



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-42-54>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.874; 537.624.9; 534.286

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

В. А. БОГУШ, Л. М. ЛЫНЬКОВ, Н. В. НАСОНОВА, С. Л. ПРИЩЕПА, Е. С. БЕЛОУСОВА,
О. В. БОЙПРАВ, Г. В. ДАВЫДОВ, В. А. ПОПОВ, А. В. ПОТАПОВИЧ, Г. А. ПУХИР

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 31.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Представлены технологии изготовления электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе порошкообразного угля, фольгированных и композиционных многослойных материалов. Описаны технологические методы их изготовления, экранирующие свойства, рассмотрены основные механизмы, приводящие к усилению экранирующих свойств в зависимости от технологии изготовления, состава и чередования слоев композита. Показано, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с представленными технологиями, достигают (–20) дБ. Разработаны радиопоглотители с характеристикой отражения менее (–10) дБ (до (–52) дБ) в диапазоне частот 8–12 ГГц, определены электрофизические параметры, состав и содержание компонентов композиционных материалов для таких радиопоглотителей. Рассмотрены системы активной защиты речевой информации, использующие наряду с «белым» шумом комбинированные маскирующие сигналы, состоящие из «белого» шума и речеподобных сигналов. Разработаны критерии подхода к отбору дикторов и аудитории при оценке разборчивости речи для решения задач защиты речевой информации и методики экспериментальных исследований разборчивости речи на фоне маскирующих акустических шумов. Представлены технологии формирования нанокompозитов на основе углеродных нанотрубок и наночастиц ферромагнитных материалов для увеличения степени когерентности спиновой текстуры на макроскопических расстояниях, повышения степени устойчивости изделий электронной техники к сильным магнитным полям и помехоустойчивости. Показано, что при определенных концентрациях наночастиц ферромагнетика происходит рост микромагнитных параметров, обеспечивающих высокую работоспособность активных элементов в магнитных полях. Роль углерода при этом оказывается определяющей. Приведенные результаты представляются перспективными при создании безэховых камер, перегородок, отделяющих в помещениях зоны, предназначенные для расположения приборов электронной техники, при изготовлении изделий для защиты человека от воздействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, формирования комбинированных маскирующих сигналов в виде «белого» шума для устройств защиты речевой информации, композитных покрытий для нивелирования воздействия постоянного магнитного поля на изделия электронной техники.

Ключевые слова: экранирование СВЧ-излучения, радиопоглотители, коэффициент отражения, многослойный композит, двумерные магнитные композиты, активная защита речевой информации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Исследования и разработки в области создания материалов, технологий и средств обеспечения безопасности / В. А. Богуш [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 42–54. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-42-54>.

RESEARCH AND DEVELOPMENT IN THE FIELD OF CREATING MATERIALS, TECHNOLOGIES AND SAFETY EQUIPMENT

VADIM A. BOGUSH, LEONID M. LYNKOU, NATALLIA V. NASONOVA,
SERGHEJ L. PRISCHEPA, ELENA S. BELOUSOVA, OLGA V. BOIPRAV,
HENADZI V. DAVYDAU, VASILIA A. PAPOU, ALEKSANDR V. PATAPOVICH,
HALINA A. PUKHIR

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31.01.2024

Abstract. Technologies for the manufacture of microwave electromagnetic shields based on powdered carbon, foil and composite multilayer materials are presented. Technological methods for their manufacture and shielding properties are described, and the main mechanisms leading to increased shielding properties are considered depending on the manufacturing technology, composition and alternation of composite layers. It is shown that the values of the reflection coefficient of electromagnetic radiation in the frequency range 2–17 GHz for the shields considered reach a value of (–20) dB. Microwave absorbers with a reflection characteristic lower than (–10.0) dB (down to (–52.0) dB) in the frequency band 8.0–12.0 GHz are developed, and the electrophysical parameters, composition and concentration of components of the composite materials for such microwave absorbers are determined. The systems for active protection of speech information that use combined masking signals consisting of “white” noise and speech-like signals as masking signals, along with “white” noise are considered. Criteria have been developed for the approach to selecting speakers and audiences when assessing speech intelligibility to solve problems of protecting speech information and methods for experimental studies of speech intelligibility against a background of masking acoustic noise. Technologies for the formation of nanocomposites based on carbon nanotubes and nanoparticles of ferromagnetic materials are presented to increase the degree of coherence of the spin texture at macroscopic distances, increase the degree of security of electronic products to strong magnetic fields and noise immunity. It has been shown that at certain concentrations of ferromagnetic nanoparticles, micromagnetic parameters increase, ensuring high performance of active elements in magnetic fields. The role of carbon in this case turns out to be decisive. The presented results seem promising for use in the creation of anechoic chambers, partitions for separating indoor zones intended for the location of electronic devices, products for protecting humans from the effects of electromagnetic radiation in the microwave range, and the formation of combined masking signals in the form of “white” noise for devices protection of speech information, composite coatings to level out the effects of a constant magnetic field on electronic products.

Keywords: microwave radiation shielding, radio absorbers, reflection coefficient, multilayer composite, two-dimensional magnetic composites, active protection of speech information.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Bogush V. A., Lynkou L. M., Nasonova N. V., Prischepa S. L., Belousova E. S., Boiprav O. V., Davydau H. V., Papou V. A., Patapovich A. V., Pukhir H. A. (2024) Research and Development in the Field of Creating Materials, Technologies and Safety Equipment. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 42–54. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-42-54> (in Russian).

Введение

Электромагнитные экраны, виброакустические системы защиты речевой информации, системы защиты от постоянных магнитных полей находят применение в областях, связанных с ограничением распространения электромагнитного излучения (ЭМИ), виброакустических сигналов, магнитных полей, с целью защиты персонала и пользователей от воздействия побочных ЭМИ электронных средств, подавления электромагнитных каналов утечки информации, защиты технических объектов от обнаружения радиолокационными средствами, защиты речевой информации комбинированными маскирующими сигналами и изделий электронной техники от внешних магнитных полей и др. Особенности применения экранов и поглотителей устанавливают определенные требования к их техническим и эксплуатационным характеристикам. В частности, к рабочему диапазону частот, требуемой эффективности экранирования, допустимому уровню отражаемой энергии, массогабаритным параметрам, рабочей области температур, величине внешних полей и др. Проанализированы результаты, достигнутые в рамках 5-го направления научных исследований «Многофункциональные материалы, приборы и технологии, информационная безопасность» за последние пять лет, приведены новые данные, связанные с тематикой направления.

Экраны СВЧ-диапазона на основе порошкообразного угля и фольгированных материалов

В рамках проведенных за прошедшие пять лет исследований впервые экспериментально обоснована перспективность применения порошкообразных углей для изготовления электромагнитных экранов СВЧ-диапазона [1]. Разработана технология изготовления гибких двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе порошкообразного активированного древесного (березового) или кокосового угля и водного раствора хлорида кальция. Эта технология основана на закреплении частиц угля в матрице, изготовленной из полимерной самоклеящейся пленки [2]. Экспериментально установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экранов, изготовленных в соответствии с этой технологией и закрепленных на металлических подложках, изменяются в пределах от (–6) до (–20) дБ.

Разработана технология изготовления экранирующих ЭМИ строительных отделочных материалов на основе порошкообразного древесного угля и гипса [3]. Экспериментально установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц указанных материалов толщиной 5 мм, закрепленных на металлических подложках, изменяются в пределах от (–2) до (–15) дБ. Подтверждена возможность изменения класса горючести таких материалов (с класса умеренногорючих до класса слабогорючих) при условии нанесения на их поверхность покрытия толщиной 3 мм из смеси вододисперсионного состава и мелкодисперсного электрокорунда или глинозема (оксида алюминия) [4]. Кроме того, в процессе исследований подтверждена возможность обеспечения для таких материалов высокого значения коэффициента ослабления рентгеновского излучения при условии нанесения на их поверхность покрытия толщиной 3 мм из смеси вододисперсионного состава и мелкодисперсного сульфата бария [5].

Разработана и экспериментально обоснована технология изготовления гибких угленасыщенных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона [6]. Установлено, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов, выполненных по этой технологии, изменяются в пределах от (–2) до (–15) дБ. Предлагается использовать порошкообразный древесный уголь для изготовления двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, один из слоев которых характеризуется пространственно-периодической структурой. Данная технология включает в себя следующие операции:

- 1) откраивание от полотна нетканого синтетического материала двух одинаковых фрагментов;
- 2) распределение по поверхности одного из откраенных фрагментов с использованием трафарета частиц порошкообразного древесного угля (рис. 1);

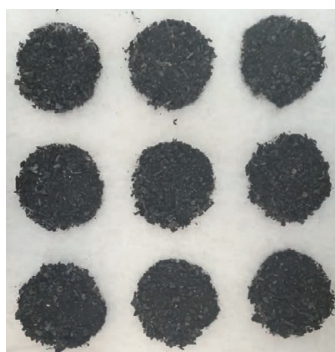


Рис. 1. Внешний вид частиц порошкообразного древесного угля, распределенных с использованием трафарета по поверхности фрагмента нетканого синтетического материала

Fig. 1. Appearance of powdered charcoal particles distributed using a stencil over the surface of non-woven synthetic material fragment

- 3) расположение второго из откраенных фрагментов поверх распределенных частиц порошкообразного древесного угля;
- 4) термопрессование конструкции, полученной в результате реализации операций 1–3;
- 5) откраивание от рулона фольгированной полимерной пленки фрагмента, форма и размер которого эквивалентны форме и размеру откраенных фрагментов полотна нетканого синтетического материала;

б) закрепление откошенного фрагмента фольгированной полимерной пленки на одной из поверхностей материала, полученного в результате реализации операций 1–4.

Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц электромагнитных экранов, изготовленных в соответствии с представленной технологией, приведены на рис. 2.

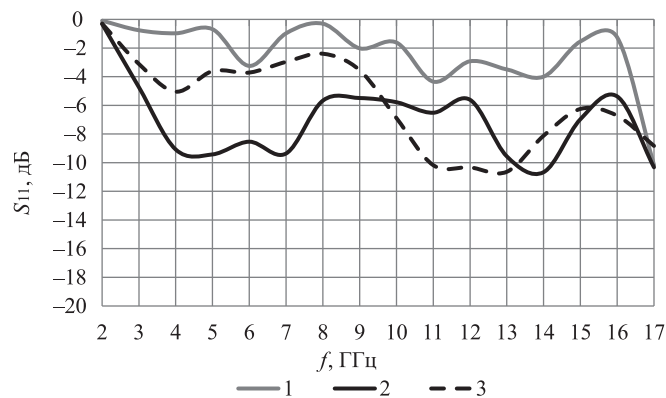


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов на основе: 1 – древесного неактивированного угля; 2, 3 – древесного и кокосового активированных углей соответственно

Fig. 2. Dependences of reflection coefficient of the electromagnetic radiation in the frequency range of 2–17 GHz of screens based on: 1 – non-activated charcoal; 2, 3 – charcoal and coconut activated carbons, respectively

Как видно из рис. 2, значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2–17 ГГц экранов, изготовленных на основе порошкообразного неактивированного древесного угля, изменяются в пределах от (–0,5) до (–4,0) дБ, а экранов, изготовленных на основе порошкообразного активированного древесного (березового) или кокосового угля, – от (–0,5) до (–12,0) дБ. Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ экранов на основе активированных углей по сравнению с экранами на основе неактивированного древесного угля обусловлены тем, что:

- порошкообразные активированные угли характеризуются более высоким значением удельной электропроводности;
- энергия ЭМИ, отражаемого от слоя в виде фольгированной полимерной пленки, входящего в состав рассматриваемых экранов, в большей степени ослабляется в их слое, характеризующемся пространственно-периодической структурой, если этот слой сформирован с использованием порошкообразного активированного древесного (березового) или кокосового угля, а не с порошкообразного неактивированного древесного угля.

Экспериментально подтверждена возможность уменьшения на 2–6 дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в полосе частот 5–8 ГГц двухслойных экранов, изготовленных в соответствии с представленной технологией, в случае использования при формировании их слоя, характеризующегося пространственно-периодической структурой, порошкообразного активированного древесного (березового) угля, пропитанного смесью изопропилового спирта и мелкодисперсного оксида железа (III), т. е., по сути, угля, в поры частиц которого включены частицы порошкообразного оксида железа (III) (рис. 3).

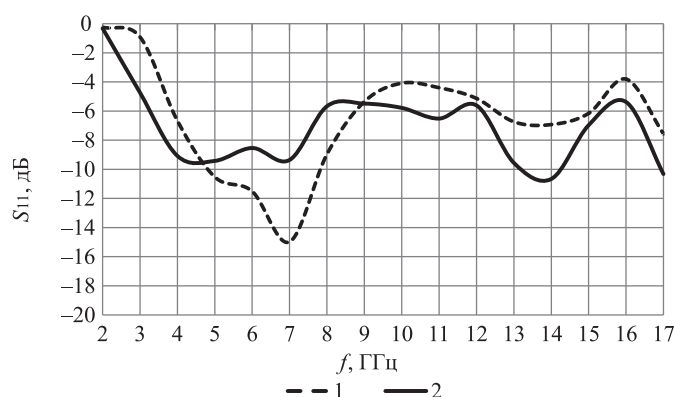


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов на основе: 1 – угля, пропитанного смесью изопропилового спирта и мелкодисперсного оксида железа (III); 2 – угля

Fig. 3. Dependence of reflection coefficient of the electromagnetic radiation in the frequency range of 2–17 GHz of screens based on: 1 – charcoal impregnated with a mixture of isopropyl alcohol and fine iron (III) oxide; 2 – charcoal

Электромагнитные экраны, выполненные в соответствии с представленной технологией, могут использоваться при создании перегородок, отделяющих в помещениях зоны, предназначенные для расположения приборов электронной техники. Разработаны технологии изготовления эластичных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона на основе фрагментов фольгированных материалов [7]. Они характеризуются значениями коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц, изменяющимися соответственно в пределах от (–5) до (–25) дБ и от (–20) до (–40) дБ. Кроме того, экспериментально обоснованы технологии производства двухслойных электромагнитных экранов СВЧ-диапазона, один из слоев которых характеризуется пространственно-периодической структурой и включает в себя совокупность одинаковых элементов в виде изготовленных из фольгированных материалов кругов или спиралей Архимеда [8]. Если для создания таких экранов используются фольгированные материалы, на поверхности которых сформированы неоднородности микронного размера, значения их коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц меньше в среднем на 5 дБ, чем у экранов, для изготовления которых используются фольгированные материалы, характеризующиеся условно гладкой поверхностью [9]. Экраны, выполненные в соответствии с представленными технологиями на основе фольгированных материалов, представляются перспективными для использования в целях изготовления ширм для экранирования помещений.

Композиционные материалы для радиопоглотителей СВЧ-диапазона

Технологии формирования композиционных материалов предоставляют широкие возможности создания экранов и радиопоглотителей с необходимыми параметрами, поскольку позволяют получать материалы, электрофизические и механические свойства которых можно варьировать в широком диапазоне. Наиболее распространенные компоненты для формирования «традиционных» радиопоглотителей – порошки металлов (например, карбонильного железа (КЖ), никеля (Ni)) или углерода (У) в различных формах) и сложные соединения с магнитными свойствами. Кроме этого, могут применяться и отдельные диэлектрики, обладающие диэлектрическими потерями в требуемом диапазоне частот, такие как электропроводящие полимеры (полианилин – PANI), водные растворы солей металлов. Для задания механических свойств используются полиуретановые, эпоксидные (ЭС) и кремнийорганические (СС) связующие вещества, а также твердотельные матрицы (диэлектрические порошки и гранулы Al_2O_3 , SiO_2 , вязаные и нетканые полотна) [10].

На практике вследствие сложных многопараметрических зависимостей электрофизических параметров реальных композитов от вида и свойств компонентов технологии изготовления в основном используются экспериментальные данные [11]. Установлены величины диэлектрической ϵ' и магнитной μ' проницаемостей и диэлектрических ϵ'' и магнитных μ'' потерь образцов различных композитов и их компонентов в диапазоне частот 8–12 ГГц. Результаты представлены на рис. 4 и в табл. 1. На рис. 4, $a - A$ – порошок КЖ в СС; B – КЖ в ЭС; C – водный раствор $CaCl_2$ в гранулированном SiO_2 ; D – порошок Ni в ЭС; E – порошок Ni в СС; F – водный раствор $CaCl_2$ в вязаном синтетическом полотне, на рис. 4, $b - 1 - Al_2O_3/MoSi_2$; $2 - Al_2O_3/Fe_{80}Cr_{10}Ni_5Al_5$; $3 - Al_2O_3/TiAl$; $4 - Al_2O_3/Fe_{69}Cr_{25}Al_6$; $5 - Al_2O_3/Ti_3SiC_2$.

Таблица 1. Диэлектрическая и магнитная проницаемости различных компонентов и композитов на частоте 8 ГГц

Table 1. Dielectric and magnetic permeability of various components and composites at frequency 8 GHz

Состав образца / Sample composition	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , Fe_3O_4	2,7–4,4	0,08–0,38	–	–
КЖ (50 мас.%) в ЭС	9,4	2,82	1,30	0,22
У (5–30 мас.%) в ЭС	24,6–122,0	8,8–85,0	–	–
$FeGa_2Sb_4$ (мах.%) в ЭС	2,8	0,15	–	–
$FeIn_2S_4$ (мах.%) в ЭС	3,0	0,22	–	–
Водный раствор $CaCl_2$ в порошке SiO_2	7,0	3,06	–	–
PANI в гранулированном SiO_2	7,9	0,85	–	–

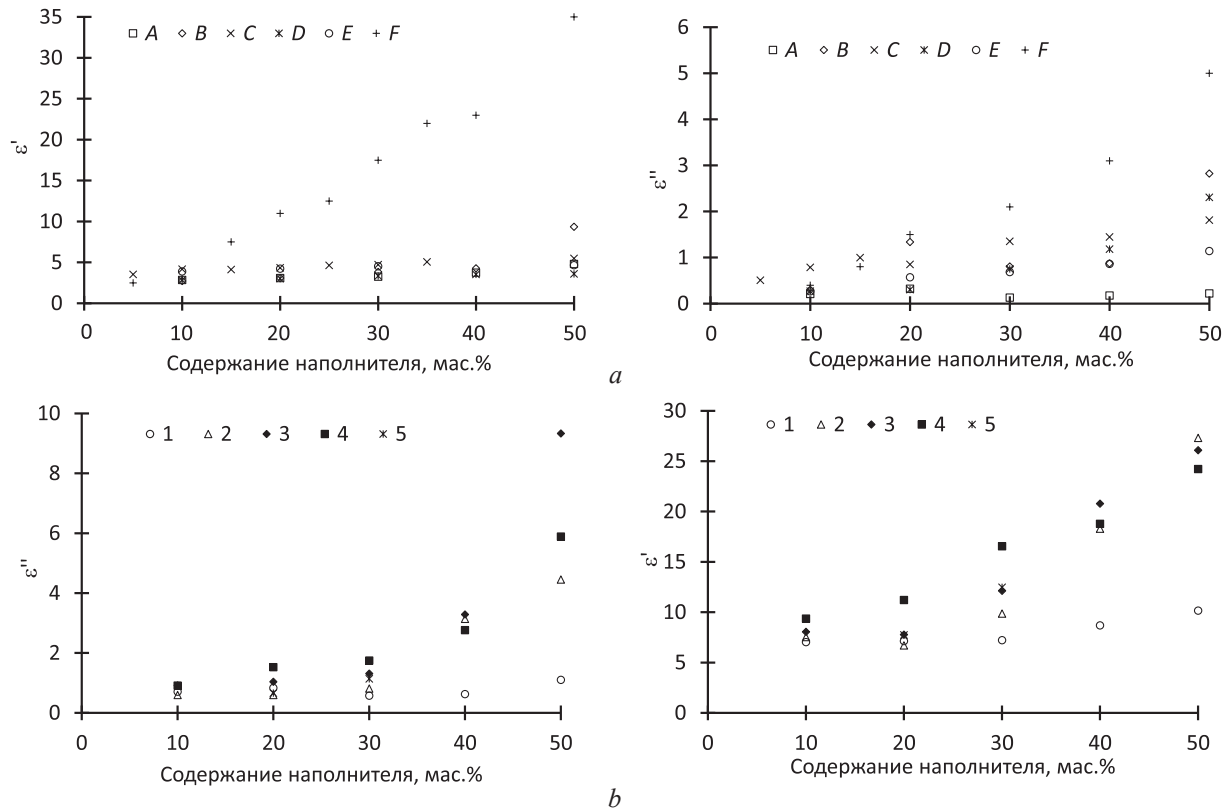


Рис. 4. Зависимости действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости различных композитов от состава (а) и концентрации (б) компонентов (приведено для 8 ГГц)
Fig. 4. Dependences of the real ϵ' and imaginary ϵ'' parts of the permittivity for various composites vs their composition (a) and concentration (b) of components (given for 8 GHz)

Следует отметить, что синтез композиционных материалов позволяет получать широкий диапазон величин электрофизических параметров – от 2,8 до 122,0 для ϵ' , от 0,08 до 85,00 для ϵ'' [12, 13]. Наибольшая величина магнитной проницаемости, полученная для разработанных образцов, составила 1,3 (образец на основе порошка карбонильного железа). Зависимости электрофизических параметров композиционных материалов от концентрации и состава компонентов использованы при анализе электромагнитных характеристик различных конструкций радиопоглотителей в программном пакете CST Microwave Studio. Также определены диапазоны параметров, позволяющие обеспечивать уменьшение значения коэффициента отражения (S_{11}) в определяемых техническим заданием пределах в требуемом диапазоне частот.

В результате исследований предложен трехслойный радиопоглотитель, диэлектрическая проницаемость и толщина слоев d которого определены по результатам оптимизации коэффициента отражения (менее -10 дБ) по критерию широкополосности (в диапазоне частот 8–12 ГГц). В процессе электродинамического моделирования установлены электрофизические и структурные характеристики радиопоглотителя, которые позволяют обеспечить S_{11} менее -10 дБ во всем диапазоне частот исследований (рис. 5, а).

Оптимизация параметров радиопоглотителя по критерию минимальной величины коэффициента отражения позволила предложить трехслойный радиопоглотитель, обеспечивающий коэффициент отражения ЭМИ менее -10 дБ в диапазоне частот 8,5–11,5 ГГц с шириной полосы частот $\Delta f \approx 3$ ГГц. Установленные электрофизические и структурные параметры радиопоглотителя обеспечивают минимальный коэффициент отражения $S_{11} = -52$ дБ вблизи частоты 9,8 ГГц (рис. 5, б). Для разработанных радиопоглотителей определены диапазоны параметров, позволяющие обеспечить заданные требования. Измерения коэффициента отражения S_{11} в диапазоне частот 8–12 ГГц (рис. 6) показали, что частотная характеристика отражения радиопоглотителя близка к результатам моделирования, показанным на рис. 5, а, а величина коэффициента отражения – менее -10 дБ во всем исследованном диапазоне частот.

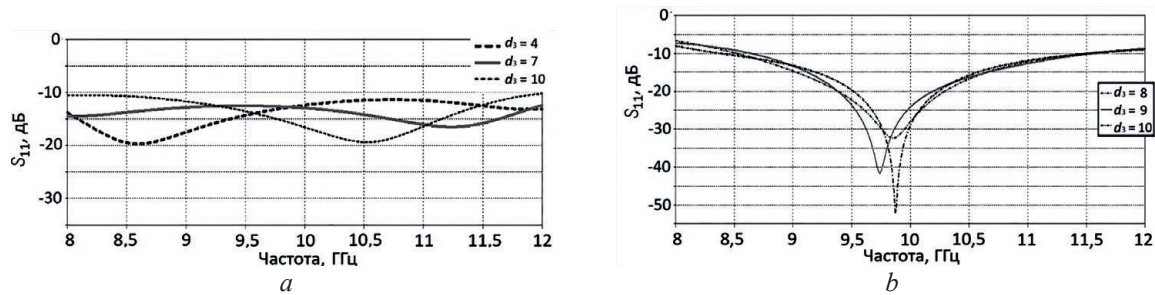


Рис. 5. Результаты моделирования характеристики отражения многослойного радиопоглопителя:

a – вариант 1 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8,5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ мм; $d_2 = 7$ мм; $d_3 = 4$; 7; 10 мм;

b – вариант 2 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8,5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ мм; $d_2 = 5$ мм; $d_3 = 8$; 9; 10 мм

Fig. 5. Results of reflection characteristics simulation for a multilayered microwave absorber:

a – variant 1 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8.5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ mm; $d_2 = 7$ mm; $d_3 = 4$; 7; 10 mm;

b – variant 2 – $\varepsilon'_1 = 3$; $\varepsilon'_2 = 8.5$; $\varepsilon'_3 = 30$; $d_1 = 5$ mm; $d_2 = 5$ mm; $d_3 = 8$; 9; 10 mm

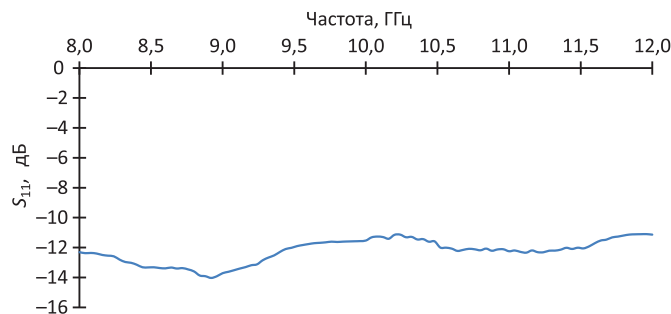


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения трехслойного радиопоглопителя от частоты

Fig. 6. Frequency dependence of the reflection coefficient of a three-layer radio absorber

Защита речевой информации комбинированными маскирующими сигналами

Для оценки защищенности речевой информации по показателям разборчивости речи с использованием расчетных и расчетно-инструментальных методов ориентация на среднюю слуховую чувствительность слушателей не допустима. Предварительные эксперименты показали, что при высоких уровнях маскирующих шумов, когда разборчивость речи менее 10 %, имеется большой разброс показателей разборчивости защищаемой речи в зависимости от слуховой чувствительности слушателей. Поэтому необходимо изменить подход к отбору дикторов и слушателей при оценке разборчивости речи для решения задач защиты речевой информации и дополнить методики экспериментальных исследований разборчивости речи конкретными методическими материалами по отбору и обучению слушателей воспринимать речевые сигналы на фоне маскирующих акустических шумов [14–17].

Для экспериментальных исследований сформировали комбинированные маскирующие сигналы, как описано выше, которые были наложены на фонограммы информационных речевых сигналов в виде связного текста длительностью около 2–3 мин и объемом 198–202 слов. Фонограммы озвучивались отобранными и подготовленными дикторами. При этом соотношения сигнал/комбинированный маскирующий шум были (–14), (–12), (–10), (–9) дБ. Результаты экспериментальных исследований словесной разборчивости подготовленными слушателями путем многократного прослушивания фонограмм различными слушателями представлены на рис. 7. При этом речь маскировалась комбинированными сигналами и «белым» шумом.

Применение комбинированных маскирующих сигналов, состоящих из «белого» шума и речеподобных сигналов с соотношением 6 дБ, позволило снизить интегральный уровень маскирующих сигналов более чем на 10 дБ. Это обеспечивает комфортные условия для работы в защищаемом помещении. Для комбинированных маскирующих сигналов словесная разборчивость речи может быть определена из выражения

$$R = e^{-8,9+17,4SN}, \quad (1)$$

где R – словесная разборчивость, отн. ед. (не в процентах); SN – интегральное отношение сигнал/шум, отн. ед. (не в децибелах), справедливое для диапазона SN от 0 до 0,35.

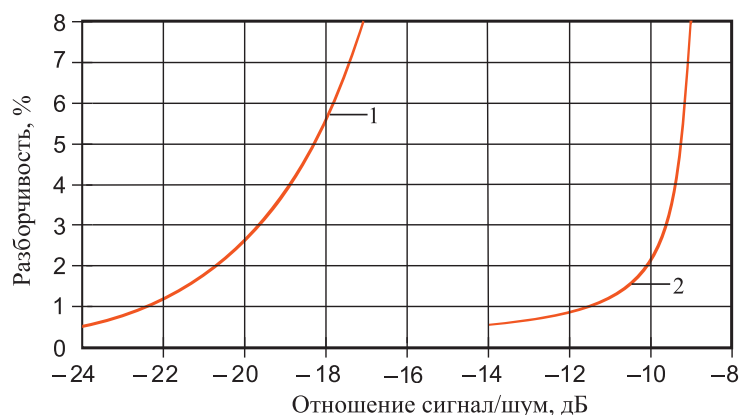


Рис. 7. Зависимость словесной разборчивости речи от отношения сигнал/шум при всем диапазоне частот для: 1 – маскирующего сигнала в виде «белого» шума; 2 – комбинированных маскирующих сигналов

Fig. 7. Dependence of verbal speech intelligibility on the signal-to-noise ratio over the entire frequency range for: 1 – masking signal in the form of “white” noise; 2 – combined masking signals

Для автоматизации вычислений словесной разборчивости речи от интегрального отношения сигнал/шум для маскирующего сигнала в виде «белого» шума выполнили аппроксимацию зависимости (1) выражением

$$R = 6,9SN^2 - 0,2SN. \quad (2)$$

Проведенные экспериментальные исследования разборчивости речи позволили получить ее аппроксимирующую зависимость от соотношения сигнал/шум и не обращать внимания на имеющиеся сомнения в адекватности основных положений формантной теории разборчивости речи. В первую очередь это относится к исключению частотной зависимости коэффициента эффективности восприятия форманта речи. Указанным выше требованиям формирования комбинированных маскирующих сигналов или маскирующих сигналов в виде «белого» шума удовлетворяет устройство защиты речевой информации «Прибой». Кроме того, благодаря ряду конструктивных решений и отсутствию внутри блочных разъемных соединений данное устройство обладает высокой надежностью, что является важнейшим параметром при его эксплуатации.

Двумерные магнитные нанокompозиты для повышения помехоустойчивости изделий магнетoeлектроники

В рамках приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 гг. особое внимание уделяется поиску новых композиционных наноматериалов, в том числе на основе массивов углеродных нанотрубок (УНТ), для различных областей радиотехнической, электронной и оптоэлектронной промышленности, исследованию их структуры и свойств, а также наукоемким и экономичным технологиям их создания. Для целого ряда магнитно-электронных приложений необходимо синтезировать магнитные нанокompозиты, состоящие из однодоменных наночастиц с высокой плотностью упаковки (10^{10} частиц/см²) и с отсутствием магнитостатического взаимодействия между частицами. С этой целью предложено использовать УНТ в качестве задающей матрицы.

Разработана оригинальная методика, позволяющая формировать массив вертикально расположенных УНТ, внутри которых находится только одна частица ферромагнитного материала Co [18]. Принцип формирования таких образцов заключается в том, что в качестве катализатора для роста УНТ методом химического парофазного осаждения используется массив наночастиц Co, предварительно сформированный на подложке SiO₂/Si.

При больших концентрациях каталитических наночастиц они локализованы внутри УНТ, внутри и снаружи стенок УНТ. Механизм взаимодействия между ними обусловлен обменным

взаимодействием. Такие наноконпозиты перспективны в качестве экранирующих материалов в широком диапазоне частот, вплоть до терагерц [19, 20]. Однако их применение в магнетoeлектронике мало перспективно в силу слабой контролируемости свойств. Со снижением концентрации катализатора можно реализовать случай, когда наночастицы ферромагнетика локализованы только внутри УНТ. Концентрация их крайне мала, и среднее расстояние между наночастицами внутри УНТ составляет порядка сотен нанометров. Между тем наночастицы, локализованные в одной трубке, не являются магнитно-изолированными. Они связаны косвенным обменным взаимодействием, возникающим из-за большого спин-орбитального эффекта, вызванного кризисной и дефектностью нанотрубок [21].

Таким образом, для формирования УНТ, внутри которых была бы локализована только одна ферромагнитная наночастица, необходимо формировать массив ориентированных УНТ на подложке с предварительно нанесенными наночастицами катализатора. В процессе роста (механизм сверху вниз) форма наночастиц подвержена изменению вследствие температуры процесса, близкой к эвтектической температуре наночастиц ферромагнетика. Возникающие при этом внутренние упругие напряжения приводят к росту вклада магнитной анизотропии, который превосходит дипольное взаимодействие между частицами. При этом возможен кроссовер от коллективного поведения ансамбля наночастиц к индивидуальному. Данные экспериментальных измерений петель гистерезиса в параллельном и перпендикулярном плоскости подложки направлениях магнитного поля вместе с результатами расчета микромагнитных параметров и внутренних напряжений в наночастицах подтверждают справедливость этой гипотезы [18, 22].

Проводили исследования магнитных свойств ансамбля наночастиц Co, нанесенных на проводящую медную подложку. В результате формируется принципиально новый тип композитного двумерного (2D) магнитного материала [23]. Измерение петель гистерезиса в широком диапазоне температур подтвердило ферромагнитный характер обменного взаимодействия в таких 2D-наноконпозитах. Спиновая текстура может быть хорошо контролируема и управляема, что создает предпосылки для конструирования новых приборов спинтроники с повышенной помехоустойчивостью. Кроме того, в отличие от известных 2D-материалов, таких как топологические изоляторы, дихалькогениды переходных металлов, фосфорены, силицены, ZnO и прочих, ферромагнитные свойства в сформированных 2D-наноконпозитах на их основе наблюдаются при комнатной температуре, что расширяет функциональные возможности приборов на их основе, повышает устойчивость к влиянию влаги, окислению и высоким температурам. Кроме того, отсутствует проблема масштабируемости пластин [24].

В результате проведенных исследований установлено, что корреляционная функция осей магнитной анизотропии $C(z)$ (спиновая текстура) при температурах жидкого гелия представляет собой быстро осциллирующую периодическую функцию (рис. 8, *a*). Корреляции распространяются на макроскопически большие расстояния, вплоть до микрометров, а амплитуда осцилляций может усиливаться при определенных значениях обменного поля. Колебания спиновой текстуры вызваны косвенной обменной связью, а их амплитуда, т. е. эффект дальнего действия, определяется другими причинами. Как известно, в наноструктурах ферромагнетик/антиферромагнетик обменное смещение создает однонаправленную анизотропию, препятствующую обращению ферромагнитного момента [24]. Эффект однонаправленной анизотропии превышает анизотропию ядра Co. В наночастицах этот эффект приводит к тому, что намагниченность также должна быть фиксированной, а анизотропия кобальта упорядочивается определенным образом, минимизируя магнитную энергию системы Co/CoO. К причине, подтверждающей дальнедействующие корреляции осей магнитной анизотропии в реальном пространстве, по мнению авторов статьи, относится наличие сильной магнитной анизотропии оболочек CoO и обменного смещения в Co/CoO.

С ростом температуры спиновая текстура меняет свой характер, она становится немонотонной, и корреляции стремятся к нулю при $z \rightarrow 0$ (рис. 8, *b*), что подтверждает гипотезу о некоррелированности осей магнитной анизотропии соседей. Это может быть связано как с разбросом параметров наночастиц, короткодействующим диполь-дипольным взаимодействием, так и с подавлением косвенного обменного взаимодействия тепловой энергией. Тем не менее даже в этом случае корреляции спиновой текстуры сохраняются до дистанций порядка сотен нанометров, что весьма перспективно для спинтронных устройств.

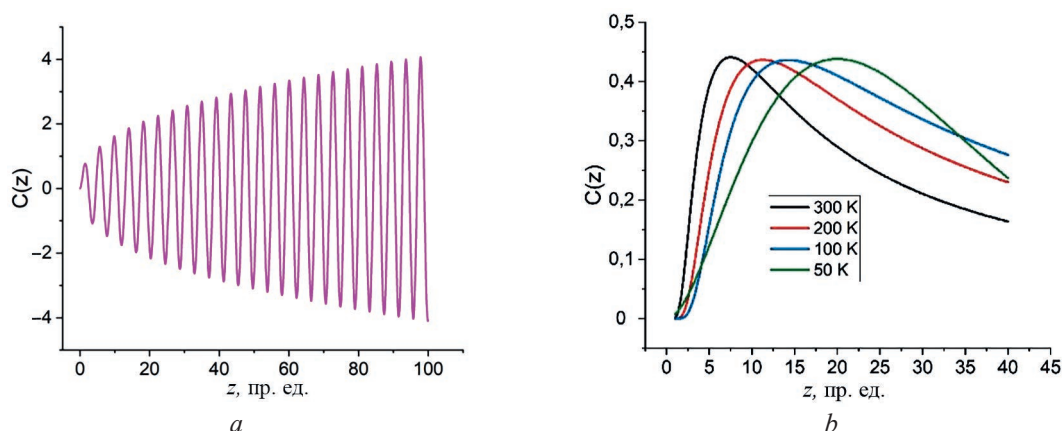


Рис. 8. Корреляционная функция осей магнитной анизотропии при температурах: a – 4 К; b – 50–300 К
Fig. 8. Correlation function of magnetic anisotropy axes at temperatures: a – 4 K; b – 50–300 K

Заклучение

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования различных композитных многослойных материалов и покрытий для экранирования электромагнитного излучения СВЧ-диапазона показали перспективность их применения для защиты изделий электронной техники и операторов. Разработаны эффективные принципы и методы формирования комбинированных маскирующих сигналов в виде «белого» шума для устройств защиты речевой информации. Показана перспективность применения двумерных магнитных композитов для повышения спиновой устойчивости изделий магнитоэлектроники к внешним магнитным полям в широком диапазоне температур.

Список литературы

1. Ayad, H. Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials / H. Ayad, O. Voiprav, L. Lynkou. Minsk: Bestprint, 2020.
2. Бойправ, О. В. Перспективные слоистые гибкие радиопоглощающие материалы на основе порошкообразного угля / О. В. Бойправ, В. А. Богуш // Перспективные материалы. 2023. № 8. С. 15–26. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-8-15-26.
3. Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding / O. V. Voiprav [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2023. Vol. 117, Iss. 1. DOI: 10.34910/MCE.117.9.
4. Негорючее композиционное покрытие на основе глинозема для изготовления радиопоглощающих конструкций / Д. И. Пеньялоса Овальес [и др.] // Приборы. 2020. Т. 6, № 240. С. 39–43.
5. Voiprav, O. V. Multifunctional Composite Charcoal-Containing Microwave and X-ray Radiation Absorbers / O. V. Voiprav, V. A. Bogush, N. N. Grinchik // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2023. Vol. 8, Iss. 4. P. 294–303. DOI: 10.17277/jamt.2023.04.pp.294-303.
6. Белоусова, Е. С. Экспериментальное обоснование технологии изготовления угленасыщенных поглотителей электромагнитного излучения / Е. С. Белоусова, О. В. Бойправ, С. Э. Саванович // Электромагнитные волны и электронные системы. 2022. № 5. С. 21–27. DOI: 10.18127/j5604128-202205-03.
7. Электромагнитные экраны на основе алюминия, его оксидов и углеродных волокон. Технологии, конструкции и свойства / Х. Д. А. Абдулхади [и др.]. Минск: Бестпринт, 2021.
8. Voiprav, O. V. Improved Technology of Frequency-Selective UHF Electromagnetic Shields Containing Helical Elements / O. V. Voiprav, N. V. Bogush // Modern Electronic Materials. 2022. Vol. 8, Iss. 4. P. 157–164. DOI: 10.3897/j.moem.8.4.100653.
9. Flexible Double-Layered Microwave Absorbers Based on Foiled Materials with Mechanically Treated Surface / O. Voiprav [et al.] // New Materials, Compounds and Applications. 2023. Vol. 7, Iss. 2. P. 100–110.
10. Электрофизические свойства слоев сотовой сэндвич-структуры для радиопоглотителей микроволнового излучения / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. 2023. № 46. С. 134–139.
11. Сотовые сэндвич-структуры для поглощения электромагнитного излучения и радиопоглотители на их основе / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. 2021. № 44. С. 165–172.

12. Новые технологии создания экранов электромагнитного излучения на основе модифицированных порошковых, наноструктурированных и пленочных материалов / Л. М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. 2019. № 2. С. 85–99.
13. Использование жаростойкого сплава в качестве поглотителя ЭМИ микроволнового диапазона / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия. 2019. № 42. С. 27–35.
14. Seitkulov, Y. N. The Base of Speech Structural Units of Kasakh Language for the Synthesis of Speech-Like Signals / Y. N. Seitkulov, H. V. Davydau, A. V. Patapovich // Proceeding of the IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies. 2018. DOI: 10.1109/ICA-ICT.2018.8747120.
15. Seitkulov, Y. N. Algoritym of Forming Speech Base Units Using the Method of Dynamic Programming / Y. N. Seitkulov, H. V. Davydau, A. V. Patapovich // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2018. Vol. 96, No 23. P. 7928–7941.
16. Speech Information Security Assessing in Case of Combined Masking Signals / Y. N. Seitkulov [et al.] // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2020. Vol. 98, No 16. P. 3270–3281.
17. Method for Speech Intelligibility Assessment with Combined Masking Signals / Y. N. Seitkulov [et al.] // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2020. Vol. 98, No 8. P. 1173–1186.
18. Impact of Aligned Carbon Nanotubes Array on the Magnetostatic Isolation of Closely Packed Ferromagnetic Nanoparticles / A. L. Danilyuk [et al.] // Carbon. 2018. No 139. P. 1104–1116. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.08.024.
19. Microwave Absorption in Nanocomposite Material of Magnetically Functionalized Carbon Nanotubes / V. A. Labunov [et al.] // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 112, No 2. DOI: 10.1063/1.4737119.
20. Atdayev, A. Interaction of Electromagnetic Radiation in the 20–200 GHz Frequency Range with Arrays of Carbon Nanotubes with Ferromagnetic Nanoparticles / A. Atdayev, A. L. Danilyuk, S. L. Prischepa // Beilstein Journal of Nanotechnology. 2015. Vol. 6. P. 1056–1064. DOI: 10.3762/bjnano.6.106.
21. Danilyuk, A. L. Long-Range Exchange Interaction Between Ferromagnetic Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes / A. L. Danilyuk, A. V. Kukharev, S. L. Prischepa // IEEE Transactions on Magnetics. 2022. Vol. 58, Iss. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2021.3102403.
22. Anisotropy of Assemblies of Densely Packed Co-Alloy Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes / S. L. Prischepa [et al.] // IEEE Magnetic Letters. 2019. Vol. 10. DOI: 10.1109/LMAG.2019.2933380.
23. CVD Graphene Sheets Electrochemically Decorated with “Core-Shell” Co/CoO Nanoparticles / V. G. Bayev [et al.] // Applied Surface Science. 2018. No 440. P. 1252–1260. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.245.
24. Low-Temperature Magnetic Ordering in Co Core/CoO Shell Nanoparticles on the Copper Surface / A. L. Danilyuk [et al.] // Current Applied Physics. 2023. No 56. P. 79–84. DOI: 10.1016/j.cap.2023.10.003.

References

1. Ayad H., Boiprav O., Lynkou L. (2020) *Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials*. Minsk, Bestprint Publ.
2. Boiprav O. V., Bogush V. A. (2023) Advanced Layered Flexible Radio-Absorbing Materials Based on Powdered Charcoal. *Perspektivnye Materialy*. (8), 15–26. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-8-15-26 (in Russian).
3. Boiprav O. V., Belousova E. S., Ahmetdinova E. S., Bogush N. V. (2023) Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Magazine of Civil Engineering*. 117 (1). DOI: 10.34910/MCE.117.9.
4. Penalzo Ovalles D. I., Boiprav O. V., Tumilovich M. V., Gusinsky A. V., Pasrobka G. S., Lynkou L. M. (2020) Non-Combustible Composite Coating Based on Electrocorundum Powder for Electromagnetic Shields. *Devices*. 6 (240), 39–43 (in Russian).
5. Boiprav O. V., Bogush V. A., Grinchik N. N. (2023) Multifunctional Composite Charcoal-Containing Microwave and X-ray Radiation Absorbers. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 8 (4), 294–303.
6. Belousova E. S., Boiprav O. V., Savanovich S. E. (2022) Experimental Substantiation of Manufacturing Technologies of Charcoal-Containing Electromagnetic Absorbers. *Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. (5), 21–27. DOI: 10.17277/jamt.2023.04.pp.294-303 (in Russian).
7. Abdulhadi H. D. A., Al-Mashatt E. A. A., Bogush V. A., Boiprav O. V., Lynkou L. M., Mukhurov N. I., et al. (2021) *Electromagnetic Screens Based on Aluminum, its Oxides and Carbon Fibers. Technologies, Designs and Properties*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
8. Boiprav O. V., Bogush N. V. (2022) Improved Technology of Frequency-Selective UHF Electromagnetic Shields Containing Helical Elements. *Modern Electronic Materials*. 8 (4), 157–164. DOI: 10.3897/j.moem.8.4.100653.

9. Boiprav O., Hasanov M., Bogush V., Lynkou L. (2023) Flexible Double-Layered Microwave Absorbers Based on Foiled Materials with Mechanically Treated Surface. *New Materials, Compounds and Applications*. 7 (2), 100–110.
10. Il'yushchenko A. F., Baraj S. G., Lecko A. I., Reutenok Yu. A., Zhuk E. V., Krumin D. G., et al. (2023) Electrophysical Properties of Layers of a Honeycomb Sandwich Structure for Microwave Absorbers. *Powder Metallurgy*. (46), 134–139 (in Russian).
11. Il'yushchenko A. F., Baraj S. G., Zhuk E. V., Nasonova N. V. (2021) Honeycomb Sandwich Structures for Electromagnetic Radiation Absorption and Microwave Absorbers Based on Them. *Powder Metallurgy*. (44), 165–172 (in Russian).
12. Lynkou L. M., Bogush V. A., Borbot'ko T. V., Nasonova N. V., Belousova E. S., Boiprav O. V. (2019) New Technologies for Creation of Electromagnetic Radiation Shields Based on Modified Powder, Nanostructured and Film Materials. *Doklady BSUIR*. (2), 85–99 (in Russian).
13. Il'yushchenko A. F., Baraj S. G., Zhuk E. V., Nasonova N. V., Puhir G. A. (2019) Using a Heat-Resistant Alloy as a Microwave Absorber. *Powder Metallurgy*. (42), 27–35 (in Russian).
14. Seitkulov Y. N., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2018) The Base of Speech Structural Units of Kasakh Language for the Synthesis of Speech-Like Signals. *Proceeding of the IEEE 12th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*. DOI: 10.1109/ICAICT.2018.8747120.
15. Seitkulov Y. N., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2018) Algorithm of Forming Speech Base Units Using the Method of Dynamic Programming. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 96 (23), 7928–7941.
16. Seitkulov Y. N., Boronbayev S. N., Tashatov N. N., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2020) Speech Information Security Assessing in Case of Combined Masking Signals. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 98 (16), 3270–3281.
17. Seitkulov Y. N., Boronbayev S. N., Yergaliyeva B. B., Davydau H. V., Patapovich A. V. (2020) Method for Speech Intelligibility Assessment with Combined Masking Signals. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 98 (8), 1173–1186.
18. Danilyuk A. L., Kukharev A. V., Cojocar C. S., Le Normand F., Prischepa S. L. (2018) Impact of Aligned Carbon Nanotubes Array on the Magnetostatic Isolation of Closely Packed Ferromagnetic Nanoparticles. *Carbon*. (139), 1104–1116. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.08.024.
19. Labunov V. A., Danilyuk A. L., Prudnikava A. L., Komissarov I., Shulitski B. G., Speisser C., et al. (2012) Microwave Absorption in Nanocomposite Material of Magnetically Functionalized Carbon Nanotubes. *Journal of Applied Physics*. 112 (2). DOI: 10.1063/1.4737119.
20. Atdayev A., Danilyuk A. L., Prischepa S. L. (2015) Interaction of Electromagnetic Radiation in the 20–200 GHz Frequency Range with Arrays of Carbon Nanotubes with Ferromagnetic Nanoparticles. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 6, 1056–1064. DOI: 10.3762/bjnano.6.106.
21. Danilyuk A. L., Kukharev A. V., Prischepa S. L. (2022) Long-Range Exchange Interaction Between Ferromagnetic Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes. *IEEE Transactions on Magnetics*. 58 (2). DOI: 10.1109/TMAG.2021.3102403.
22. Prischepa S. L., Danilyuk A. L., Kukharev A. V., Cojocar C. S., Kargin N. I., Le Normand F. (2019) Anisotropy of Assemblies of Densely Packed Co-Alloy Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes. *IEEE Magnetic Letters*. 10. DOI: 10.1109/LMAG.2019.2933380.
23. Bayev V. G., Fedotova J. A., Kasiuk J. V., Vorobyova S. A., Sohor A. A., Komissarov I. V., et al. (2018) CVD Graphene Sheets Electrochemically Decorated with “Core-Shell” Co/CoO Nanoparticles. *Applied Surface Science*. (440), 1252–1260. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.01.245.
24. Danilyuk A. L., Nazarenska E. S., Vorobyova S. A., Fedotova J. A., Prischepa S. L. (2023) Low-Temperature Magnetic Ordering in Co Core/CoO Shell Nanoparticles on the Copper Surface. *Current Applied Physics*. (56), 79–84. DOI: 10.1016/j.cap.2023.10.003.

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Богущ В. А., д-р физ.-мат. наук, проф., ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Лыньков Л. М., д-р техн. наук, проф., Почетный проф. БГУИР

Насонова Н. В., д-р техн. наук, доц., вед. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы, технологии и средства обеспечения безопасности» (НИЛ 5.3) НИЧ, БГУИР

Прищепа С. Л., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. защиты информации, БГУИР

Белюсова Е. С., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, БГУИР

Бойправ О. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, БГУИР

Давыдов Г. В., канд. техн. наук, доц., вед. науч. сотр. НИЛ 5.3 НИЧ, БГУИР

Попов В. А., ст. науч. сотр. НИЛ 5.3 НИЧ, БГУИР

Потапович А. В., зав. НИЛ 5.3 НИЧ, БГУИР

Пухир Г. А., ст. препод. каф. защиты информации, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-23-17
E-mail: prischepa@bsuir.by
Прищепа Сергей Леонидович

Information about the authors

Bogush V. A., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Lynkou L. M., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Honorary Professor of the BSUIR

Nasonova N. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Leading Scientist at the Research Laboratory “Materials, Technologies and Devices for Security” (Lab. 5.3) of R&D Department, BSUIR

Prischepa S. L., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at Information Security Department, BSUIR

Belousova E. S., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Information Security Department, BSUIR

Boiprav O. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Information Security Department, BSUIR

Davydau H. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Scientist at the Lab. 5.3 of R&D Department, BSUIR

Papou V. A., Senior Researcher at the Lab. 5.3 of R&D Department, BSUIR

Patapovich A. V., Head of the Lab. 5.3 of R&D Department, BSUIR

Pukhir H. A., Senior Lecturer at Information Security Department, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-23-17
E-mail: prischepa@bsuir.by
Prischepa Serghej Leonidovich