

Метод формирования материала-поглотителя электромагнитного излучения на основе магнитоуправляемых частиц Fe_3O_4

И. А. Шорсткий, Н. Яковлев

Представлен метод формирования объёмных массивов магнитоуправляемых частиц из оксида железа Fe_3O_4 с помощью вращающегося постоянного магнитного поля (ВМП), для создания материала-поглотителя электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона. Применение установки с вращающимся магнитным полем постоянных магнитов позволило получить композит с плотной упаковкой частиц, в котором реализуется принцип самоорганизации монослоев магнитных частиц. Получены спектры отражения, поглощения и ослабления электромагнитного излучения композитов с объёмным массивом плотноупакованных магнитных частиц из Fe_3O_4 толщиной 3 и 6 мм, с массивами из 15 и 30 плоских монослоёв частиц, соответственно. Представленный метод получения объёмных массивов магнитных частиц из Fe_3O_4 , и установка для его реализации обладают перспективой применения в создании композитных материалов с использованием широко спектра микро и нано частиц.

Ключевые слова: вращающееся магнитное поле, электромагнитное поглощение, композиционный материал, массив частиц, упаковка.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-3-70-79

Введение

Развитие микроэлектроники, радиотехники, микро- и наноэлектромеханических систем требует создания новых видов композитных материалов с заданными свойствами. Это важно для технологий нанесения коллоидных кристаллических и аморфных систем на подложки различных материалов большой площади.

Известно, что материал-поглотитель электромагнитных излучений (ЭМИ) представляет собой тип функционального материала, который способен эффективно поглощать электромагнитное излучение и преобразовывать ее в тепловую энергию. Идеальный материал-поглотитель должен обладать небольшим весом, иметь малую толщину, а также большой коэффициент поглощения в широком спектре частот. Такие факторы, как морфология, геометрия и микроструктура материала, имеют определяющее значение при формировании свойств электромагнитного поглощения. В насто-

ящее время известны материалы-поглотители с различной морфологией, содержащие одномерную (нанопроволоки, наночастицы), двумерную (чешуйки, нанодиски) и трехмерную (трубки, сферы с вискерсами) структуры упаковки частиц [3 – 5].

В данном исследовании представлен новый метод формирования пористых трехмерных массивов на основе управления структурой упаковки частиц вращающимся магнитным полем постоянных магнитов. Формируемые структуры содержат многочисленные поры. В то же время пористая структура с низкой средней плотностью может быть использована в качестве легкого материала для поглощения ЭМИ. Для формирования материала с пористой структурой предложен метод внешнего вращающегося постоянного магнитного поля. Процесс формирования основан на магнитно-дипольном взаимодействии сферических намагничиваемых частиц Fe_3O_4 , что при внешнем воздействии вращающегося постоянного магнитного поля позволяет создавать высокоупорядоченные объёмные массивы.

вы. Находясь внутри постоянного магнитного поля магнитные частицы-диполи ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля и перемещаются при его смещении [6]. На основе этого принципа формируются плоские и объемные массивы частиц с заданной структурой упаковки.

Цель работы — разработка нового метода формирования композитных материалов с пористой структурой из магнитоуправляемых частиц с помощью вращающегося постоянного магнитного поля и определение их спектров отражения, поглощения и ослабления электромагнитного излучения.

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали сферические частицы Fe_3O_4 со средним размером 60 ± 10 мкм (рис. 1). Состав частиц определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 S (Япония).

Подготовку образцов объемных массивов частиц проводили с использованием вращающегося постоянного магнитного поля (ВПМП) на базе разработанной установки, представленной на рис. 1 [7, 8].

С внешней стороны трубки для порошка расположена цилиндрическая насадка, с диаметрально противоположно расположенными в ней двумя постоянными магнитами и переключатель

полюсов одного из магнитов. Постоянные магниты обеспечивают создание внешнего вращающегося магнитного поля вокруг стеклянной трубки. Внутрь трубки загружаются ферромагнитные частицы Fe_3O_4 .

Попадая в трубку частицы улавливаются магнитным полем постоянных магнитов. Благодаря вращению цилиндрической насадки частицы перестраиваются из волокнистой диспергированной структуры в плотно упакованную структуру, формируя упорядоченный массив частиц (рис. 2) [7].

Для получения композитного материала для исследований в массив частиц добавляли парафин в объемном соотношении 1:1. Композицию доводили до температуры плавления парафина и поддерживали до получения однородной массы. После этого, трубку перемещали в зону магнитной насадки, где постоянные магниты обеспечивали создание внешнего вращающегося магнитного поля вокруг трубки. После упорядочения в магнитном поле и достижения необходимой плотной упаковки сферических частиц вращение прекращалось и парафин застывал. Полученный объемный композитный материал извлекали из установки и нарезали на образцы размерами $23 \times 10 \times 3$ и $23 \times 10 \times 6$ мм³. При нарезке выполняли условие совмещения направления вектора магнитного поля диполей постоянных магнитов вдоль длинной стороны образцов.

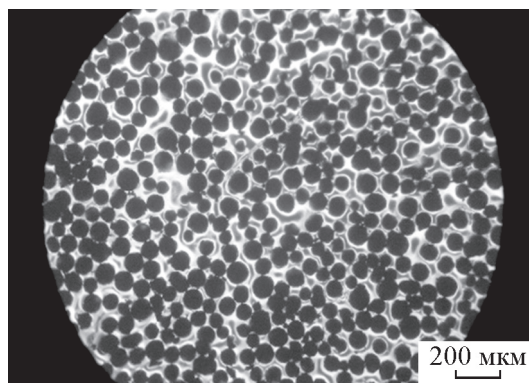
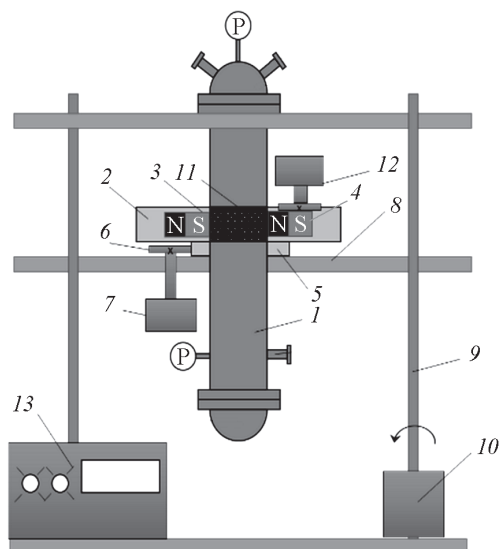


Рис. 1. Установка для формирования объемных массивов на основе принципа вращательного магнитного поля и структура плоского массива частиц. 1 — стеклянная трубка, 2 — цилиндрическая насадка, 3, 4 — постоянный магнит, 5 — зубчатая передача, 6 — зубчатое колесо, 7, 10 — электродвигатель, 8 — платформа, 9 — шпилька, 11 — частицы Fe_3O_4 , 12 — переключатель, 13 — пульт управления.

Fig. 1. Installation for bulk arrays formation on the principle of rotational magnetic field and sample with flat array structure. 1 — glass tube, 2 — cylindrical nozzle, 3, 4 — permanent magnet, 5 — gear transmission, 6 — gear wheel, 7, 10 — electric motor, 8 — platform, 9 — pin, 11 — Fe_3O_4 particles, 12 — switch, 13 — control panel.

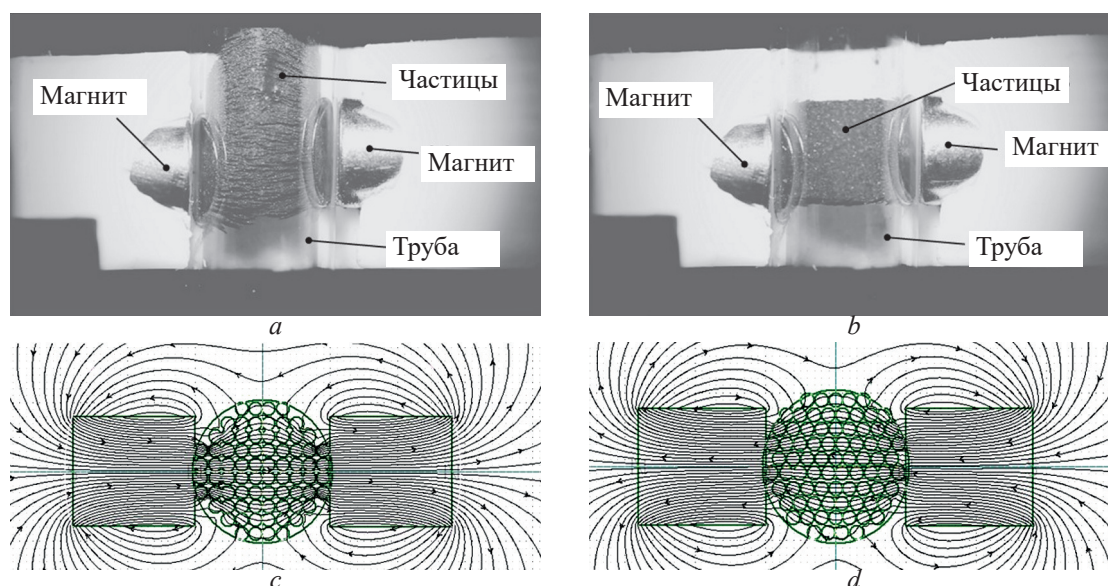


Рис. 2. Визуализация структуры упаковки частиц: *a* — в начальный момент времени без вращения постоянных магнитов, *b* — после 1 оборота вращения цилиндрической насадки установки; *c, d* — моделирование упаковки частиц в программе Vizimag, соответствующие верхним структурам.

Fig. 2. Visualization of particles structure packing: *a* — at the initial time (no rotation of the permanent magnets), *b* — after 1 full turn of the cylindrical nozzle; *c, d* — below is a particle packing simulation via Vizimag software, corresponding to the upper structures.

Кроме того, изготавливали образцы, состоящие из набора 15 и 30 монослоев частиц. Монослой получали нанесением частиц на клейкую ленту. С обратной стороны подносили постоянный магнит и перемещали возвратно поступательно относительно плоскости ленты, равномерно покрывая всю поверхность клейкой ленты частицами (рис. 1). Постоянный магнит удаляли, а сформированный монослой частиц закрепляли второй клейкой лентой с получением структуры типа сэндвича — слой частиц между слоями клейкой ленты.

Намагниченность образцов измеряли вибрационным магнитометром Vibrating Sample Magnetometry (VSM, IMRE, Сингапур) (рис. 3). С

помощью осциллографа и пьезоэлектрических датчиков снимали параметры изгиба пластины с образцами, вибрирующей в регулируемом диапазоне частот. От намагниченного образца данные магнитного потока поступали на принимающие катушки, где возникала индуцированная электромагнитная сила. Кроме того, платформа имела возможность изменять угол наклона ϕ в диапазоне от 0 до 90° .

Морфологию структуры массивов частиц исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JSM 6300 (Jeol).

Спектры отражения и ослабления электромагнитного излучения в частотном диапазоне от 8,0 до 12,0 ГГц определяли с использованием панорамно-

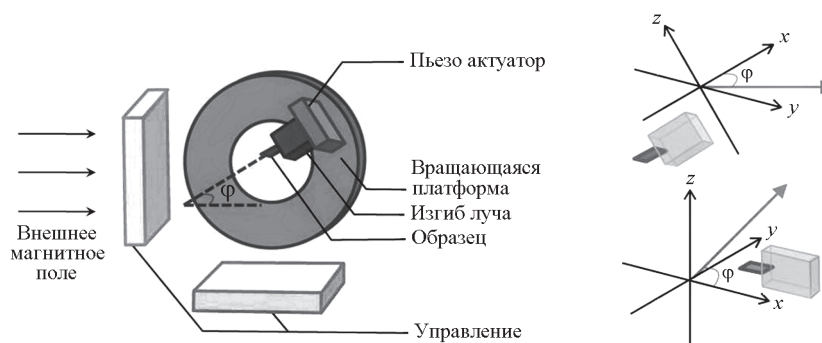


Рис. 3. Схема вибрационного магнитометра и представление азимута угол наклона ϕ .

Fig. 3. Illustration of vibrational magnetometer and azimuth angle ϕ .

го измерителя ослабления и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) Р2-61 с индикатором Я2Р-67.

Коэффициент отражения ЭМИ для заданной частоты и толщины поглотителя рассчитывался по формуле:

$$RL(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|, \quad (1)$$

где Z_0 — сопротивление свободного пространства и Z_{in} — входное сопротивление поглотителя.

Результаты и обсуждение

При анализе рентгенограммы (рис. 4) исследуемых образцов частиц было установлено, что пиковые значения угла $2\theta = 35,40^\circ, 43,0^\circ, 56,9^\circ$ and $62,6^\circ$, соответствуют кристаллическим плоскостям (311), (400), (511), (440) в соответствии со стандартными данными магнетита [9].

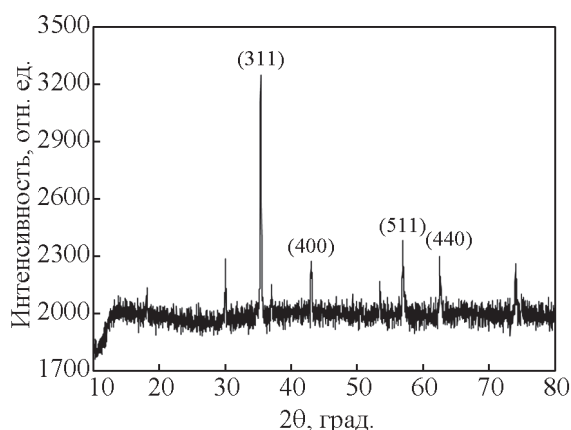


Рис. 4. Рентгенограмма исследуемых частиц Fe_3O_4 .

Fig. 4. XRD patterns of Fe_3O_4 particles.

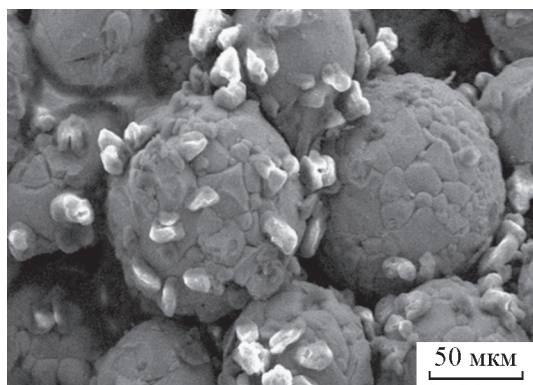


Рис. 5. СЭМ-изображение объемного массива частиц.

Fig. 5. SEM images of bulk arrays.

При наложении вращения насадки с постоянными магнитами вокруг цилиндрической трубки происходит уплотнение сферических частиц Fe_3O_4 с равномерным распределением плотности частиц в объеме массива (рис. 2). Происходит переход от диспергированной волокнистой структуры сферических частиц к плотной упаковке с пористостью $\varepsilon = 0,259$ близкой к пористости гранецентрированной упаковки. Механизм перехода структуры массива подробно описан в работе [7].

На рис. 5 представлено СЭМ-изображение массива частиц Fe_3O_4 сферической формы размером частиц 50 – 60 мкм. Сформированный объемный массив частиц имеет пористую канальную структуру с порами размером приблизительно 15 мкм.

Анализ намагниченности плоских образцов

При анализе намагниченности образцов отмечено, что магнитная анизотропия отчетливо наблюдается в плотных массивах частиц. Зависимость величины продольной и поперечной намагниченности от направления приложенного поля по отношению к плоскости образца представлена на рис. 6. Для плотноупакованного массива насыщение проходит медленнее с ростом угла ϕ и при более высокой величине магнитного поля за счет их дипольного взаимодействия, которое приводит к наблюдаемой анизотропии. Для образца с диспергированной упаковкой частиц, где расстояние между частицами более 10 радиусов частиц, насыщение незначительно зависит от угла намагничивания.

Таким образом, если взаимодействие между частицами действительно существует, то усиливающий эффект проявился бы при внешнем магнитном поле. Данная гипотеза может быть проверена путем моделирования взаимодействия частиц для плотно упакованных массивов на основе теории самосогласованного поля [10] и сравнения этих данных с экспериментом. Метод самосогласованного поля используется для задач, в которых среда содержит случайное поле неоднородностей. Как известно из [11], метод самосогласованного поля базируется на решении задачи об изолированной частице, находящейся в произвольном внешнем поле. В нашем случае достаточно знать величину магнитного момента единичной частицы Fe_3O_4 , которую можно получить только из анализа процесса намагниченности диспергированных массивов (рис. 6). Для более упрощенного перехода к плотноупакованным частицам, изначально моделировали процессы намагничивания для диспергированных массивов.

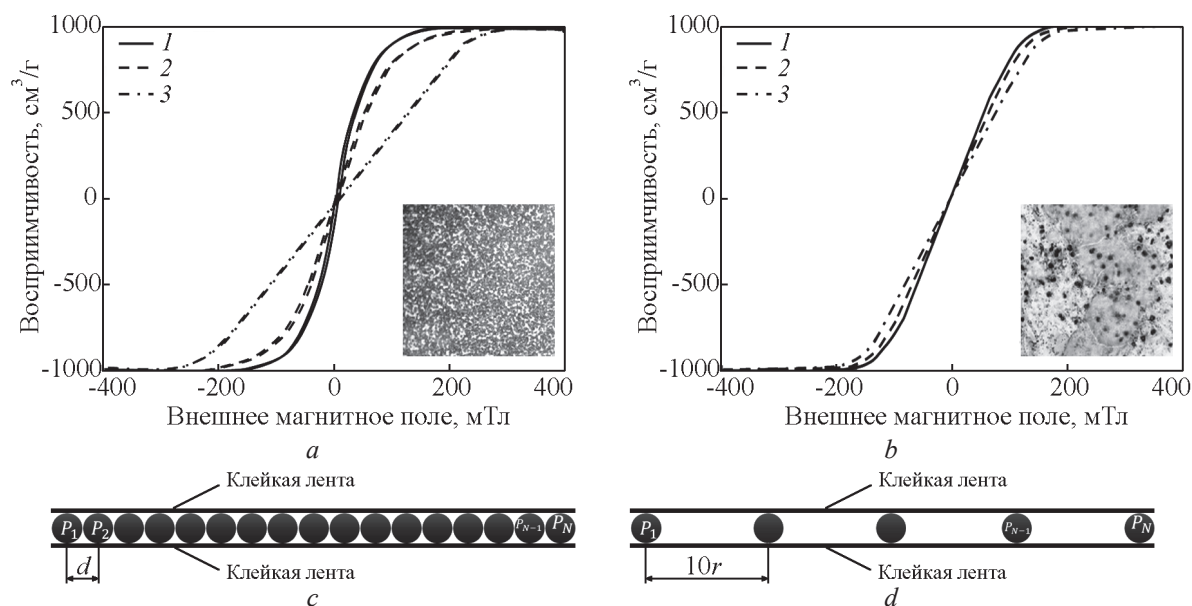


Рис. 6. Кривая намагниченности для: *a* — плотноупакованных, *b* — диспергированных, массивов частиц при азимуте угла 0° (1), 45° (2) и 90° (3); структура расположения частиц P_N в: *c* — плотноупакованных, *d* — диспергированных, плоских образцах.

Fig. 6. Magnetization curve for: *a* — dense packaged particles, *b* — dispersed particle arrays at azimuths of 0° (1), 45° (2), and 90° (3) and the arrangement of P_N particles in: *c* — dense-packed, *d* — dispersed flat samples.

В диспергированных плоских массивах частицы располагались на расстоянии более чем в 10 раз превышающий их радиус, тем самым взаимодействие между частицами было сведено к минимуму. Массив смоделирован на базе отдельной частицы с учетом относительной однородности размеров частиц. При наложении внешнего магнитного поля случайным образом расположенные диполи внутри частицы медленно ориентируются под воздействием внешнего поля. Благодаря изотропному свойству сферической частицы и отсутствию магнитного дипольного взаимодействия между частицами, суммарная намагниченность выбранной частицы всегда параллельна или антипараллельна внешнему полю. Процесс намагничивания может быть смоделирован с использованием доменной стенки нулевой ширины, которая проходит через частицы, увеличивая число диполей, которые ориентируются во внешнем поле. Упрощая систему, моделируемые частицы представляют в кубической форме, а доменная стенка параллельна обоим внешним магнитным полям и двум сторонам куба (рис. 7а).

При любом значении внешнего поля положение доменной стенки всегда минимизирует Зеемановскую энергию выбранной частицы, выраженную как потенциальная энергия намагни-

ченной частицы во внешнем магнитном поле [7]. Прямая и обратная намагниченности выражаются как:

$$\overline{m_f} = \overline{M} 4a^2(a+x),$$

$$\overline{m_r} = -\overline{M} 4a^2(a-x).$$

Следовательно,

$$\overline{B_f} = -\frac{\mu_0 \overline{m_f}}{a^3},$$

$$\overline{B_z} = \frac{\mu_0 \overline{m_r}}{a^3}.$$

Энергия единичной частицы может быть выражена как:

$$E = -\frac{\overline{m_f}}{\overline{B_{ext}} + \overline{B_r}} - \overline{m_r}(\overline{B_{ext}} + \overline{B_f}) =$$

$$= -4a^2 \overline{M} \overline{B_0} x - 32\mu_0 a^2 \overline{M} (a^2 - x^2).$$

Минимизируем энергию

$$dE/dx = 0, \quad x = \frac{\pi \overline{B_{ext}} a}{M \mu_0}.$$

Подставляя x в выражение E :

$$E = \frac{B^2 a^3}{2\mu_0} - 32\mu_0 a^3 M^2,$$

Получаем итоговую намагниченность:

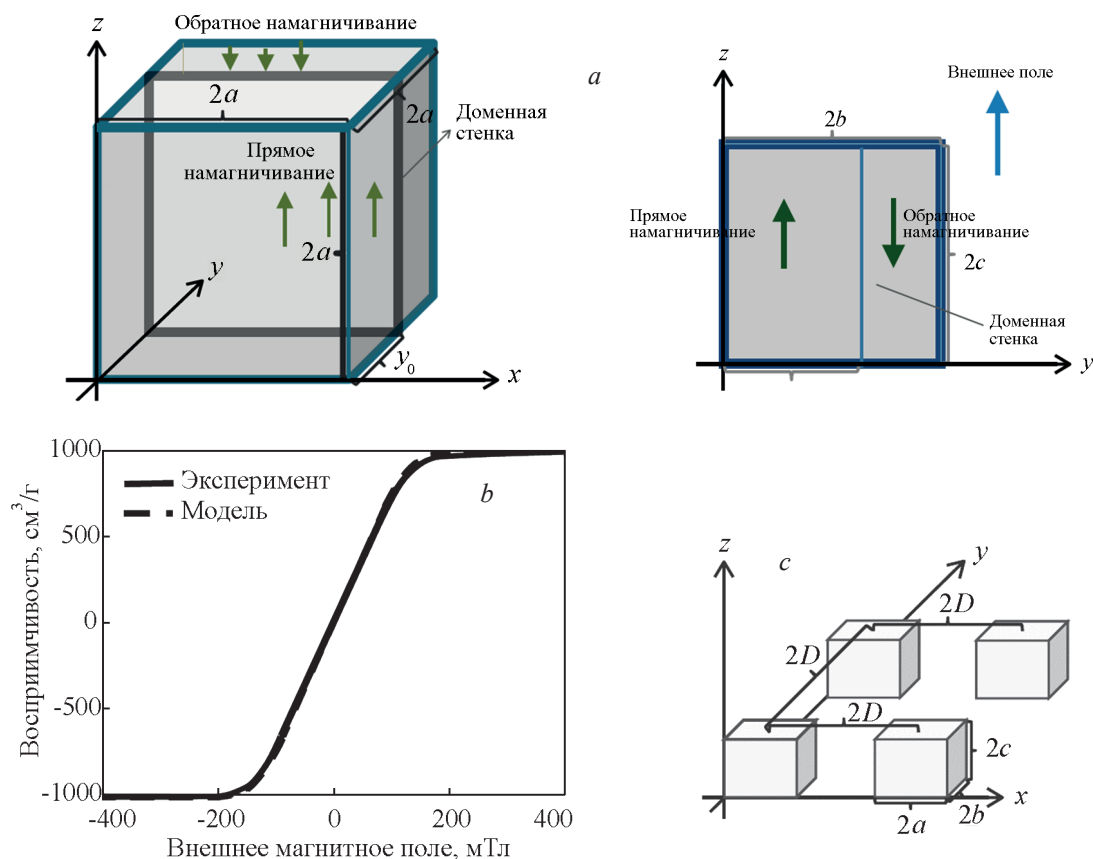


Рис. 7. Схема положения доменной стенки (а), сравнение данных модели и эксперимента (b) и схема массива частиц на плоскости образца (с).

Fig. 7. Scheme of domain wall position (a), comparison between model and experiment (b), and scheme of arrays on sample plane (c).

$$\vec{m}_l = \vec{m}_f - \vec{m}_r = \frac{\vec{B}_{ext} a^3}{2\mu_0}.$$

Приравняв первую производную энергии по отношению к положению стенки домена к нулю, выражение положения доменной стенки в любом внешнем поле до насыщения можно представить как:

$$y_0 = b + \frac{\pi B_{ext} a}{\mu_0 M},$$

где a и b — стороны куба, B_{ext} — величина внешнего магнитного поля; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м); M — вектор намагниченности, А/м.

Из уравнения положения доменной стенки можно выразить намагниченность образца, с точки зрения внешнего магнитного поля. Образец достигает насыщения при $y = a$. Таким образом, угол наклона поля, при котором происходит насыще-

ние образца, можно представить как: $B_{cor} = \mu_0 M / \pi$. После насыщения величина намагниченности частиц становится постоянной. Сравнивая данные построенной модели и эксперимента (рис. 7b), можно отметить, что полученная модель способна точно предсказывать скорость насыщения и точку насыщения для 2D диспергированного массива сферических частиц. Насыщение намагниченности достигается при 120 мТл и показателе плотности магнитного момента 3040 А/м.

Частицы плотного массива способны взаимодействовать друг с другом. С учетом плотности магнитного момента, выражение взаимодействующего поля может быть получено со средним приближением. Выбирается точка на границе полубесконечной плоскости и поле от окружающих частиц дважды интегрируется в полярных координатах от нуля до бесконечности, и от нуля до 2π . С целью упрощения, расстояние между частицами сначала приравнивается к нулю, а далее учитыва-

ется с помощью соотношения a^2/d^2 исходя из кубической геометрии расположения частиц (рис. 7с).

Дальнейшее увеличение величины внешнего поля после насыщения не приводит к численным изменениям, однако, при этом изменяется направление итоговой намагниченности. Это происходит потому, что выравнивание направления намагниченности с внешним направлением поля минимизирует энергию образца.

Взаимодействие между частицами в плотных массивах моделировали с использованием метода самосогласованного поля. Из магнитостатики следует, что диполь – дипольная связь между элементами, в данном случае ферромагнитными сферическими частицами, расположенными на расстоянии $d/2$ друг от друга создают между частицами магнитный момент. Расстояние между образцами из плоских слоев массива частиц во многом превосходят расстояния между частицами, зафиксированными на однослойном образце. По этой причине диполь – дипольная связь, как действующая сила между слоями сэндвича, не рассматривается. Магнитный момент M стремится ориентироваться вдоль суммарной магнитной анизотропии между частицами. Для поворота вектора M из этого направления необходимо затратить энергию для того чтобы сориентировать его по направлению к внешнему полю. Часть энергии внешнего электромагнитного поля рассеивается на то количество сферических тел, которые участвуют в диполь-дипольной связи плоского 2D массива, расположенных на клеевидной поверхности.

Анализ спектра поглощения ЭМИ

Результаты исследований спектра отражения и частотных характеристик ослабления ЭМИ плоских и объемных массивов микросферических частиц Fe_3O_4 анализировали путем сравнения известных литературных данных для частиц Fe_3O_4 [8–10], и полученных экспериментальных данных. На рис. 8 представлено сравнение спектров коэффициента отражения для полученных плотноупакованных массивов частиц и литературных данных для массивов хаотично упорядоченных сферических наночастиц. Максимальное значение $K_{отр}$ получено для образца объемного массива толщиной 6 мм на частоте 12 ГГц и соответствует 3,5 дБ. Уменьшение толщины образца (до 3 мм) приводит к снижению коэффициента отражения. Из данных сравнительного анализа следует, что сформированная структура плотно упакованных частиц обладает лучшими свойствами защиты ЭМИ по сравнению с хаотично упорядоченными частицами.

Результаты измерения коэффициента отражения для образцов плоских массивов, отличающихся количеством слоев представлены на рис. 8б. Максимальное значение зафиксировано на частоте 8,5 ГГц и составляет –5,2 дБ. В отличие от спектров объемных массивов увеличение слоев плоских массивов ведет к уменьшению коэффициента отражения. Характер кривой для 30 монослоев наводит на предположение о возможных пиках на более низких частотах измерения.

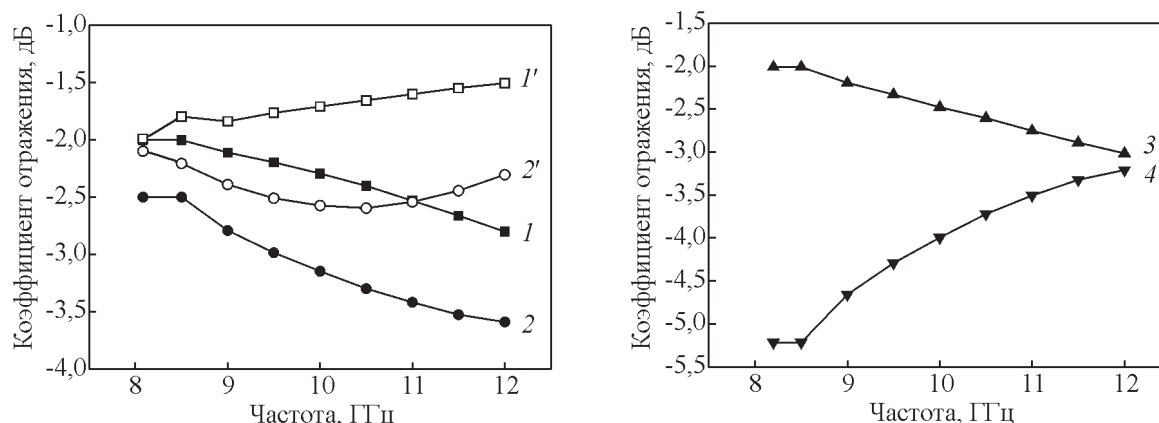


Рис. 8. Спектры отражения ЭМИ: а — объемного плотного упакованного массива частиц Fe_3O_4 толщинами 3 мм (1) и 6 мм (2) и литературных данных для массивов хаотично упорядоченных сферических наночастиц 3 мм (1') и 6 мм (2') [8]; б — плоского массива частиц Fe_3O_4 с 15 (3) и 30 слоями (4) упаковки.

Fig. 8. Microwave reflection loss RL of: a — Fe_3O_4 bulk arrays particles-paraffin wax sample 3 mm (1) and 6 mm (2) thickness versus frequency in comparison with literature data for spherical particles 3 mm (1') and 6 mm (2') [8], b — flat arrays reflection spectra with 15 (3) and 30 number (4) of layers.

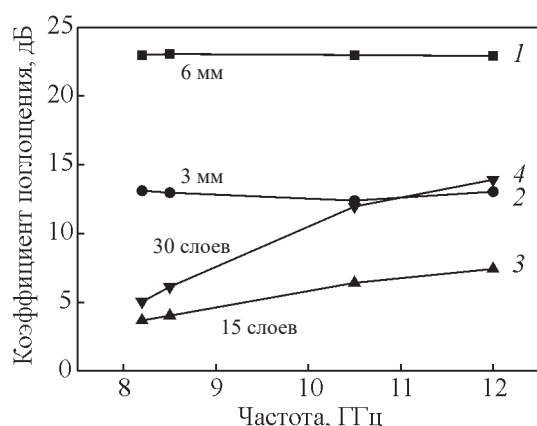


Fig. 9. Частотные характеристики коэффициента ослабления образцов плоских (1, 2) и объемных массивов частиц Fe_3O_4 (3, 4) в диапазоне 8 – 12 ГГц.

Fig. 9. Attenuation coefficient of Fe_3O_4 arrays particles-paraffin wax sample (1, 2) and layer of flat arrays versus (3, 4) frequency in range 8 – 12 GHz.

Увеличение толщины образцов объемных массивов приводит к росту величины ослабления ЭМИ в два раза (рис. 9) с 24 дБ для образца толщиной 6 мм на основе частиц Fe_3O_4 и до 13 дБ для образца толщиной 3 мм в диапазоне 8 – 12 ГГц. Повышение толщины образцов плоских массивов приводит к уменьшению величины ослабления ЭМИ в два раза (рис. 6) с 14 дБ для образца в 15 монослоев на основе частиц Fe_3O_4 и до 7 дБ для образца в 30 монослоев при частоте 12 ГГц.

Выводы

Разработана установка с вращающимся магнитным полем постоянных магнитов для получения композитов с плотной упаковкой частиц, в котором реализуется принцип самоорганизации монослоев магнитных частиц.

Получены плотные объемные массивы сферических частиц из оксида железа Fe_3O_4 с гексагональной структурой упаковки ($\epsilon = 0,259$).

Определены спектры отражения, поглощения и ослабления электромагнитного излучения полученных композиционных материалов. Показано, что они обладают малой коэрцитивной силой и малой остаточной намагниченностью. Магнитная восприимчивость полученного композитного материала зависит от вида упаковки частиц внутри материала и от его геометрических форм.

Материал может быть использован для создания материала-поглотителя электромагнитно-

го излучения сверхвысокочастотного диапазона. Характеристики поглощения ЭМИ можно регулировать путем изменения количества плоских слоев Fe_3O_4 . Используя вращательное магнитное поле можно создавать различные типы поглощающих материалов в широком диапазоне частот, сохраняя при этом механическую прочность, технологичность и удобство использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00448.

Литература

1. Lv H., Liang X., Ji G., Zhang H., Du Y. Porous three-dimensional flower-like Co/CoO and its excellent electromagnetic absorption properties. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, v. 18, p. 9776 – 9783.
2. Li F., Wu J., Qin Q., Li Z., Huang X. Controllable synthesis, optical and photocatalytic properties of CuS nanomaterials with hierarchical structures. *Powder Technology*, 2010, v. 2, p. 267 – 274.
3. Голованов О.А., Макеева Г.С., Ширшиков Д.Н., Горлов Г.Г. Электродинамический расчет микроволновых коэффициентов прохождения волны типа h_{10} через пластину наноструктурного материала на основе 3D-решетки ферромагнитных нанопроволок в волноводе. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*, 2013, т. 28, № 4, с. 162 – 173.
4. Li Y., Pan K., Wang G., Fan N., Miao X. Synthesis and photoluminescence properties of perovskite KMgF_3 . *Journal of Materials Research*, 2011, v. 22, p. 2867 – 2870.
5. Серебрянников С.В. Румянцев П.А., Черкасов А.П., Еремцова Л.Л. Магнитодиэлектрические поглотители СВЧ-излучения на основе ферромагнитных соединений. *Электричество*, 2013, № 11, с. 36 – 40.
6. Zhang X.F., Dong X.L., Huang H., Lv B., Lei J.P. Microstructure and microwave absorption properties of carbon-coated iron nanocapsules. *Choi. J. of Physics D: App. Ph.* 2017, v. 7, p. 5383 – 5388.
7. Шорсткий И.А., Савенков К.Ю. Самоочищающийся фильтр на основе магнитоуправляемых частиц. *Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер.: Процессы и аппараты пищевых производств*, 2017, № 4, с. 20 – 26.
8. Шорсткий И.А. Динамическое фильтрующее устройство. Патент РФ № 2544695, 2013.
9. Jian X., Wu B., Wei Y., Dou S.X., Wang X., He W., Mahmood N. Facile synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCs}$ composites and their enhanced microwave absorption properties. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, v. 9, p. 6101 – 6109.
10. Parisi G., Zamponi F. Mean-field theory of hard sphere glasses and jamming. *Reviews of Modern Physics*, 2010, v. 82, iss. 1, p. 789 – 845.

11. Канаун С.К. Метод самосогласованного поля в задаче об эффективных свойствах упругого композита. Прикл. мех. и тех. физ., 1975, № 4, с. 194 – 200.
12. Du Y., Liu W., Qiang R., Wang Y., Han X., Ma J., Xu P. Shell thickness-dependent microwave absorption of core-shell $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ composites. ACS applied materials & interfaces. 2014, v. 15, 12997 – 13006.
13. Hou Y., Yuan H., Chen H., Shen J., Li L. Controlled fabrication and microwave absorbing mechanism of hollow $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ microspheres. Science China Chemistry, 2017, v. 6, p. 740 – 747.
14. Shorstkii I., Yakovlev N. Synthesis of magnetically controlled Fe_3O_4 composites and their enhanced microwave absorption properties. Mater. Res. Express. 2019, v. 6, p. 046104.
- SVCh-izlucheniya na osnove ferrimagnitnykh soyedineniy [Magnetodielectric microwave radiation absorbers on the basis of ferrimagnetic compounds]. *Electrichestvo — Electricity*, 2013, no. 11, pp. 36 – 40.
6. Zhang X.F., Dong X.L., Huang H., Lv B., Lei J.P., Choi C.J. Microstructure and microwave absorption properties of carbon-coated iron nanocapsules. J. of Physics D: App. Ph. 2017, vol. 7, pp. 5383 – 5388.
7. Shorstkii I.A., Savenkov K.Yu. Samoochishchayushchysya filtr na osnove magnitupravlyaemykh chastits [Self-cleaning filter based on magnetically controlled particles]. *Nauchny zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv — Sci. J. ITMO. Processes and Food Production Equipment*, 2017, no. 4, pp. 20 – 27 (in Russ.).
8. Shorstkii I.A. *Dinamicheskoye filtruyushcheye ustroystvo dlya ochistki zhidkikh i gazoobraznykh veshchestv* [Dynamic filtering device for cleaning liquid and gaseous substances]. Pat. RF 2544695, 2013.
9. Jian X., Wu B., Wei Y., Dou S.X., Wang X., He W., Mahmood N. Facile synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GCs}$ composites and their enhanced microwave absorption properties. ACS applied materials & interfaces, 2016, vol. 9, pp. 6101 – 6109.
10. Parisi G., Zamponi F. Mean-field theory of hard sphere glasses and jamming. Reviews of Modern Physics, 2010, vol. 82, iss. 1, pp. 789-845.
11. Kanaun S.K. Metod samosoglasovannogo polya v zadache ob effektivnykh svoystvakh uprugogo kompozita [The self-consistent field method in the problem of the effective properties of an elastic composite]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1975, no. 4, pp. 194 – 200 (in Russ.).
12. Du Y., Liu W., Qiang R., Wang Y., Han X., Ma J., Xu P. Shell thickness-dependent microwave absorption of core-shell $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ composites. ACS applied materials & interfaces. 2014, vol. 15, pp. 12997 – 13006.
13. Hou Y., Yuan H., Chen H., Shen J., Li L. Controlled fabrication and microwave absorbing mechanism of hollow $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}$ microspheres. Science China Chemistry, 2017, vol. 6, pp. 740 – 747.
14. Shorstkii I., Yakovlev N. Synthesis of magnetically controlled Fe_3O_4 composites and their enhanced microwave absorption properties. Mater. Res. Express, 2019, vol. 6, p. 046104.

Reference

1. Lv H., Liang X., Ji G., Zhang H., Du Y. Porous three-dimensional flower-like Co/CoO and its excellent electromagnetic absorption properties. ACS applied materials & interfaces. 2015, vol. 18, pp. 9776 – 9783.
2. Li F., Wu J., Qin Q., Li Z., Huang X. Controllable synthesis, optical and photocatalytic properties of CuS nanomaterials with hierarchical structures. Powder Technology, 2010, vol. 2, pp. 267 – 274.
3. Golovanov O.A., Makeeva G.S., Shirshikov D.N., Gorlov G.G. Elektrodinamichesky raschet mikrovolnovykh koeffitsiyentov prokhozheniya volny tipa h10 cherez plastinu nanostrukturnogo materiala na osnove 3D-reshetki ferromagnitnykh nanoprovolok v volnovode [Electrodinamic calculation of microwave transmission coefficients of mode h10 through slab of nanostructured material based on the 3D-array of ferromagnetic nanowires]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-Matematicheskaya Nauki — University proceedings. Volga region. Physical and Mathematical sciences*, 2013, no. 4, pp. 162 – 173 (in Russ.).
4. Li Y., Pan K., Wang G., Fan N., Miao X. Synthesis and photoluminescence properties of perovskite KMgF_3 . Journal of Materials Research, 2011, vol. 22, pp. 2867 – 2870.
5. Serebryannikov S.V., Rumyantsev P.A., Cherkasov A.P., Eremcova, L. L. Magnitodielektricheskiye poglotiteli

Статья поступила в редакцию — 29.04.2019 г.
после доработки — 15.08.2019 г.
принята к публикации — 19.08.2019 г.

Шорсткий Иван Александрович — ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» (350004, Краснодар, ул. Московская, 2), кандидат технических наук, доцент, специалист в области электрофизических методов воздействия и магнетизма. E-mail: i-shorstky@mail.ru.

Яковлев Николай — Advanced Characterisation and Instrumentation (ACI) Department, Institute of Materials Research and Engineering (A*STAR), Singapore, специалист в области магнетизма и новых материалов. E-mail: niko-y@imre.a-star.edu.sg.

Method of absorbing material formation based on magnetically controlled Fe₃O₄ particles

I. A. Shorstkii, N. Yakovlev

This paper presents a bulk arrays formation method based on magnetically controlled Fe₃O₄ particles based on a rotational magnetic field (RMF), followed by the production of an absorbing material of electromagnetic radiation in the microwave range. The use of RMF laboratory setup with permanent magnets made it possible to obtain a composite material with dense particles packing, in which the principle of self-organization of monolayers of forming objects is implemented. Reflection, absorption and attenuation spectra of electromagnetic radiation were obtained for composites from a bulk array with dense packing of Fe₃O₄ particles with thicknesses of 3 and 6 mm, and from flat arrays with a set of 15 and 30 flat particle monolayers. Presented method of absorbing material formation based on magnetically controlled Fe₃O₄ particles and the installation have the prospect of being used in the processes of making composite materials for electromagnetic radiation protection using a wide range of materials of micro and nanoparticles.

Keywords: rotating magnetic field, absorption, composite material, microwave, array, packaging.

Shorstkii Ivan — Kuban State University of Technology (2, Moskovskaya street, Krasnodar, Russia, 350004), Dr. Sci. (Eng), senior lecturer of Technological equipment and life-support systems department, specialist in the field of new physical treatment methods and magnetism. E-mail: i-shorstky@mail.ru.

Yakovlev Nikolai — Institute of Materials Research and Engineering (A*STAR, Singapore), Advanced Characterisation and Instrumentation (ACI) department, specialist in the field of magnetism and new materials. E-mail: niko-y@imre.a-star.edu.sg.