

* * *

Магнитодиэлектрические поглотители СВЧ-излучения на основе ферритмагнитных соединений

СЕРЕБРЯННИКОВ С.В., РУМЯНЦЕВ П.А., ЧЕРКАСОВ А.П., ЕРЕМЦОВА Л.Л.

Рассмотрено создание радиопоглощающих покрытий для диапазона частот 8–55 ГГц на основе композиционных магнитодиэлектриков, в которых для поглощения электромагнитного излучения используются гексаферриты с различным значением поля магнитокристаллической анизотропии. Исследовано влияние проводящих углеродных включений различной структуры на поглощение электромагнитного излучения. Показано, что введение их в состав композита приводит к увеличению поглощения излучения. Получены широкополосные радиопоглощающие покрытия для диапазона частот 36–55 ГГц.

Ключевые слова: помехозащищенность устройств, СВЧ-диапазон, радиопоглощающее покрытие, гексаферриты, исследования

The article describes the development of radio wave absorbing coatings for the frequency band 8–55 GHz made on the basis of composite magnetodielectrics, in which hexaferrites with different values of magnetocrystalline anisotropy are used to absorb electromagnetic radiation. The influence of conducting carbon inclusions of different structures on the absorption of electromagnetic radiation is investigated. It is shown that introduction of such inclusions in the composite results in higher absorption of radiation. Wide-band radio wave absorbing coatings for the frequency band 36–55 GHz are obtained.

Key words: noise immunity of devices, microwave band, radio wave absorbing coating, hexaferrites, investigations

Проблема электромагнитной совместимости и помехозащищенности приобретает все большую актуальность в связи с увеличением номенклатуры устройств электротехники, радиоэлектроники, компьютерных систем и систем связи.

Для обеспечения электромагнитной совместимости и помехозащищенности устройств в СВЧ-диапазоне применяют радиопоглощающие покрытия (РПП). В настоящее время при создании РПП используется множество материалов и подходов, базирующихся на различных физических эффектах [1–5]. Одним из способов создания РПП является использование магнитодиэлектрических

композиатов, в которых в качестве компонента, поглощающего электромагнитное излучение (ЭМИ), применяются высокоанизотропные гексагональные ферриты и проводящие включения. Такие материалы позволяют создавать пленочные РПП, обладающие высокими магнитными и диэлектрическими потерями. Эффективность таких материалов обусловлена широкими возможностями варьирования их параметров путем изменения значений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей, от которых зависит вход электромагнитной волны в материал и ее дальнейшее поглощение, а также геометрическими параметрами пленок, от

которых зависит распространение, поглощение и рассеяние радиоволн.

В большинстве случаев РПП наносится на металлическую поверхность устройств. Формирование покрытия на металле приводит к увеличению поглощения ЭМИ, так как волна дважды проходит через радиопоглощающий материал (РПМ). Соответственно, для получения необходимого поглощения ЭМИ, заданного техническими характеристиками устройства, возможно создание покрытия меньшей толщины, что в свою очередь способствует решению задачи снижения веса покрытия и устройства в целом. В отличие от покрытия, сформированного на диэлектрической подложке [6], эти покрытия обладают нелинейной зависимостью поглощения от толщины.

Для решения поставленных задач был проведен ряд экспериментов, в результате которых были созданы РПП, обеспечивающие поглощение ЭМИ в широком диапазоне частот.

Радиопоглощающие покрытия наносились лакокрасочным методом, описанным в [7].

Покрытия на основе феррита $BaFe_{12}O_{19}$. Зависимость максимального значения поглощения электромагнитного излучения и частоты максимума от толщины покрытия представлена на рис. 1. Частотные зависимости поглощения ЭМИ для различной толщины покрытия представлены на рис. 2.

Из рис. 1 видно, что увеличение толщины покрытия приводит к повышению поглощения, зависимость которого при этом имеет нелинейный ха-

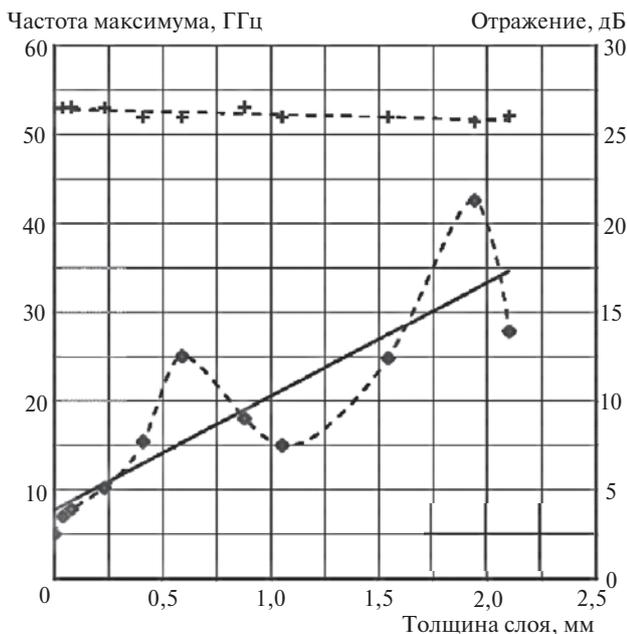


Рис. 1. Зависимость отражения электромагнитного излучения и частоты максимума поглощения от толщины покрытия: — — среднее значение частоты максимума и поглощения ЭМИ покрытием; - - - — аппроксимация полиномом экспериментальной зависимости значения поглощения; + — частота максимума; ◆ — отражение максимума

рактер. При толщине 0,59 и 1,94 мм зависимость $f_{max}(h)$ имеет максимальные значения. Максимум частоты поглощения при изменении толщины покрытия от 0,04 до 2,10 мм изменяется от 52 до 51 ГГц.

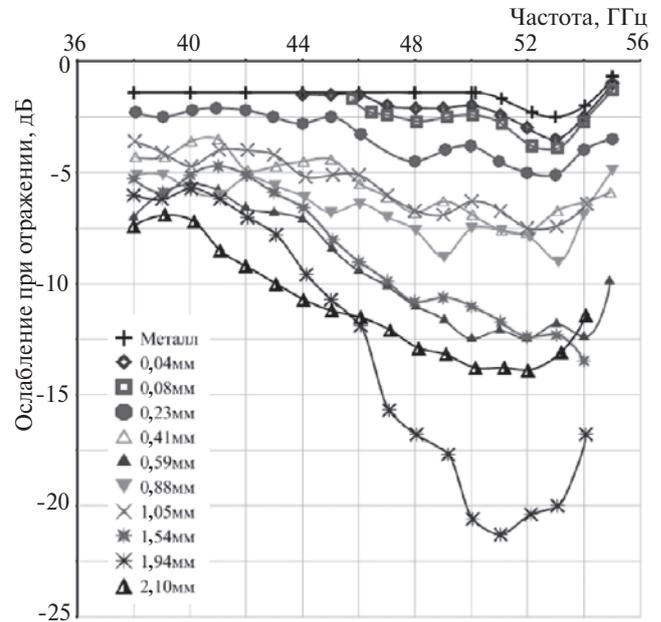


Рис. 2. Частотная зависимость ослабления при отражении ЭМИ покрытием на основе $BaFe_{12}O_{19}$ при нанесении на металлическую поверхность

Из рис. 2 видно, что при формировании однослойного и двухслойного покрытий поглощение ЭМИ имеет малые значения из-за незначительного объема ферромагнитного материала, нанесенного на защищаемую поверхность. Тем не менее, при толщине покрытия в 0,04 мм уровень поглощения ЭМИ составляет приблизительно 0,5–1,0 дБ.

Из анализа кривых (рис. 2) установлен плавный рост поглощения ЭМИ покрытием. При этом ход частотной зависимости поглощения и частота максимума поглощения электромагнитного излучения практически не изменяются.

Полученные результаты позволяют утверждать, что, формируя покрытие на металлической подложке, необходимо учитывать существенную зависимость поглощения от толщины. При этом увеличение толщины покрытия не всегда приводит к увеличению поглощения ЭМИ, что можно объяснить явлением интерференции электромагнитных волн в результате отражения их от металла.

Покрытия с наполнителями, повышающими диэлектрические потери. Сложность разработки эффективного РПП в диапазоне частот от 8 до 18 ГГц заключается в том, что длина волны электромагнитного излучения практически в 10 раз больше, чем толщина наносимого на основу покрытия. Таким образом, ЭМИ почти не поглощается в покрытиях с малой толщиной. Для увеличения эффек-

тивности поглощения электромагнитных волн в состав композита вводился проводящий наполнитель, в качестве которого был выбран графит, и исследовалось его влияние на электрофизические характеристики РПП. Выбор графита был обоснован экономическими соображениями. Для формирования покрытия с повышенными диэлектрическими потерями в состав магнитоэлектрика вводится мелкодисперсный графит с размером частиц 60–100 мкм, имеющих форму чешуек. В качестве наполнителя обеспечивающего магнитные потери, выбран гексагональный феррит $\text{BaSc}_{1,2}\text{Fe}_{10,8}\text{O}_{19}$.

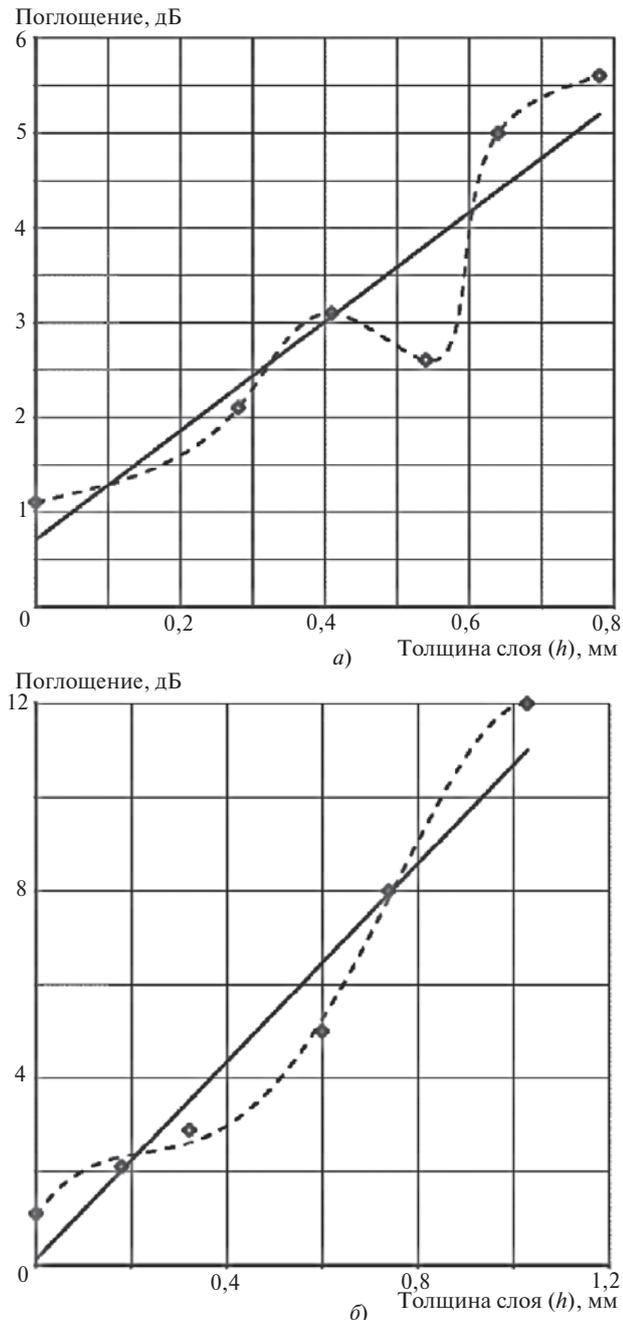


Рис. 3. Зависимость максимума поглощения ЭМИ от толщины покрытия с гетерогенным наполнителем в виде магнитоодносного феррита $\text{BaSc}_{1,2}\text{Fe}_{10,8}\text{O}_{19}$: *а* – с добавлением графита; *б* – с добавлением углеродных нанотрубок

Зависимость максимального значения поглощения электромагнитного излучения и частоты от толщины покрытия представлена на рис. 3,*а*; частотные зависимости поглощения ЭМИ для различной толщины покрытия представлены на рис. 4,*а* и 5.

Из анализа полученных зависимостей (рис. 4,*а* и 5) установлено, что добавление мелкодисперсного полупроводящего наполнителя (графита) в состав РПП приводит к увеличению эффективности поглощения электромагнитных волн. Тем не менее, при толщине наносимого радиопоглощающего материала до 0,28 мм поглощения ЭМИ в диа-

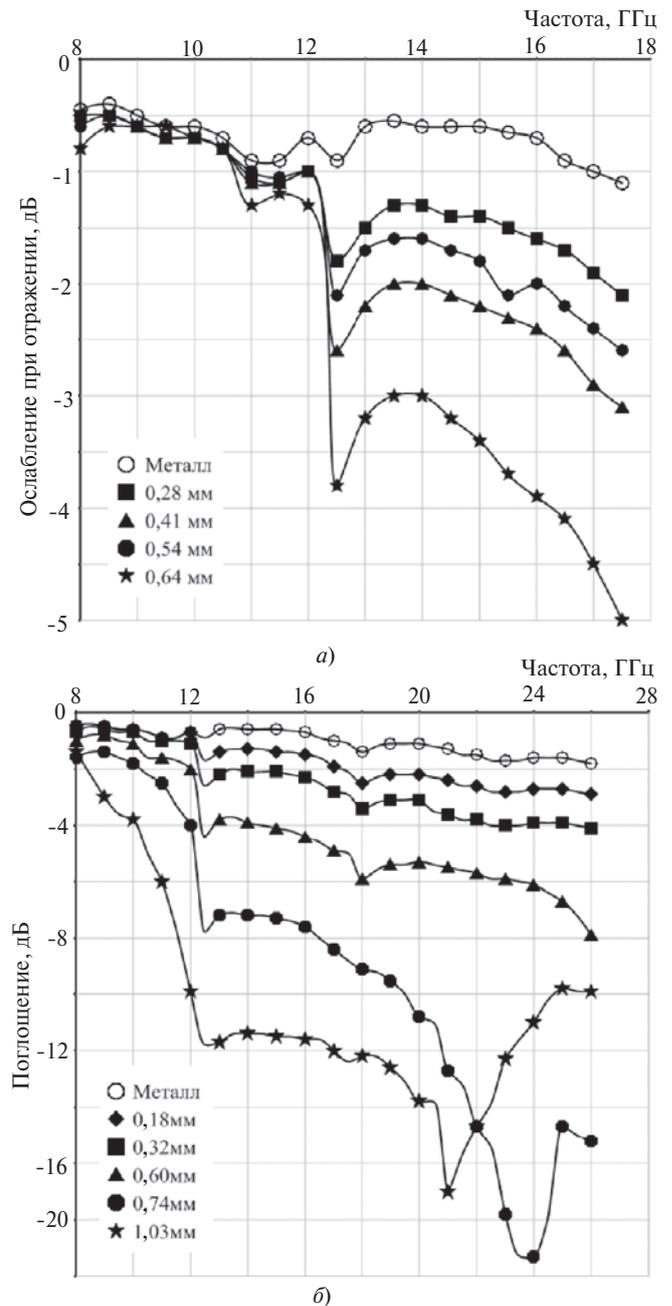


Рис. 4. Частотная зависимость поглощения ЭМИ при различной толщине покрытия с гетерогенным наполнителем в виде магнитоодносного феррита $\text{BaSc}_{1,2}\text{Fe}_{10,8}\text{O}_{19}$: *а* – с добавлением графита; *б* – с добавлением углеродных нанотрубок

пазоне частот от 8 до 18 ГГц практически не происходит. Рис. 3 иллюстрирует зависимость поглощения ЭМИ от толщины формируемого радиопоглощающего покрытия. Увеличение толщины покрытия приводит к повышению поглощения, зависимость которого при этом имеет нелинейный характер.

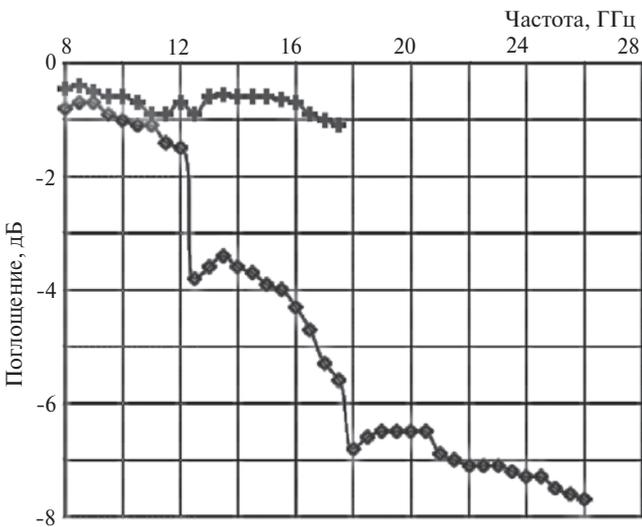


Рис. 5. Частотная зависимость поглощения ЭМИ покрытием на основе магнитоэлектрика с гетерогенным наполнителем в виде магнитоодноосного феррита $BaSc_{1,2}Fe_{10,8}O_{19}$ и графита при толщине 0,78 мм: + – металл; ◆ – покрытие

Также в качестве наполнителя, приводящего к повышению поглощения ЭМИ, можно использовать углеродные нанотрубки (УНТ), вводимые в состав материала. Характерные зависимости максимального значения поглощения электромагнитного излучения и частоты от толщины покрытия представлены на рис. 3,б, а частотные зависимости поглощения ЭМИ для различной толщины покрытия на рис. 4,б.

При толщине наносимого на основу радиопоглощающего материала до 0,18 мм поглощения ЭМИ в диапазоне частот от 8 до 18 ГГц практически не происходит.

Из анализа зависимостей на рис. 4 видно, что УНТ оказывают большее влияние на рост поглощения ЭМИ.

Широкополосное многослойное радиопоглощающее покрытие на основе гексагональных ферритов. Для формирования РПП применялся композиционный материал на основе смеси ферритов $BaFe_{12}O_{19}$ и $BaSc_{0,2}Fe_{11,8}O_{19}$. В качестве модельного связующего материала (матрицы) использовался латекс. Соотношение наполнителя и связующего в композиционном материале составляет 60%:40% по массе соответственно. Смесь ферритов выбиралась в пропорции 50%:50%. Напыление покрытия проводилось лакокрасочным методом [7].

Покрытие сформировано из четырех слоев с различным значением диэлектрической проницаемости в каждом слое. Диэлектрическая проницаемость слоев увеличивается с ростом глубины покрытия, т.е. увеличивается по мере прохождения электромагнитной волны вглубь покрытия. Для повышения диэлектрической проницаемости в состав композиционного материала вводились УНТ. Внутренний слой, прилегающий к металлической подложке, сформирован на основе вышеуказанного композита с добавлением УНТ 2% общей массы композита; второй и третий слои сформированы с добавлением 1,5 и 1% соответственно. Наружный слой для улучшения согласования с окружающей средой сформирован без добавления УНТ. Толщина каждого слоя составляет 0,5 мм: общая толщина покрытия 2 мм.

Гексагональные ферриты, применяемые в качестве наполнителя в композите, синтезированы по керамической технологии. На объемных образцах измерялись коэффициенты прохождения, отражения и поглощения ЭМИ материалом. Результаты измерения представлены на рис. 6,а.

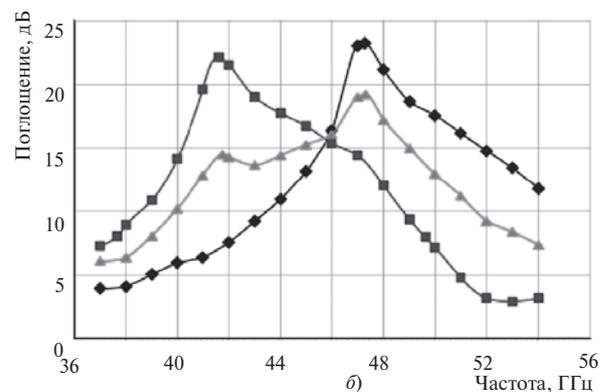
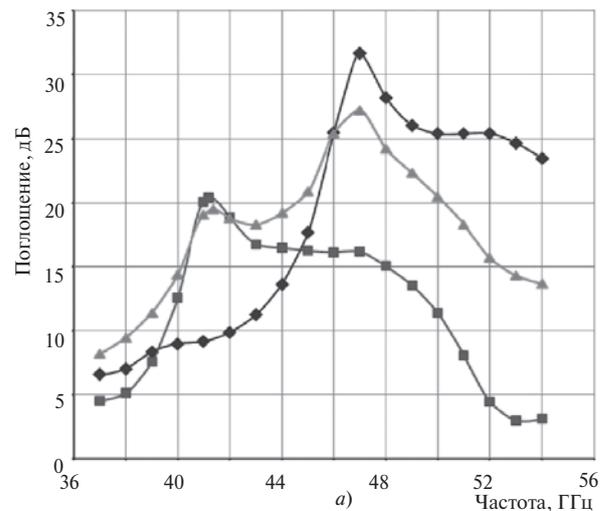


Рис. 6. Частотная зависимость поглощения ЭМИ гексаферритов структуры М-типа, синтезированных по керамической технологии: а – средний размер частиц порошка 200 мкм; б – 4 мкм; ◆ – $BaFe_{12}O_{19}$; ■ – $BaSc_{0,2}Fe_{11,8}O_{19}$; ▲ – $BaFe_{12}O_{19}(1/2)$, $BaSc_{0,2}Fe_{11,8}O_{19}(1/2)$

Порошки гексаферритов, используемые в композиционном материале, при формировании радиопоглощающего покрытия молотились в планетарной мельнице до высокодисперсной структуры. После помола из полученных порошков изготавливались объемные образцы для измерения коэффициентов прохождения, отражения и поглощения материалом ЭМИ. Результаты исследования представлены на рис. 6, б.

Для получения широкополосного радиопоглощающего покрытия применялась смесь ферритов $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ и $\text{BaSc}_{0,2}\text{Fe}_{11,8}\text{O}_{19}$ со связующим в виде латекса. После напыления измерялось значение ослабления ЭМИ при отражении от металлической подложки. Результаты измерения приведены на рис. 7.

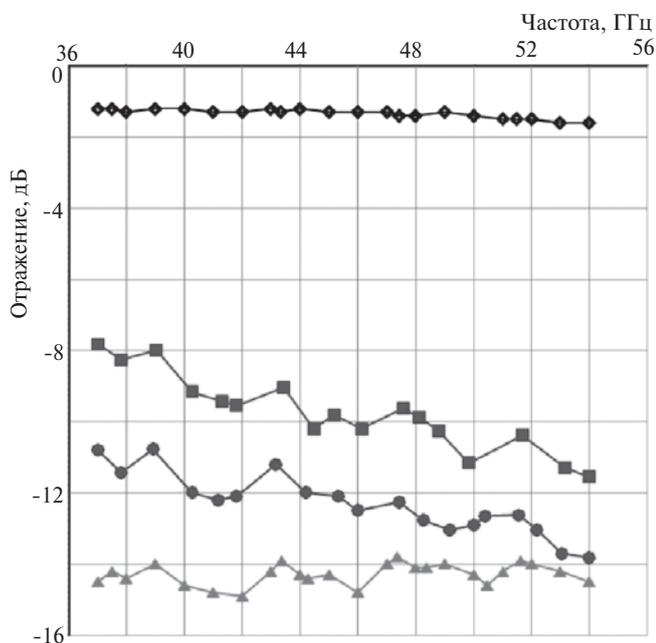


Рис. 7. Частотная зависимость ослабления ЭМИ при отражении от поверхности металлической подложки при нанесенном на подложку радиопоглощающем покрытии: ◆ – отражение ЭМИ от металла; ■ – пленка толщиной 1 мм: 1-й слой – 2% УНТ; 2-й – 1,5% УНТ; ● – пленка толщиной 1,5 мм: 1-й слой – 2% УНТ; 2-й слой – 1,5% УНТ; 3-й – 1% УНТ; ▲ – пленка толщиной 2 мм: 1-й слой – 2% УНТ; 2-й – 1,5% УНТ; 3-й – 1% УНТ; 4-й – 0

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований получены РПП для диапазонов частот 8–28 ГГц и 36–54 ГГц. Показано, что введение в состав композиционного магнитодиэлектрика различных модификаций углерода способствует увеличению поглощения ЭМИ, а также, что УНТ вносят большой вклад в увеличение поглощения ЭМИ.

Путем использования смеси гексаферритов и УНТ создано широкополосное радиопоглощающее

покрытие для диапазона частот 36–54 ГГц, обладающее поглощением в 16 дБ во всем диапазоне указанных частот.

Полученные покрытия могут применяться для уменьшения от помех паразитных электромагнитных колебаний в устройствах электротехники и электроэнергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елсуков Е.П., Розанов К.Н. и др. Влияние формы, химического и фазового состава частиц на основе Fe на СВЧ-характеристики композитов с диэлектрической матрицей. – Журнал технической физики, 2009, т. 79, вып. 4, с. 125–130.
2. Петров В., Николайчук Г. и др. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных наноструктур: получение, свойства применение. – Компоненты и технологии, 2008, №10, с. 147–150.
3. Журавлев В.А., Суслиев В.И. и др. Радиопоглощающие свойства содержащих карбонильное железо композитов на СВЧ и КВЧ. – Исследовано в России, 2010, 035/100608, с. 404–411.
4. Лопатин А.В., Казанцев Ю.Н. и др. Радиопоглотители на основе магнитных полимерных композитов и частотно-селективных поверхностей. – Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, № 9, с. 1176–1184.
5. Петров В.М., Гагулин В.В. Радиопоглощающие материалы. – Неорганические материалы, 2001, т. 37, № 2, с. 135–141.
6. Серебрянников С.В., Чепарин В.П., Румянцев П.А., Еремцова Л.Л. Электродинамические свойства диспергированных гексаферритовых наполнителей и радиопоглощающих покрытий. – Электричество, 2013, № 5, с. 37–40.
7. Серебрянников С.П., Чепарин В.П., Китайцев А.А., Смирнов Д.О. Влияние толщины покрытия с наполнителем в виде высокоанизотропного феррита на величину поглощения электромагнитного излучения. Магнетизм, дальнее и ближнее спин-спиновое взаимодействие. – Сб. трудов XVII Междунар. конф., (Москва–Фирсановка, 20–22 ноября 2009 г.), с. 223–229.

[15.07.13]

Авторы: Серебрянников Сергей Владимирович окончил электромеханический факультет (ЭМФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1975 г. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Влияние электрических полей и модификации полимеров на эксплуатационные свойства материалов электротехнического назначения» в МЭИ. Заведующий кафедрой «Физика и технология электротехнических материалов и компонентов» (ФТЭМК) Научно-исследовательского университета (НИУ) МЭИ.

Румянцев Павел Александрович окончил Институт электротехники МЭИ в 2009 г. Ассистент кафедры ФТЭМК.

Черкасов Анатолий Петрович окончил ЭМФ МЭИ в 1968 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию в МЭИ. Доцент кафедры ФТЭМК.

Еремцова Лариса Леонидовна окончила ЭМФ МЭИ в 1987 г. Ведущий инженер кафедры ФТЭМК.