

Градиентные структуры Ni – Zn ферритов для устройств защиты от электромагнитного излучения

В. В. Каранский, С. В. Смирнов, А. С. Климов, Е. В. Саврук

Получены градиентные структуры Ni – Zn ферритов для изделий защиты от электромагнитного излучения методом обработки поверхности образцов пучком низкоэнергетических электронов. Для генерации электронного пучка использовали уникальную разработку — форвакуумный плазменный электронный источник, позволяющий формировать и транспортировать пучок с плотностью мощности до 10^5 Вт/см² в условиях повышенного давления и высокого газовыделения. В результате обработки на поверхности ферритов образуются градиентные структуры. Проведен теоретический анализ и экспериментальное исследование полученных структур “немагнитный проводник – феррит”, характеризующихся повышенным коэффициентом затухания и уменьшенным коэффициентом отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот от 0,5 до 2,5 ГГц. Показана возможность получения приповерхностных слоев, обедненных цинком, с повышенной электропроводностью и пониженной магнитной проницаемостью.

Ключевые слова: градиентные структуры Ni – Zn феррит, электронно-лучевая обработка, электромагнитное излучение, коэффициент затухания, коэффициент отражения.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-5-39-46

Введение

Ферритовые материалы находят применение не только в электро- и радиотехнике, но и во многих других областях науки и техники, причем диапазон их применения постоянно растет [1, 2]. Особое внимание ферритам уделяется в медицине и экологии для обеспечения защиты от электромагнитного излучения, в приемо-передающих устройствах сотовой связи, для технологического оборудования и медицинской диагностической аппаратуры. Из множества защитных материалов феррошпинели по совокупности электрических, магнитных и эксплуатационных свойств наиболее полно удовлетворяют предъявляемым требованиям к радиопоглощающим устройствам, не менее важным является и экономический аспект их применения [3]. Кроме того, керамическая технология производства ферритовых изделий позволяет получать защитные устройства практически любой формы и размеров. Традиционно в области низких частот

(до 30 МГц) широко используют Mn – Zn ферриты, но для более высоких частот (более 100 МГц) лучшими поглощающими характеристиками обладают Ni – Zn ферриты [4, 5]. Высокое удельное сопротивление и относительно низкие значения диэлектрической и магнитной проницаемости позволяют создавать поглощающие структуры с достаточно низким коэффициентом отражения, однако, следует отметить, что эффективность их использования в широком частотном диапазоне, как правило, низка. Поэтому разработка материалов и изделий, поглощающих электромагнитное излучение в широком частотном диапазоне, включая и СВЧ-диапазон, является актуальной проблемой.

Для повышения эффективности устройств, в последнее время ферритовым материалам стали придавать новые свойства, путем создания на поверхности градиентных или текстурированных структур, например, “немагнитный проводник – феррит” [6 – 8]. Данные структуры могут быть эффективно использованы в качестве защитных

элементов не только в низкочастотном радиодиапазоне, но и в СВЧ диапазоне от 1 до 10 ГГц. Ферритовые изделия с градиентной структурой могут быть получены при обработке их поверхностью низкоэнергетическим электронным пучком [9 – 11]. При такой обработке энергию электронов и ток пучка, можно независимо изменять в широких пределах, что позволяет регулировать удельную мощность облучения, а также изменять температуру поверхности при обработке. Подобные источники находят широкое применение для модификации поверхности металлических и изоляционных материалов.

В работе использовали плазменный источник, одним из важнейших преимуществ которого перед термоэмиссионными, является способность работать в кислородсодержащей атмосфере при давлении до 100 Па, а возможность управления содержанием кислорода позволяет свести до минимума его потери материалом и тем самым уменьшить процесс деферритизации поверхностного слоя феррита [9]. Кроме того, плазменные источники электронов позволяют получать пучки различного размера и конфигурации и проводить обработку поверхности до 100 см² и более. Поскольку энергия электронов в пучке, как правило не превышает 20 кэВ, то механизм воздействия пучка на материал носит преимущественно тепловой характер. Высокая удельная мощность пучка (до 10⁵ Вт/см²) приводит к нагреву поверхностного слоя материала толщиной порядка 0,1 – 1 мм даже до температуры плавления. При охлаждении этот слой вторично кристаллизуется с образованием новой структуры и новых фаз, в том числе и фаз с повышенной электропроводностью [5].

Цель настоящей работы — исследование электромагнитных характеристик двухслойных, текстурированных Ni – Zn ферритовых материалов, полученных обработкой поверхности плазменным источником низкоэнергетических электронов.

Материалы и методика эксперимента

В работе исследованы образцы феррита марки 150ВН ($\text{Ni}_{0,5-x}\text{Co}_x\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$), в виде пластин толщиной 5 мм. Выбор материала для исследований обусловлен высокой стабильностью свойств в широком температурном диапазоне, а также практикой их использования в ВЧ и СВЧ-устройствах. Основные электрические параметры феррита 150ВН [2]: начальная магнитная проницаемость — 150 ± 20 ; удельное электрическое сопротивление — 10^4 Ом·м.

Обработку поверхности образцов проводили на электронно-лучевой установке, созданной на кафедре физики в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) [10, 11]. Для генерации электронного пучка применяли плазменный электронный источник, позволяющий формировать электронный пучок диаметром до 10 см с плотностью мощности до 10⁵ Вт/см². В качестве источника электронов использовали плазму тлеющего разряда с полым катодом. Специальная конструкция ускоряющего промежутка электронного источника позволяла формировать непрерывный электронный пучок с током до 100 мА при давлениях в источнике и вакуумной камере 5 – 20 Па. Контроль температуры поверхности образца осуществляли с помощью оптического пирометра Raytek Marathon 5. С целью уменьшения термических напряжений в материале процесс обработки проводили по оптимизированному режиму: медленный нагрев со скоростью 100 °С/мин, затем, при достижении заданной температуры, выдержка в течение 10 мин. В работе представлены результаты исследований при нагреве поверхности до температур 1200 и 1350 °С.

Исследования микроструктуры и состава поверхности образцов проводили на оптическом микроскопе “Биолам” и сканирующем электронном микроскопе HitachiTM-1000 с системой энергодисперсионного анализа. Рентгенофазовый анализ осуществляли на дифрактометре “Дифрей-402”. Электромагнитные свойства определяли с использованием векторного измерителя цепей P4M-18 (НПФ Микран, Томск) и установки SemiCon-1 на (НИТГУ, Томск).

Результаты эксперимента

На рис. 1 представлены микроструктуры поверхности исходного феррита и после электронно-лучевой обработки.

Из анализа микроструктуры следует, что при температуре поверхности 1200 °С происходит эрозия поверхности феррита и наиболее сильно она проходит по границам зерен, одновременно протекают процессы вторичной рекристаллизации материала с образованием новых фаз [5]. При дальнейшем повышении температуры обработки на поверхности образуется расплав, заполняющий межзеренные поры (рис. 1с).

Установлено, что эрозия поверхности связана в первую очередь с испарением цинка. В табл. 1 представлены результаты исследования химиче-

Таблица 1

Химический состав поверхностного слоя феррита

Температура поверхности при электронно-лучевой обработке	Фазовый состав, масс. %				
	Fe ₂ O ₃	NiO	ZnO	CoO	Сумма
Необработанный ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	66	14,6	13,8	5,3	99,7
1200 °C	69,5	17,1	5,15	6,6	98,35
1350 °C	73,2	19,34	—	8,2	98,74

Table 1

Chemical composition of ferrite surface layer

ского состава поверхностного слоя при различных температурах обработки.

Эксперименты показывают, что скорость испарения цинка тем выше, чем больше температура поверхности и меньше давление кислорода над образцом. Толщина обедненного цинком слоя также зависит от времени обработки. При температуре поверхности 1200 °C и обработке в течение 10 мин она составляет 15 – 20 мкм, а при темпера-

туре 1350 °C — порядка 50 мкм. Установлено, что обеднение поверхности феррита цинком начинается уже при 900 – 1000 °C, до температуры 1000 °C в поверхностном слое содержится только шпинельная фаза, но при дальнейшем повышении температуры, после вторичной кристаллизации кроме шпинельной фазы образуется гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, что и подтверждается результатами рентгенофазового анализа. Из дифрактограмм (рис. 2) следует, что в

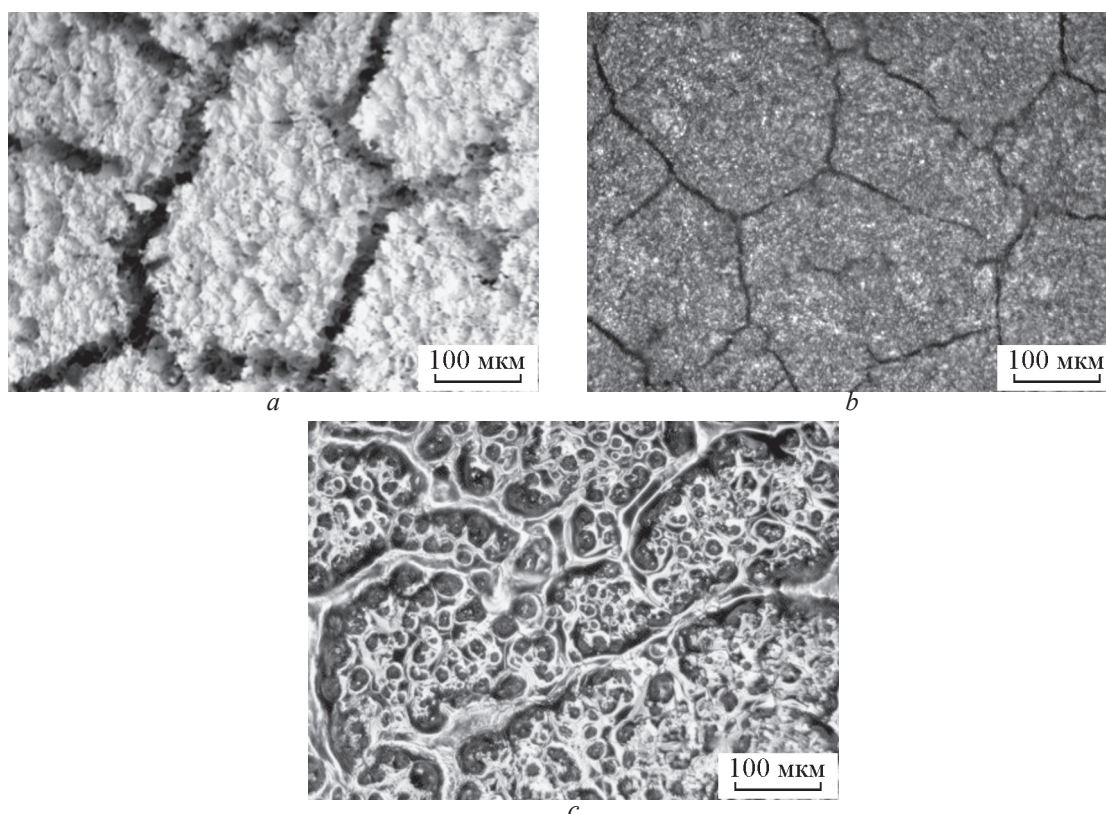


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности никель-цинковых ферритов до обработки (а), после электронно-лучевой обработки при температурах поверхности: *b* — 1200 °C, *c* — 1350 °C.

Fig. 1. SEM surface of nickel-zinc ferrites before treatment (a); after electron beam treatment by low-energy beam at surface temperature: *b* — 1200 °C, *c* — 1350 °C.

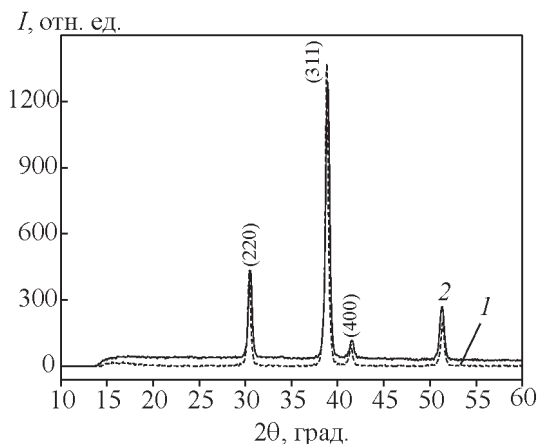


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма образцов Ni – Zn феррита: 1 — до электронной обработки, 2 — после обработки при температуре 1350 °С.

Fig. 2. X-ray diffractogram of Ni – Zn ferrite samples: 1 — before electron-beam treatment, 2 — after treatment at a temperature of 1350 °C.

приповерхностном слое образуется также и аморфная фаза, что подтверждают результаты микроскопических исследований (рис. 1с).

По уширению доминирующего дифракционного пика (311), методом Шерера определены области когерентного рассеяния в зернах ферритовой фазы, так до электронной обработки этот размер находился в пределах 100 – 120 нм, а после обработки он уменьшился до 50 – 80 нм. В то же время уменьшение амплитуды пика (311) после обработки с 1372 до 1288, свидетельствует о процессе деферритизации, а увеличение пика (400) с 195 до 270 — об увеличении содержания α -Fe₂O₃.

Изменения элементного и фазового состава приводят также к изменению электрофизических характеристик поверхностного слоя феррита. Так его магнитная проницаемость из-за потери цинка и деферритизации уменьшается в 4 – 5 раз, а электропроводность увеличивается более чем в 150 раз [5]. На рис. 3 представлено изменение удельного сопротивления феррита и толщины проводящего слоя при электронно-лучевой обработке. Следует отметить, что начало изменения удельного сопротивления материала имеет температурный порог порядка 500 °С.

Уменьшение удельного сопротивления феррита при электронной обработке связывают с потерей кислорода и образованием анионных вакансий, что как следствие ведет к росту протоно-донорных и протоно-акцепторных центров [12], а также с восстановлением Fe³⁺ до Fe²⁺ [11].

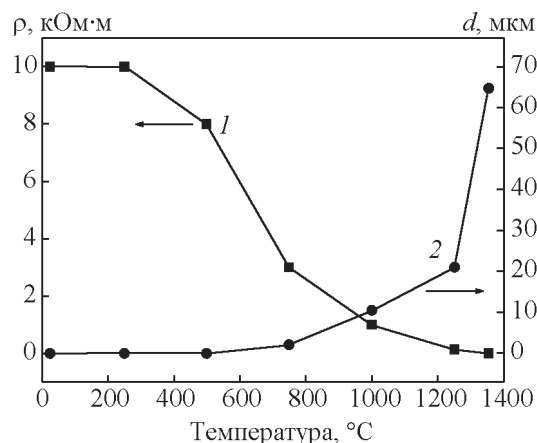


Рис. 3. Зависимости: 1 — удельного сопротивления, 2 — толщины проводящего слоя, от температуры поверхности при электронно-лучевой обработке.

Fig. 3. Dependence of: 1 — the resistivity, 2 — the thickness of the conducting layer, on the surface temperature during electron beam processing.

Также было установлено [13], что механизм электропроводности имеет как термоактивационную, так и прыжковую составляющую. Наличие прыжкового механизма обуславливает существенную зависимость электропроводности от частоты электромагнитного излучения, при этом “динамическая” электропроводность может на один-два порядка превышать “статическую”, что следует учитывать при анализе поведения полученных структур в СВЧ-диапазоне [13, 14].

Распространение электромагнитной волны и её взаимодействие с ферритом может быть оценено по волновому сопротивлению феррита в заданном диапазоне частот, которое, в свою очередь, определяется комплексными параметрами — диэлектрической и магнитной проницаемостью ϵ и μ [7, 15]. Комплексный коэффициент отражения электромагнитной волны от поверхности материала r можно определить как:

$$r = \frac{1 - Z_1}{1 + Z_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_a} - \sqrt{\mu_a}}{\sqrt{\epsilon_a} + \sqrt{\mu_a}}, \quad (1)$$

где $\epsilon_a = \epsilon\epsilon_0$ — комплексная диэлектрическая проницаемость, $\mu_a = \mu\mu_0$ — комплексная магнитная проницаемость, $Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}}$ — волновое сопротивление, μ_0 и ϵ_0 — магнитная и электрическая постоянные равные $1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн·м⁻¹ и $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹ соответственно.

Энергетический коэффициент отражения определяется как

$$R = |r|^2 = \left| \frac{1 - Z_1}{1 + Z_1} \right|^2. \quad (2)$$

Уменьшение коэффициента отражения феррита возможно путем изменения величин диэлектрической и магнитной проницаемости. В идеальном случае, при равенстве этих величин коэффициент отражения становится равным нулю. Но реализация этого условия, хотя и теоретически возможна, но практически очень сложна [16]. Поэтому более предпочтительным методом уменьшения коэффициента отражения феррита, является создание на его поверхности слоя с пониженной диэлектрической проницаемостью и повышенной электропроводностью, причем толщина этого слоя должна быть меньше толщины скин-слоя. При этом, изменение диэлектрической проницаемости поверхностного слоя $\epsilon_a(\omega)$ при увеличении его электропроводности происходит в соответствии с формулой Друде:

$$\epsilon_a(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{i\sigma}{\epsilon_0\omega}, \quad (3)$$

где σ — электропроводность материала, а ϵ_∞ — действительная часть диэлектрической проницаемости, ω — частота колебаний поперечных оптических фононов, i — мнимая единица.

В то же время известно [14], что ввиду преобладания прыжкового механизма электропроводности, её значения на постоянном токе и переменном существенно различаются. Динамическая проводимость $\sigma(\omega)$ на высоких частотах определяется с помощью соотношения Друде – Лоренца [16]:

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma}{1 - i\omega\tau},$$

где τ — время релаксации.

Коэффициент затухания электромагнитной волны α в проводящей магнитной среде сильно зависит от электропроводности и определяется как:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_a \mu_a}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_a} \right)^2} - 1 \right)}. \quad (4)$$

Но в нашем случае увеличение электропроводности феррита происходит не во всем объёме, а только в тонком слое, значительно меньшем, чем толщина скин-слоя, следовательно, основная часть электромагнитной энергии проходит через слой с повышенной электропроводностью вглубь материала. Так как электрофизические свойства слоя существенно отличаются от свойств основного материала, то от границы раздела “слой с повышенной электропроводностью и пониженной маг-

нитной проницаемостью – основной ферритовой материал” происходит отражение электромагнитной волны. Если известны величины волновых сопротивлений слоя Z_2 и исходного материала Z_1 , то коэффициент отражения согласно работе [15] определяется как:

$$R_{12} = |r_{12}|^2 = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2, \quad (5)$$

$$R = \left\{ (\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2) [\exp(ik_2 d) - \exp(-ik_1 d)] / \left[(\sqrt{\epsilon_2 \mu_1} + \sqrt{\epsilon_1 \mu_2})^2 \exp(ik_2 d) - (\sqrt{\epsilon_2 \mu_1} - \sqrt{\epsilon_1 \mu_2})^2 \exp(-ik_2 d) \right] \right\}^2, \quad (6)$$

где d — толщина слоя повышенной проводимости, ϵ_1, μ_1, k_1 — проницаемости и волновое число среды, а ϵ_2, μ_2, k_2 — проницаемости и волновое число тонкого слоя,

$$k_{1,2} = \omega \sqrt{\epsilon_{1,2} \mu_{1,2} \mu_0 \epsilon_0}. \quad (7)$$

Для измерений коэффициентов отражения и поглощения полученных образцов в диапазоне от 0,1 до 3 ГГц использовали векторный измеритель цепей P4M-18 (НПФ Микран, Томск). На рис. 4 представлены результаты измерений коэффициента отражения исходного образца феррита (1) и образца с сформированным поверхностным слоем повышенной проводимости (2).

Как следует из рис. 4, зависимость коэффициента отражения исходного образца от частоты

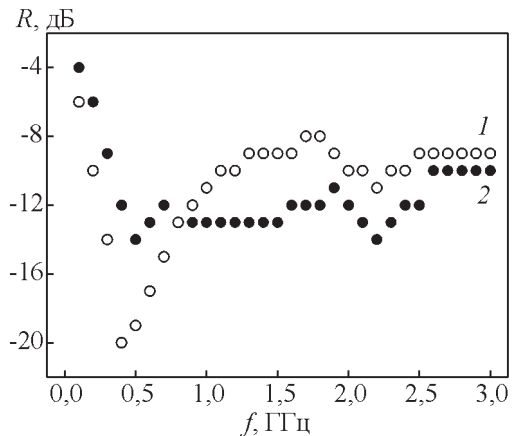


Рис. 4. Коэффициент отражения образцов феррита в диапазоне частот от 0,1 до 3 ГГц: 1 — исходный образец, 2 — образец, имеющий сформированный поверхностным слоем повышенной проводимости.

Fig. 4. Reflection coefficient of ferrite samples in the frequency range from 0.1 to 3 GHz: 1 — initial sample, 2 — sample with a formed surface layer of increased conductivity.

имеет два минимума: первый, при 400 – 500 МГц связан с резонансом доменных стенок, а второй, при 2 – 3 ГГц с интерференционными эффектами. Коэффициент отражения образца со сформированным поверхностным слоем повышенной проводимости в диапазоне частот от 1 до 2,5 ГГц на 30 – 35 % ниже, чем у исходного образца.

Для более детального исследования СВЧ характеристик полученных образцов ферритов в диапазоне 0,5 – 2 ГГц использовали измерительный комплекс SemiCon-1 на основе четвертьволнового коаксиального резонатора в диапазоне частот 0,5 до 3 ГГц [17].

Измеряя добротность Q резонатора с образцом и без образца, можно определить электропроводность проводящего слоя на феррите по формуле:

$$\sigma = \frac{|\omega_0| \varepsilon_0}{2} A \Delta \left(\frac{1}{Q} \right), \quad (8)$$

где A — постоянная, определяемая путем измерений тестовых образцов, например пленок титана на феррите.

Определенная таким образом электропроводность слоя имеет величину порядка $0,01 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$, что в 6 раз меньше, чем при измерениях на постоянном токе. Из результатов измерений образцов ферритов на установке SemiCon-1 был рассчитан коэффициент затухания электромагнитного излучения, и установлено, что в образцах с сформированным проводящим слоем он увеличивается в 1,3 – 1,6 раза. Этот результат подтверждает предположение о влиянии на поглощение электромагнитной волны слоя с повышенной электропроводностью [7].

Выводы

Показано, что при обработке поверхности N – Zn феррита плазменным источником низкоэнергетических электронов, в результате трансформации его состава и структуры, образуется слой толщиной 50 – 60 мкм, обедненный цинком с повышенной электропроводностью.

Созданная градиентная структура позволяет, в диапазоне частот от 1 до 2,5 ГГц, повысить коэффициент затухания электромагнитной волны в 1,3 – 1,6 раза и уменьшить коэффициент отражения на 30 – 35 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение №075-03-2020-237/1 от 05.03.2020 г., внутренний номер проекта FEWM-2020-0040). Экспериментальные результаты получены с ис-

пользованием оборудования ЦКП “Импульс” (регистрационный номер 200568).

Литература

1. Goldman A. Modern ferrite technology. Springer Science & Business Media, 2006, p. 438.
2. Шольц Н.Н., Пискарев К.А. Ферриты для радиочастот. Москва-Ленинград: Энергия, 1966, 258 с.
3. Адреев В.Г., Меньшова С.Б., Костишин В.Г., Читанов Д.Н., Климов А.Н., Кирина А.Ю., Вергазов В.М., Бибииков С.Б., Прокофьев М.В. Влияние базового состава и микроструктуры никель-цинковых ферритов на уровень поглощения электромагнитного излучения. Известия ВУЗов. Материалы электронной техники., 2015, т. 18, № 4, с. 261 – 266.
4. Cheng-Hsiung Peng, Chyi-Ching Hwang, Jun Wan, Jih-Sheng Tsai, San-Yuan Chen. Microwave-absorbing characteristics for the composites of thermal-plastic polyurethane (TPU)-bonded NiZn-ferrites prepared by combustion synthesis method. Materials Science and Engineering., 2005, v. 117, pp. 27 – 36.
5. Каранский В.В., Смирнов С.В., Климов А.С., Саврук Е.В. Электромагнитные свойства Mn – Zn ферритов, модифицированных низкоэнергетическим электронным пучком. Прикладная физика, 2020, № 2, с. 71 – 72.
6. Bezhani N., Nayyeri V., Khanijan M., Ramahi O. Gradient composite microwave absorber: Investigation into loading profiles of conductive nanofiller. Journal of Applied Physics vol., 2020, v. 127, pp. 014902.
7. Бутько Л.Н., Бучельникова В.Д., Бычков И.В., Коэффициент поглощения электромагнитных волн в слоистой структуре “немагнитный проводник – феррит”. Вестник Челябинского государственного университета, 2010, № 24 (205), с. 50 – 54.
8. Hakeem A., Ahmad L., Murtaza G., Mustafa G. Effect of variation of Mn/Zn content on the structural, electrical and magnetic properties of Mn – Zn ferrite. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 2016, v. 11, no. 3, pp. 741 – 752.
9. Саврук Е.В., Смирнов С.В., Климов А.С. Модификация поверхности Mn-Zn-феррита пучком низкоэнергетических электронов. Доклады ТУСУР, 2012, № 2(26), с. 172 – 174.
10. Каранский В.В., Климов А.С. Изменение электрофизических параметров Mn-Zn-ферритов при облучении электронным пучком в форвакуумной области давлений. Прикладная физика, 2017, № 6, с. 72 – 76.
11. Karansky V.V., Klimov A.S., Smirnov S.V. Structural transformations in Mn – Zn ferrite under low-energy electron beam treatment. Vacuum, 2020, v. 173, p. 109115.
12. Саврук Е.В., Смирнов С.В., Швайцер А.Н. Структура поверхности аллюмооксидной керамики после лазерной обработки. Известия Вузов. Физика, 2008, № 11/2, с. 114 – 116.
13. Бабушкин А.В., Бучельников В.Д., Бычков И.В. Отражение электромагнитных волн от поверхности

- феррита кубической симметрии. Физика твердого тела, 2002, т. 44, вып. 12, с. 2183 – 2188.
14. Антонец И.В., Котов Л.Н., Кирпичева О.А., Голубев Е.А., Калинин Ф.В., Ситников В.Г., Шавров В.Г., Щеглов В.И. Статистическая и динамическая проводимость аморфных наногранулированных композитов “металл – диэлектрик”. Радиотехника и электроника, 2015, т. 60, № 8, с. 839 – 850.
 15. Кухаркин Е.С. Основы технической электродинамики. М.: Высшая школа, 1969, 509 с.
 16. Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах. М.: Мир, 1982, 270 с.
 17. ГОСТ 27496.2-87. Материалы электроизоляционные. Методы определения диэлектрических свойств на частотах свыше 300 МГц. Резонансные методы.
 8. Hakeem A., Ahmad L., Murtaza G., Mustafa G. Effect of variation of Mn/Zn content on the structural, electrical and magnetic properties of Mn – Zn ferrite. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures., 2016, vol. 11, no. 3, pp. 741 – 752.
 9. Savruk E.V., Smirnov S.V., Klimov A.S. Modifikaciya poverhnosti Mn-Zn-ferrita puchkom nizkoenergeticheskikh elektronov [Modification of the Mn-Zn-ferrite surface by a low-energy electron beam]. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki — Proceedings of TUSUR, 2012, no. 2(26), pp. 172 – 174.
 10. Karanskij V.V., Klimov A.S. Izmenenie elektrofizicheskikh parametrov Mn-Zn-ferritov pri obluchenii elektronnyim puchkom v forvakuumnoj oblasti davlenij [Changes in the electrophysical parameters of Mn-Zn-ferrites under electron beam irradiation in the forevacuum pressure region]. Prikladnaya fizika — Applied physics, 2017, no. 6, pp. 72 – 76.
 11. Karansky V.V., Klimov A.S., Smirnov S.V. Structural transformations in Mn-Zn ferrite under low-energy electron beam treatment. Vacuum, 2020, vol. 173, pp. 109115.
 12. Babushkin A.V., Buchel'nikov V.D., Bychkov I.V. Otrazhenie elektromagnitnykh voln ot poverhnosti ferrita kubicheskoy simmetrii [Reflection of electromagnetic waves from the surface of a cubic symmetry ferrite]. Fizika Tverdogo Tela — Physics of the Solid State, 2002, vol. 44, no. 12, pp. 2183 – 2188.
 13. Antonec I.V., Kotov L.N., Kirpicheva O.A., Golubev E.A., Kalinin F.V., Sitnikov V.G., Shavrov V.G., Shcheglov V.I. Statisticheskaya i dinamicheskaya provodimost' amorfnykh nanogranulirovannykh kompozitov “metal – dielektrik” [Statistical and dynamic conductivity of amorphous nanocranulated metal – dielectric composites]. Radiotekhnika i elektronika — Radio engineering and electronics, 2015, vol. 60, no. 8, pp. 839 – 850.
 14. Savruk E.V., Smirnov S.V., Shvajcer A.N. Struktura poverhnosti alyumooksidnoj keramiki posle lazernoj obrabotki [Surface structure of aluminum oxide ceramics after laser treatment]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Fizika — Russian Physics Journal, 2008, no. 11/2, pp. 114 – 116.
 15. Grosse P. Svobodnye elektrony v tverdykh telah [Free electrons in solids]. Moscow, Mir Publ., 1982, 270 p.
 16. Kuharkin E.S. Osnovy tekhnicheskoy elektrodinamiki [Fundamentals of technical electrodynamics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ, 1969, 509 p.
 17. GOST 27496.2-87. Materialy elektroizolyacionnye. Metody opredeleniya dielektricheskikh svoystv na chastotah svyshe 300 MGc. Rezonansnye metody. Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta — CSU Bulletin, 2010, no. 24 (205), pp. 50 – 54.

Статья поступила в редакцию — 28.08.2020 г.
 после доработки — 24.09.2020 г.
 принята к публикации — 25.09.2020 г.

Каранский Виталий Владиславович — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина, 40), аспирант, специалист в области физики твердого тела, физики конденсированного состояния. E-mail: karanskii_vitali@mail.ru.

Смирнов Серафим Всеволодович — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина, 40), доктор технических наук, профессор, специалист в области физики твердого тела, физики конденсированного состояния. E-mail: serafim.smirnov@mail.ru.

Климов Александр Сергеевич — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина, 40), доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики, специалист в области эмиссионной электроники и сильноточных пучков. E-mail: klimov680@gmail.com.

Саврук Елена Владимировна — Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (634050, Томск, пр. Ленина, 40), кандидат технических наук, доцент кафедры физической электроники, начальник учебного управления, специалист в области физики твердого тела, физики конденсированного состояния. E-mail: savruk@mail.ru.

Gradient structures of Ni – Zn ferrites for electromagnetic radiation protection devices

V. V. Karanskij, S. V. Smirnov, A. S. Klimov, E. V. Savruk

Increasing the reliability requirements for electromagnetic compatibility of electronic equipment requires the creation of protective coatings that absorb electromagnetic radiation or the development of new radio-absorbing materials. In the frequency range up to 1 GHz, radio-absorbing materials based on Ni – Zn ferrites are of the greatest interest. The absorption of electromagnetic radiation by ferrites occurs due to resonant phenomena at the level of domains and atoms. Improving the performance of ferrites is possible by modifying their surface properties. In this paper, gradient structures for electromagnetic radiation protection products are obtained by treating the surface of Ni – Zn ferrite samples with a low-energy electron beam. To generate the electron beam, a unique development was used — a forevacuum plasma electronic source that allows forming and transporting a beam with a power density of up to 105 W/cm² under conditions of high pressure and high gas release. As a result of processing, gradient structures were found on the surface of ferrites. A theoretical analysis and experimental study of the obtained structures “non – magnetic conductor – ferrite”, characterized by an increased attenuation coefficient and a reduced reflection coefficient of electromagnetic radiation in the frequency range from 0.5 to 2.5 GHz. The possibility of obtaining near-surface layers depleted in zinc with increased electrical conductivity and reduced magnetic permeability is shown.

Keywords: Ni – Zn ferrite gradient structures, electron beam processing, electromagnetic radiation, attenuation coefficient, reflection coefficient.

Karanskij Vitalij — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (634050, Russia, Tomsk, Lenin ave. 40), post-graduate student, deputy dean of the faculty of computing systems, specialist in solid state physics, condensed matter physics. E-mail: karanskii_vitali@mail.ru.

Smirnov Serafim — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (634050, Russia, Tomsk, Lenin ave. 40), Dr Sci (Eng), professor of the Department of physical electronics, specialist in solid state physics, condensed matter physics. E-mail: serafim.smirnov@mail.ru.

Klimov Aleksandr — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (634050, Russia, Tomsk, Lenin ave. 40), Dr Sci (Eng), professor of the Department of physics, specialist in plasma emission electronics, electron beams. E-mail: klimov680@gmail.com.

Savruk Elena — Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (634050, Russia, Tomsk, Lenin ave. 40), PhD (Eng), associate professor of the department of physical electronics, head of the educational department, specialist in solid state physics, condensed matter physics. E-mail: savruk@mail.ru.