и Вергазова Р.М. показали, что, контролируя избыток оксида железа сверх стехиометрии и газовую среду в атмосфере печи спекания, можно обеспечить полупроводниковые свойства зерен феррита. Согласно работам Андреева В.Г., Бибикова С.Б., Меньшовой С.Б., легирование ферритов оксидами TiO_2 , Bi_2O_3 , CaO в количестве до 1 масс. % позволяет повысить электросопротивление и диэлектрическую проницаемость зернограничных прослоек, обеспечивая повышение диэлектрической проницаемости феррита в целом. По результатам большинства исследований

установлено, что формирование плотной крупнозернистой структуры обеспечивает повышение как магнитной, так и диэлектрической проницаемостей.

Работа выполнена за счет средств государственного контракта № П953 от 27 мая 2010 г. и соглашения РНФ № 19-19-00694 от 06 мая 2019 г.

Литература:

1. Кривошеин Д.А., Муравей Л.А., Роева Н.Н., Шорина О.С., Эриашвили Н.Д., Юровицкий Ю.Г., Яковлев В.А. Экология и безопасность жизнедеятельности: Учеб. пособие для вузов, под ред. Л.А. Муравья. М.: ЮНИТИ-ДАНА; 2000. 447 с.
2. Буриченко Л.А. Охрана труда в гражданской авиации: Учеб. для вузов. М.: Транспорт; 1993. 288 с.
3. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. Физические основы технологии STEALTH. СПб: ВВМ; 2007. 284 с. ISBN 5-9651-0240-2
4. Foxwell D., Jaxen D. Stealth approach: creating stealth ships. *Jane's IDR (International Defense Review)*. 1988;31:43-45, 47-48.
5. Wang J., Lu L. Microwave Absorbing Features of $Ce_2(Co_{0.3}Fe_{0.7})_{17}$ /Ferrite Coating Material. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*. 2019;29(1):39-44. <https://doi.org/10.18280/rcma.290107>
6. Akinay Y., Hayat F., Colak B. Absorbing properties and structural design of PVB/ Fe_3O_4 nanocomposite. *Mater. Chem. Phys.* 2019;229:460-466. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.03.039>
7. Druv P., Pullar R., Singh C., Carvalho F. Design and development of Ga-substituted Z-type hexaferrites for microwave absorber applications: Mössbauer, static and dynamic properties. *Ceram. Int.* 2020;47(1):1145-1162. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.231>
8. Айзикович Б.В., Алексеев А.Г., Клиодт М.Ф., Старостин А.П. Теоретические основы создания радиопоглощающих покрытий на основе наноструктурированных материалов. *Труды ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова*. 2006;30(314):136-145.
9. Штагер Е.А. Отражение радиоволн от кораблей и других морских объектов. Санкт-Петербург: ВВМ; 2005. 418 с. ISBN 5-9651-0041-8
10. Kumar A., Singh S. Development of Coatings for Radar Absorbing Materials at X-band. *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*. 2018;330:012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012006>
11. Вызулин С.А., Каликинцева Д.А., Мирошниченко Е.Л., Бузько В.Ю., Горячко А.И. Радиопоглощающие свойства никель-цинковых ферритов, синтезированных различными способами. *Изв. РАН. Серия физическая*. 2018;82(8):1045-1047. <https://doi.org/10.1134/S0367676518080434>
12. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Особенности интерференции при отражении электромагнитных волн от ферритовых пластин на металлической подложке. В: *Актуальные проблемы науки: сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф.*; Пенза: Типография ИП Соколов А.Ю.; 2014. С. 215-219.
13. Шольц Н.Н., Пискарев К.А. Ферриты для радиочастот. Л.: Энергия, 1966. 324 с.
14. Бибииков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения. Труды XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж: Изд. НПФ «Саквоее»; 2009. С. 1578-1584.
15. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков: пер. с яп. М.: Энергия; 1976. 336 с.
16. Вергазов Р.М. Влияние легирующих добавок на диэлектрическую проницаемость Ni-Zn ферритов. *Актуальные проблемы науки: сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф.* Пенза: Изд-во ПГУ; 2018. С. 235-240.
17. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Академия; 2008. 719 с. ISBN 978-5-7695-4875-8
18. Garnero L., Franchois A., Hugonin J., Pichot C., Joachimowicz N. Microwave imaging-complex permittivity reconstruction by simulated annealing. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1991;39(11):1801-1807. <https://doi.org/10.1109/22.97480>
19. Покусин Д.Н., Чухлебов Э.А., Залесский М.Ю. Комплексная магнитная проницаемость ферритов в области естественного ферромагнитного резонанса. *Радиотехника и электроника*. 1991;36(11):2085-2091.
20. Ранкис Г.Ж. Динамика намагничивания поликристаллических ферритов. Рига: Зинатне; 1981. 186 с.
21. Летюк Л.М., Журавлев Г.И. Химия и технология ферритов. Л.: Химия; 1983. 256 с.
22. Анциферов В.Н., Летюк Л.М., Андреев В.Г., Гончар А.В., Дубров А.Н., Костишин В.Г., Майоров В.Р., Сатин А.И. Проблемы порошкового материаловедения. Часть 5. Технология производства порошковых ферритовых материалов. Екатеринбург: УрО РАН; 2005. 408 с.
23. Анциферов В.Н., Гончар А.В., Андреев В.Г., Летюк Л.М. Водорастворимые связующие вещества в технологии порошковых ферритовых материалов. Пермь: Респ. инженер.-техн. центр порошковой металлургии: Перм. гос. техн. ун-т; 1996 (1997). 188 с. ISBN 5-88151-112-3

24. Андиферов В.Н., Андреев В.Г., Гончар А.В. и др. Реология дисперсных систем в технологии функциональной магнитной керамики. Екатеринбург: УРО РАН; 2003. 208 с.
25. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б., Подгорная С.В., Морченко А.Т. Влияние микроструктуры на свойства радиопоглощающих Ni-Zn-ферритов. *Известия вузов. Материалы электронной техники*. 2010;4:18-21.
26. Меньшова С.Б., Лапшин Э.В., Бибииков С.Б., Прокофьев М.В., Вергазов Р.М. Влияние параметров микроструктуры на радиофизические характеристики Ni-Zn ферритовых материалов. *Известия вузов. Поволжский регион. (Технические науки)*. 2010;3(15):123-134.
27. Вергазов Р.М., Костишин В.Г., Андреев В.Г., Морченко А.Т., Комлев А.С., Николаев А.Н. Влияние легирующих добавок на свойства радиопоглощающих Mg-Zn-ферритов, полученных методом радиационно-термического спекания. *Инженерный вестник Дона: электрон. науч. журн.* 2013;3(26):118.
28. Вергазов Р.М. Влияние добавок TiO₂ на радиопоглощающие свойства Mn-Zn ферритов. В: Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза; 2016. Т. 2. С. 103-104.
29. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние легирующих добавок на температурную зависимость диэлектрической проницаемости Ni-Zn ферритов. Актуальные проблемы науки: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Изд-во ПГУ; 2019. С. 161-166.
30. Макаров Б.В., Гильденблат Ш.Н. Влияние некоторых технологических факторов на плотность изделий из Mn-Zn ферритов. *Электронная техника. Серия 7*. 1971;2:37-44.
31. Макаров Б.В., Андреев В.Г., Летюк Л.М. Деформация гранул при сухом прессовании ферритовых прес-поршковых. *Порошковая металлургия*. 1985;5:6-9.
32. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б., Морченко А.Т., Канева И.И., Майоров В.Р. Влияние технологических факторов на диэлектрическую проницаемость и радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов. *Известия вузов. Материалы электронной техники*. 2011;2:33-37.
33. Андреев В.Г., Меньшова С. Б. Влияние степени агрегированности порошков на процессы структурообразования и свойства высокопроницаемых Mn-Zn-ферритов. *Известия вузов. Поволжский регион. (Технические науки)*. 2007;3:143-149.
34. Летюк Л.М., Костишин В.Г., Гончар А.В. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. М.: МИСиС; 2005. 352 с. ISBN 5-87623-133-9
35. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M., Bibikov S.B., Prokofiev M.V. Influence of microstructure on properties of Ni-Zn ferrite radio-absorbing materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;394(1):1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.007>
36. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Исследование температурной зависимости диэлектрической проницаемости радиопоглощающих Ni-Zn ферритов. *Актуальные проблемы науки: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.* Кузнецк: Кузнецкий институт информационных и управленческих технологий; 2017. С. 152-154.
37. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б. Влияние легирующих добавок и газового режима атмосферы печи при спекании на поглощение электромагнитных волн Ni-Zn ферритами. *Труды VIII международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов»*. 9-10 июня 2011 г. Алматы. С. 521-530.
38. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M. The Influence of Basic Composition and Microstructures on the Properties of Ni-Zn Ferrite Radio-Absorbing Materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;393(1):569-573. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.030>
39. Kostishyn V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Morchenko A.T., Kaneva I.I., Maiorov V.R. Influence of Technological Factors on Dielectric Permeability and Radio-Wave Absorbing Characteristics of Nickel-Zinc Ferrites. *Russian Microelectronics*. 2012;41(8):469-473. <https://doi.org/10.1134/S1063739712080094>
40. Druv P., Meena S., Pullar R., Carvalho F. Investigation of structural, magnetic and dielectric properties of gallium substituted Z-type Sr₃Co_{2-x}Ga_xFe₂₄O₄₁ hexaferrites for microwave absorbers. *J. Alloy. Compd.* 2020;822:153470. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153470>
41. Меньшова С.Б., Бибииков С.Б., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Куликовский Э.И. Способ получения радиопоглощающего никель-цинкового феррита: Пат. 2486645. Россия. Заявка № 2011141352/07. заявл. 13.10.2011; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18.
42. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Подгорная С.В. Способ получения радиопоглощающего магний-цинкового феррита: Пат. 2454747 Россия. Заявка № 2011115700/07. заявл. 21.04.2011; опубл. 27.06.2012. Бюл. №18.
43. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б. Исследование поглощения электромагнитных волн в композиционных материалах на основе порошков Mn-Zn-ферритов. *Труды IX Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов»*. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет»; 2012. С. 619-627.
44. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Исследование радиопоглощающих свойств Mn-Zn ферритов. *Актуальные проблемы науки: материалы X Междунар. науч.-практ. конф.* Кузнецк: Кузнецкий институт информационных и управленческих технологий; 2015. С. 165-168.

References:

1. Krivoshein D.A., Muravei L.A., Roeva N.N., Shorina O.S., Eriashvili N.D., Yurovitskii Yu.G., Yakovlev V.A. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: Ucheb. posobie dlya vuzov* (Ecology and life safety: textbook for universities, (Ed.) L.A. Muravei. Moscow: YUNITI-DANA; 2000. 447 p. (in Russ.).
2. Burichenko L.A. *Okhrana truda v grazhdanskoj aviatsii: Ucheb. dlya vuzov* (Labor protection in civil aviation: Textbook for universities). Moscow: Transport; 1993. 288 p. (in Russ.).
3. Alekseev A.G., Shtager E.A., Kozyrev S.V. *Fizicheskie osnovy tekhnologii STEALTH* (Physical foundation of stealth technology). Sankt Peterburg: VVM.com Ltd Publishing; 2007; 284 p. (in Russ.). ISBN 5-9651-0240-2
4. Foxwell D., Jaxen D. Stealth approach: creating stealth ships. *Jane's IDR (International Defense Review)*. 1988;31 43-45, 47-48.
5. Wang J., Lu L. Microwave Absorbing Features of $\text{Ce}_2(\text{Co}_{0.3}\text{Fe}_{0.7})_{17}$ /Ferrite Coating Material. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*. 2019;29(1):39-44.
<https://doi.org/10.18280/rcma.290107>
6. Akinay Y., Hayat F., Colak B. Absorbing properties and structural design of PVB/ Fe_3O_4 nanocomposite. *Mater. Chem. Phys.* 2019;229:460-466.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.03.039>
7. Druv P., Pullar R., Singh C., Carvalho F. Design and development of Ga-substituted Z-type hexaferrites for microwave absorber applications: Mössbauer, static and dynamic properties. *Ceram. Int.* 2020;47(1):1145-1162.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.231>
8. Aizikov B.V., Alekseev A.G., Kliodt M.F., Starostin A.P. Theoretical foundations of the creation of radio-absorbing coatings based on nanostructured materials. *Trudy TsNII im. Akademika A.N. Krylova = Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2006;30(134):136-145 (in Russ.).
9. Shtager E.A. *Otazhenie radiovoln ot korablei i drugikh morskikh ob"ektov* (Reflection of radio waves from ships and other marine objects). St. Petersburg: VVM; 2005. 418 p. (in Russ.). ISBN 5-9651-0041-8
10. Kumar A., Singh S. Development of Coatings for Radar Absorbing Materials at X-band. *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*. 2018;330:012006.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012006>
11. 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. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018;82(8):943-945.
<https://doi.org/10.3103/S1062873818080439>
12. Vergazov R.M., Andreev V.G. Features of interference when electromagnetic waves reflected from ferrite plates on a metal substrate. In: Proceedings IX Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nye problemy nauki* (Actual problems of science). Penza: Sokolov A.Yu. Publishing House; 2014. P. 215-219 (in Russ.).
13. Shol'ts N.N., Piskarev K.A. *Ferrity dlya radiochastot* (Ferrites for radio frequencies). Leningrad: Energiya; 1966. 324 p. (in Russ.).
14. Bibikov S.B., Titov A.N., Cherepanov A.K. Synthesis of material with a given reflection coefficient in a wide range of frequencies and angles of incidence. In: *Trudy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'»*. (Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference «Radar, Navigation, Communication»). Voronezh: «Sakvoee» Publishing House; 2009. P. 1578-1584 (in Russ.).
15. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov: perevod s yaponskogo* (Technology of ceramic dielectrics). Moscow: Energiya; 1976. 336 p. (in Russ.).
[Orazaki K. Ceramic engineering for dielectrics. Tokyo; 1969.]
16. Vergazov R.M. Influence of alloying additions on the dielectric constant of Ni-Zn ferrites. In: Proceedings XIII Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nye problemy nauki = Actual problems of science*. Penza: PGU Publishing House; 2018. P. 235-240 (in Russ.).
17. Detlaf A.A., Yavorskii V.M. *Kurs fiziki: Ucheb. posobie dlya vtuzov* (Physics course: Textbook. Manual for technical colleges). Moscow: Akademiya; 2008. 719 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7695-4875-8
18. Garner L., Franchois A., Hugonin J., Pichot C., Joachimowicz N. Microwave imaging-complex permittivity reconstruction by simulated annealing. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1991;39(11):1801-1807.
<https://doi.org/10.1109/22.97480>
19. Pokusin D.N., Chukhlebov E.A., Zalesskii M.Yu. Complex permeability ferrite in the natural ferromagnetic resonance. *Radiotekhnika i elektronika = Technology and Electronics*. 1991;36(11):2085-2091 (in Russ.).
20. Rankis G.Zh. *Dinamika namagnichivaniya polikristallicheskih ferritov* (Dynamics of magnetization of polycrystalline ferrites). Riga: Zinatne; 1981. 186 p. (in Russ.).
21. Letyuk L.M., Zhuravlev G.I. *Khimiya i tekhnologiya ferritov* (Ferrite chemistry and technology). Leningrad: Khimiya; 1983. 256 p. (in Russ.).
22. Antsiferov V.N., Letyuk L.M., Andreev V.G., Gonchar A.V., Dubrov A.N., Kostishin V.G., Maiorov V.R., Satin A.I. *Problemy poroshkovogo materialovedeniya. Chast' 5. Tekhnologiya proizvodstva poroshkovykh ferritovykh materialov* (Problems of powder materials science. Part 5. Technology of production of ferrite powder materials). Ekaterinburg: URO RAN Publ.; 2005. 408 p. (in Russ.).

23. Antsiferov V.N., Gonchar A.V., Andreev V.G., Letyuk L.M. *Vodorastvorimye svyazuyushchie veshchestva v tekhnologii poroshkovykh ferritovykh materialov* (Water-soluble binders in the technology of ferrite powder materials). Perm': Resp. inzhener.-tekhn. tsentr poroshkovoy metallurgii: Perm National Research Polytechnic University Publishing House; 1996 (1997). 188 p. (in Russ.). ISBN 5-88151-112-3
24. Antsiferov V.N., Andreev V.G., Gonchar A.V. et al. *Reologiya dispersnykh sistem v tekhnologii funktsional'noi magnitnoi keramiki* (Rheology of dispersed systems in the technology of functional magnetic ceramics). Ekaterinburg: URO RAN Publ.; 2003. 208 p. (in Russ.).
25. Kostishin V.G., Vergazov P.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Podgornaya S.V., Morchenko A.T. Effect of microstructure on properties of radio-absorbing nickel-zinc ferrites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2010;4:18-21 (in Russ.).
26. Men'shova S.B., Lapshin E.V., Bibikov S.B., Prokofev M.V., Vergazov R.M. Influence of microstructure parameters on the radiophysical characteristics of Ni-Zn ferrite materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolzhskii region. (Tekhnicheskie nauki) = University Proceedings. Volga region. (Technical sciences)*. 2010;3(15):123-134 (in Russ.).
27. Vergazov R.M., Kostishin V.G., Andreev V.G., Morchenko A.T., Komlev A.S., Nikolaev A.N. Influence of alloying additives on the properties of radio-absorbing Mg-Zn-ferrites obtained by the method of radiation-thermal sintering. *Inzhenernyi vestnik Dona: elektron. nauch. zhurn. = Engineering J. of Don: electronic scientific journal*. 2013;3(26):118 (in Russ.).
28. Vergazov R.M. Influence of TiO₂ additives on the radio-absorbing properties of Mn-Zn ferrites. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. Penza; 2016. V. 2. P. 103-104 (in Russ.).
29. Vergazov R.M., Andreev V.G. The influence of alloying additives on the temperature dependence of the dielectric constant of Ni-Zn ferrites. In: Proceedings XV Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nyye problemy nauki = Actual problems of science*. Penza: PGU Publishing House; 2019. P. 161-166 (in Russ.).
30. Makarov B.V., Gil'denblat Sh.N. Influence of some technological factors on the density of products from Mn-Zn ferrites. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 7 = Electronic Engineering. Series 7*. 1971;2:37-44 (in Russ.).
31. Makarov B.V., Andreev V.G., Letyuk L.M. Deformation of granules during dry pressing of ferrite press-powders. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy*. 1985;5:6-9 (in Russ.).
32. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Morchenko A.T., Kaneva I.I., Maiorov V.R. The influence of technology factors on the dielectric permeability and radio absorbing characteristics of nickel-zinc ferrites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2011;2:33-37 (in Russ.).
33. Andreev V.G., Menshova S.B. Influence of the degree of aggregation of powders on the processes of structure formation and properties of highly permeable Mn – Zn ferrites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolzhskii region. (Tekhnicheskie nauki) = University Proceedings. Volga region. (Technical sciences)*. 2007;3:143-149 (in Russ.).
34. Letyuk L.M., Kostishin V.G., Gonchar A.V. *Tekhnologiya ferritovykh materialov magnitoelektronik* (Ferrite materials technology for magnetoelectronics). Moscow: MISiS Publishing House; 2005. 352 p. (in Russ.). ISBN 5-87623-133-9
35. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M., Bibikov S.B., Prokofiev M.V. Influence of microstructure on properties of Ni–Zn ferrite radio-absorbing materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;394(1):1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.007>
36. Vergazov R.M., Andreev V.G. Investigation of the temperature dependence of the dielectric constant of radio-absorbing Ni-Zn ferrites. In: Proceedings XII Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nyye problemy nauki = Actual problems of science*. Kuznetsk: KIIUT Publishing House; 2017. P. 152-154 (in Russ.).
37. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B. Influence of alloying additives and the gas regime of the furnace atmosphere during sintering on the absorption of electromagnetic waves by Ni-Zn ferrites. In: Proceedings of the VIII international conference «*Perspektivnyye tekhnologii, oborudovaniye i analiticheskiye sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov*» = «*Advanced Technologies, Equipment and Analytical Systems for Materials Science and Nanomaterials*». June 9-10, 2011. Almaty. P. 521-530 (in Russ.).
38. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M. The Influence of Basic Composition and Microstructures on the Properties of Ni-Zn Ferrite Radio-Absorbing Materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;393(1):569-573. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.030>
39. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Morchenko A.T., Kaneva I.I., Maiorov V.R. Influence of Technological Factors on Dielectric Permeability and Radio-Wave Absorbing Characteristics of Nickel-Zinc Ferrites. *Russian Microelectronics*. 2012;41(8):469-473. <https://doi.org/10.1134/S1063739712080094>
40. Druv P., Meena S., Pullar R., Carvalho F. Investigation of structural, magnetic and dielectric properties of gallium substituted Z-type Sr₃Co_{2-x}Ga_xFe₂₄O₄₁ hexaferrites for microwave absorbers. *J. Alloy. Compd.* 2020;822:153470. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153470>
41. Men'shova S.B., Bibikov S.B., Vergazov R.M., Andreev V.G., Kulikovskii E.I. Method of producing radio-absorbing nickel-zinc ferrite: Pat. 2486645 Russia. Publ. 27.06.2013. Bul. № 18 (in Russ.).

42. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Podgornaya S.V. Method for producing radio-absorbing magnesium-zinc ferrite: Pat. 2454747 Russia. Publ. 27.06.2012. Bul. № 18 (in Russ.).

43. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B. Investigation of the absorption of electromagnetic waves in composite materials based on Mn-Zn-ferrite powders. In: Proceedings of the IX international conference «*Perspektivnyye tekhnologii, oborudovaniye i analiticheskiye sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov*» = «*Advanced Technologies, Equipment and Analytical Systems for Materials Science and Nanomaterials*». Astrakhan: Astrakhan University Publishing House; 2012. P. 619-627 (in Russ.).

44. Vergazov R.M., Andreev V.G. Investigation of the radio-absorbing properties of Mn-Zn ferrites. In: Proceedings X Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nyye problemy nauki = Actual problems of science*. Kuznetsk: KIIUT Publishing House; 2015. P. 165-168 (in Russ.).

Об авторах:

Костишин Владимир Григорьевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Академии Инженерных Наук Российской Федерации, профессор, заведующий кафедрой технологии материалов электроники Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4).

Вергазов Рашит Мунирович, преподаватель, ГАПОУ Пензенской области «Кузнецкий колледж электронных технологий» (442530, Россия, Пензенская обл., г. Кузнецк, ул. Комсомольская, д. 34а).

Меньшова Светлана Борисовна, кандидат технических наук, учитель математики и физики ГБОУ школа № 962 (127562, Россия, Москва, Алтуфьевское шоссе, д. 30А).

Исаев Игорь Магомедович, кандидат технических наук, доцент, проректор по безопасности и общим вопросам Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4).

About the authors:

Vladimir G. Kostishin, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Corresponding Member of the Academy of Engineering Sciences of the Russian Federation, Professor, Head of the Department of Technology of Electronics Materials, National Research Technological University "Moscow Institute of Steel and Alloys" (4, Leninsky Pr., Moscow, 119049, Russia).

Rashit M. Vergazov, teacher, GAPOU of the Penza region «Kuznetsk College of Electronic Technologies» (34a, Komsomolskaya ul., Penza Region, Kuznetsk, 442530, Russia).

Svetlana B. Menshova, Cand. Sci. (Engineering), teacher of mathematics and physics, GBOU school №962 (30A, Altufevskoe shosse, Moscow, 127562, Russia).

Igor M. Isaev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Security and General Affairs of the National Research Technological University "Moscow Institute of Steel and Alloys" (4, Leninsky Pr., Moscow, 119049, Russia).

Поступила: 25.09.2020; получена после доработки: 15.10.2020; принята к опубликованию: 30.10.2020.