

# Электродинамические свойства диспергированных гексаферритовых наполнителей и радиопоглощающих покрытий<sup>1</sup>

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

*Исследовано влияние размера частиц порошка гексаферритовых наполнителей на зависимость величины поглощения электромагнитного излучения (ЭМИ) радиопоглощающих покрытий на основе таких наполнителей. Ультрадисперсные порошки гексагонального феррита  $BaSc_{0.2}Fe_{11.8}O_{19}$  получены интенсивным помолом высокоэнергетической планетарной мельнице. Показано, что уменьшение среднего размера частиц порошка до 100 нм приводит к существенному снижению поглощения ЭМИ. Рассмотрена возможность создания радиопоглощающих покрытий на основе ультрадисперсных порошков гексагонального феррита  $BaSc_{0.2}Fe_{11.8}O_{19}$ . Исследованы электродинамические параметры радиопоглощающего покрытия.*

**Ключевые слова:** гексагональные ферриты, ультрадисперсные порошки, магнитные спектры, естественный ферромагнитный резонанс, радиопоглощающее покрытие

В настоящее время постоянно возрастает необходимость обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных систем, работающих в диапазоне 1–40 ГГц, и снижения уровня помех для работы интегральных схем электронных устройств. Известно, что корпуса интегральных схем оказывают заметное влияние на амплитудно-частотные характеристики устройств: помимо изменения формы сигналов происходит смещение основной рабочей частоты. Решение этих проблем для техники, использующей высокие и сверхвысокие частоты, возможно на основе создания и применения новых высокоэффективных радиопоглощающих магнитных материалов (РПМ), которые обладают поглощающими свойствами, присущими полупроводниковым магнитным материалам, и имеют высокие электроизоляционные характеристики. Это открывает возможности улучшения телекоммуникационных систем и обеспечивает расширение функциональности электронных средств. Создание радиопоглощающих материалов и покрытий, способных обеспечивать решение этих проблем, является актуальной задачей.

Здесь наиболее перспективными материалами являются композиты, состоящие из полимерной матрицы и дисперсного наполнителя, в качестве

*The effect the size of hexaferrite filler powder particles has on the electromagnetic radiation absorption capacity of radiowave absorbing coatings made on the basis of such fillers is investigated. Ultradispersed powders of hexagonal ferrite  $BaSc_{0.2}Fe_{11.8}O_{19}$  are obtained by subjecting it to intense grinding in a high-energy planetary-type mill. It is shown that decreasing the average size of powder particles to 100 nm results in an essentially degraded absorption of electromagnetic radiation. The possibility of making radiowave absorbing coatings on the basis of ultradispersed powders of hexagonal ferrite  $BaSc_{0.2}Fe_{11.8}O_{19}$  is considered. The electrodynamic parameters of a radiowave absorbing coating are investigated.*

**Key words:** hexagonal ferrites, ultradispersed powders, magnetic spectra, natural ferromagnetic resonance, radiowave absorbing coating

которого выбираются материалы, обеспечивающие магнитные, диэлектрические или магнитодиэлектрические потери в композите. Одними из таких наполнителей являются гексагональные ферриты (ГФ), применение которых для поглощения ЭМИ базируется на свойственном им явлении естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), в области которого наблюдается повышенное поглощение ЭМИ. Возможность изменения магнитокристаллической анизотропии ГФ путем легирования различными ионами позволяет варьировать свойства композитов в широких пределах, что обеспечивает поглощение ЭМИ в большом частотном диапазоне.

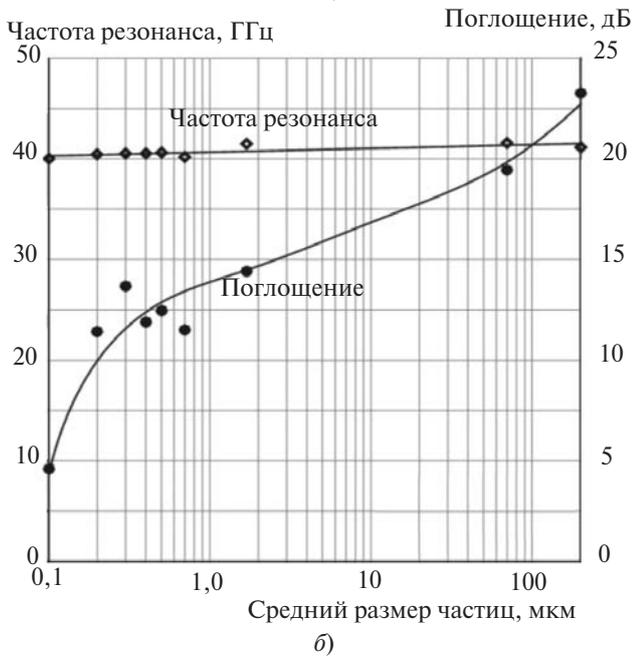
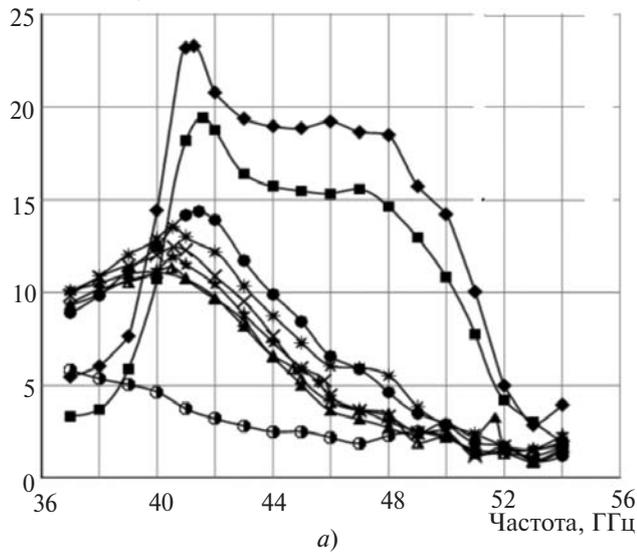
**Исследование свойств наполнителя.** Для создания композита наполнитель используют в виде мелкодисперсного порошка ГФ, одним из способов получения которого является механосинтез в планетарной мельнице. Помол приводит к изменению свойств наполнителя, влияющих на поглощение ЭМИ. В связи с этим нами было исследовано влияние размеров частиц порошка поликристаллических ГФ  $BaSc_{0.2}Fe_{11.8}O_{19}$  на формирование свойств композитных материалов (рис. 1). Наполнители ГФ синтезировались методом керамической технологии при температуре 1360 °С. Интенсивным помолом в высокоэнергетической планетарной мельнице были получены ультрадисперсные ГФ наполнители со средним размером частиц менее

<sup>1</sup> Доклад авторов на Международной конференции в Алуште (сентябрь 2012 г.), оформленный в виде статьи для «Электричества».

100 нм. Дисперсность синтезированных порошков исследовалась на электронном растровом микроскопе.

Синтезированные порошки смешивались с полимерным связующим, и из смеси формовались образцы для исследований. Соотношение компонентов в композиционном материале было выбрано такое: 70% вес. – феррит и 30% вес. – полимерное связующее.

Уменьшение среднего размера частиц ферромагнитного наполнителя оказывает влияние на поглощение ЭМИ при ЕФМР. Интенсивное измельчение ГФ приводит к уменьшению объема частиц. Поглощение, дБ



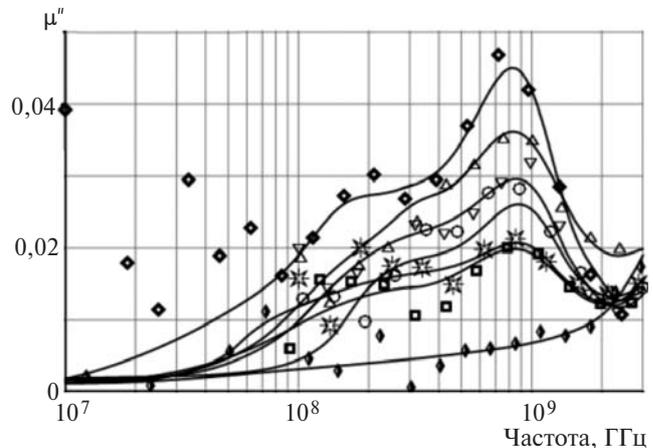
**Рис. 1.** Частотные зависимости поглощения ЭМИ композитов при среднем размере частиц наполнителя (мкм):  $\blacklozenge$  – 200;  $\blacksquare$  – 70;  $\bullet$  – 1,7;  $\blacktriangle$  – 0,7;  $\blacktriangledown$  – 0,5;  $\star$  – 0,4;  $\ast$  – 0,3;  $\triangle$  – 0,2;  $\blacktriangleright$  – 0,1 (a) и зависимости резонансной частоты и поглощения ЭМИ при резонансной частоте в композитах от среднего размера частиц наполнителя (б)

цы, что ведет к снижению мощности поглощаемой энергии ЭМИ, одновременно может влиять на значение частоты резонансного поглощения. С уменьшением размера частиц возрастает вклад в свойства наполнителя поверхности и приповерхностной области частиц, в которых, как известно, часть спинов атомов не совпадает с направлением атомов в объеме частицы и образует угол, который определяется значением константы анизотропии используемого ГФ. Исследование частотной зависимости поглощения ЭМИ композиционными материалами с наполнителями, прошедшими механоактивацию в планетарной мельнице, выявило уменьшение поглощения при естественном ферромагнитном резонансе и смещение резонансной частоты в область более низких частот, что может быть следствием изменения спиновой ориентации в поверхностном слое и на поверхности частиц, а также удельного значения поверхности. В такой зависимости композиционного материала с наполнителем в виде феррита, прошедшего механоактивацию в течение 60 мин (средний размер частиц 50–150 нм) практически отсутствует резонансный пик, соответствующий ЕФМР.

Измерения магнитных спектров в области частот, соответствующих резонансу доменных границ ферромагнитного наполнителя, также выявили уменьшение коэффициента магнитных потерь (рис. 2).

Увеличение удельной поверхности частиц порошкового наполнителя при уменьшении их среднего размера приводит к увеличению плотности системы «ферромагнитный порошок – полимерное связующее» при формовании образцов для измерения или изделий.

**Исследование свойств покрытия.** На основе рассматриваемого ГФ было сформировано пленочное покрытие и исследованы его свойства. При форми-



**Рис. 2.** Частотная зависимость мнимой части магнитной проницаемости композита при среднем размере частиц наполнителя (мкм):  $\diamond$  – 1,7;  $\square$  – 0,7;  $\circ$  – 0,5;  $\triangle$  – 0,4;  $\nabla$  – 0,3;  $\ast$  – 0,2;  $\blacklozenge$  – 0,1

ровании радиопоглощающих покрытий важным параметром, определяющим свойства покрытия, является толщина наносимой плёнки. В связи с этим было исследовано влияние толщины плёнки композиционного материала на основе изучаемого феррита на поглощение ЭМИ и измерены её электродинамические свойства. Плёнки формировались напылением композиционного материала, состоящего из 70% порошка феррита  $BaSc_{0,2}Fe_{11,8}O_{19}$  с размером частиц 40 мкм и 30% латекса. Размер частиц ферритмагнитного наполнителя выбран исходя из соображений технологичности наносимого покрытия. Композит смешивался в ультразвуковой ванне, что обеспечило равномерное распределение частиц феррита в диэлектрической матрице при добавлении дистиллированной воды.

Зависимости поглощения ЭМИ композиционным материалом в частотном диапазоне ЕФМР (36 – 54 ГГц) при различной толщине пленки представлены на рис. 3 и 4. При толщине пленки 1,65 мм среднее значение поглощения в диапазоне частот ЕФМР составляло  $11,5 \pm 0,5$  дБ.

Спектры действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  пленок в диапазоне частот резонанса доменных границ (РДГ) (10 МГц–3 ГГц) при различной толщине пленки показаны на рис. 5 и 6. Значение  $\epsilon'$  синтезированных плёнок при частоте 10 МГц изменяется в пределах от 5,8 до 7,7. Мнимая часть диэлектрической проницаемости для всех пленок имеет одинаковые значения (0,2) и практически не зависит от частоты.

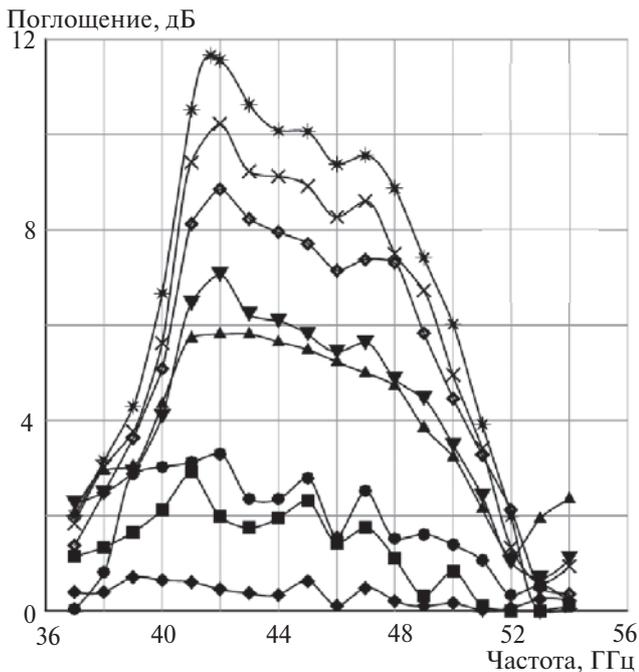


Рис. 3. Частотные зависимости поглощения ЭМИ для синтезированных пленок на основе феррита  $BaSc_{0,2}Fe_{11,8}O_{19}$  при среднем размере частиц наполнителя (мкм):  $\blacklozenge$  – 0,17;  $\blacksquare$  – 0,41;  $\bullet$  – 0,56;  $\blacktriangle$  – 0,77;  $\blacktriangledown$  – 1,06;  $\diamond$  – 1,18;  $\sim$  – 1,46;  $*$  – 1,65

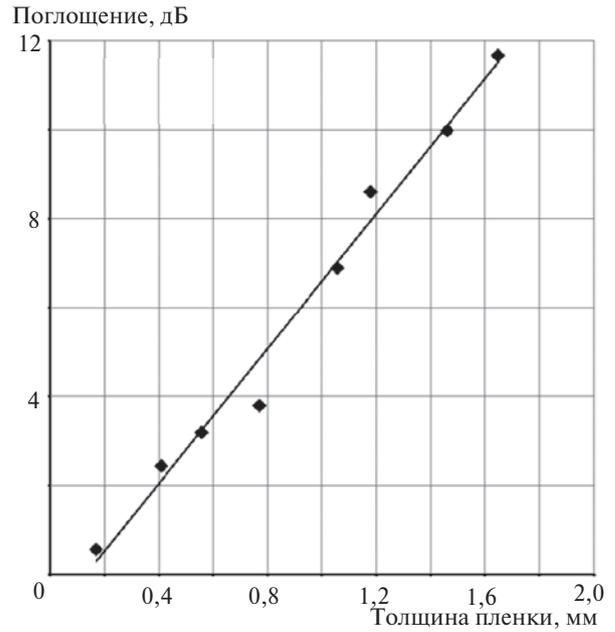


Рис. 4. Зависимость поглощения от толщины пленки при частоте 41,5 ГГц

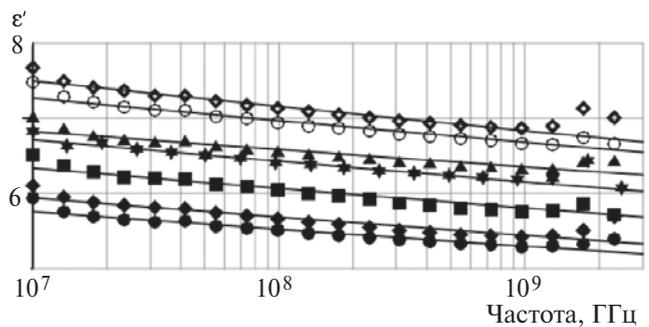


Рис. 5. Частотные спектры действительной части диэлектрической проницаемости пленок с наполнителем – порошком  $BaSc_{0,2}Fe_{11,8}O_{19}$  при среднем размере частиц наполнителя (мкм):  $\blacklozenge$  – 0,45;  $\blacksquare$  – 0,55;  $\bullet$  – 0,82;  $\blacktriangle$  – 1,07;  $*$  – 1,28;  $\diamond$  – 1,54;  $\circ$  – 1,62

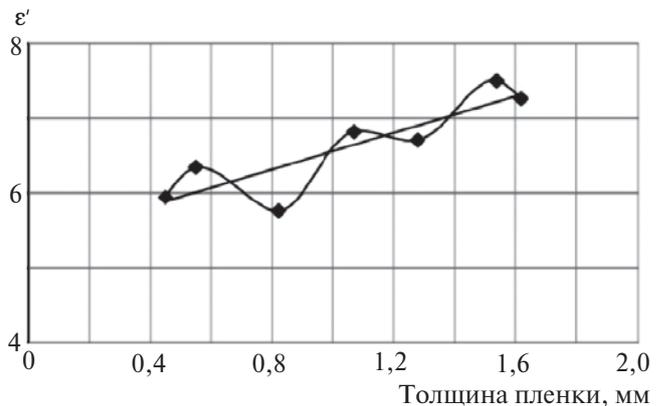


Рис. 6. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости от толщины пленки при частоте 10 МГц

Частотные зависимости действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  частей магнитной проницаемости для сформированных пленок различной толщины приведены на рис. 7.

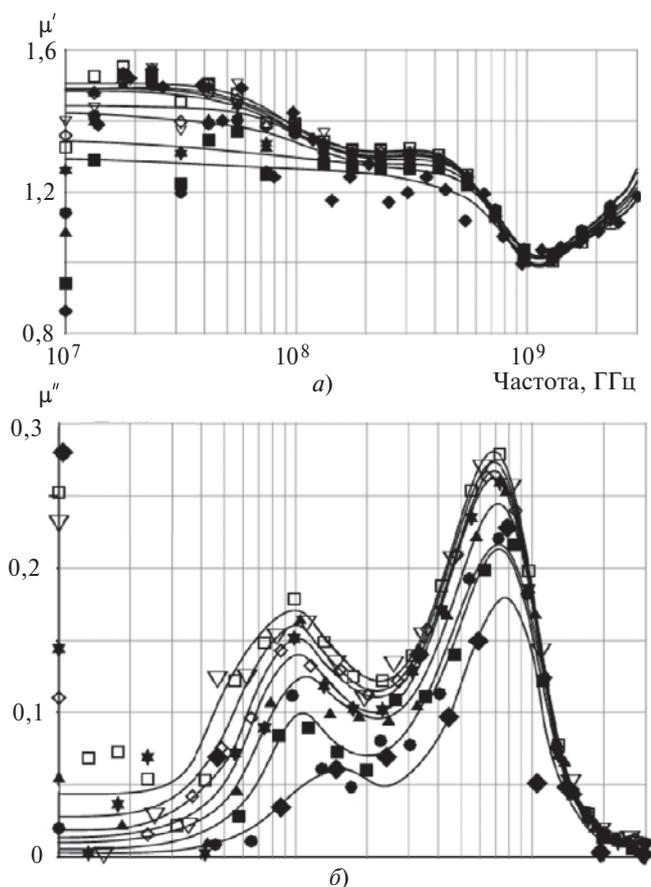


Рис. 7. Частотные спектры действительной (а) и мнимой (б) частей магнитной проницаемости синтезированных пленок на основе порошка  $\text{BaSc}_{0.2}\text{Fe}_{1.8}\text{O}_{19}$  при среднем размере частиц наполнителя (мкм):  $\blacklozenge$  – 0,15;  $\blacksquare$  – 0,49;  $\bullet$  – 0,52;  $\blacktriangle$  – 0,80;  $*$  – 1,01;  $\nabla$  – 1,19;  $\diamond$  – 1,45;  $\square$  – 1,60

Значения  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  и  $\mu''$  синтезированных плёнок нелинейно возрастают с увеличением их толщины. Эта нелинейность может быть связана с образованием различного рода ассоциаций частиц наполнителя при формировании слоёв плёнки.

**Выводы.** 1. Путём интенсивной механической активации в высокоэнергетической планетарной мельнице синтезированы гексагональные наполнители со средним размером частиц менее 100 нм.

2. Исследованы закономерности влияния размеров частиц наполнителя на свойства композитных

материалов. Так, показано, что изменение среднего размера частиц ферромагнитного наполнителя влияет на значение мощности поглощаемого ЭМИ при явлении ЕФМР, а также на коэффициент потерь при резонансе доменных границ в композиционных радиопоглощающих материалах. Уменьшение среднего размера частиц ферромагнитного наполнителя до 100 нм приводит к снижению поглощения ЭМИ при ЕФМР до 5 дБ и существенному уменьшению коэффициента магнитных потерь.

3. При формировании радиопоглощающего покрытия выбор наполнителя необходимо осуществлять по технологичности процесса изготовления покрытия и значению коэффициента поглощения ЭМИ наполнителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. – М.: Иностран. лит-ра, 1958.
2. Крупичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов, т. 2. – М.: МИР, 1976.

[21.01.13]

*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. Зав. кафедрой физики электротехнических материалов и компонентов и автоматизации электротехнических комплексов (ФЭМАЭК) НИУ «МЭИ».*

*Чепарин Владимир Петрович окончил ЭМФ МЭИ в 1962 г. В 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию «Получение и исследование монокристаллов магнитоодноосных ферритов с малыми собственными полями анизотропии». Работал зам. заведующего кафедрой ФЭМАЭК. Скончался в 2012 г.*

*Румянцев Павел Александрович окончил Институт электротехники МЭИ в 2009 г. Ведущий инженер кафедры ФЭМАЭК.*

*Еремцова Лариса Леонидовна окончила ЭМФ МЭИ в 1987 г. Ведущий программист кафедры ФЭМАЭК.*