

Высокочастотные магнитные свойства 3D нанокompозитов с учетом их внутренней структуры

Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, Е.А. Кузнецов, М.А. Уймин, Ю.В. Корх

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование распространения электромагнитных волн в 3D нанокompозитах, содержащих наноразмерные сферические частицы железа, помещенных в эпоксидную матрицу. Композиты имеют неоднородную внутреннюю структуру, что обусловлено процессами агрегации, приводящими к образованию в среде объектов несферической формы и кластеров, усиливающимися при добавлении в нанокompозит углеродных нанотрубок. Показано, что данные факторы оказывают существенное влияние на высокочастотные магнитные параметры таких сред, в частности на соотношение между частотой и полем ферромагнитного резонанса, ширину и форму резонансной линии, а следовательно, и на характеристики распространяющихся в нанокompозитах волн, определяемые при микроволновых измерениях. Также установлено, что диссипация мощности электромагнитных волн усиливается по мере увеличения концентрации железа в композите, причем она резко возрастает при добавлении малого количества углеродных нанотрубок. Данные материалы могут использоваться в качестве радиопоглощающих материалов, а также при создании микроволновых устройств, управляемых постоянным магнитным полем.

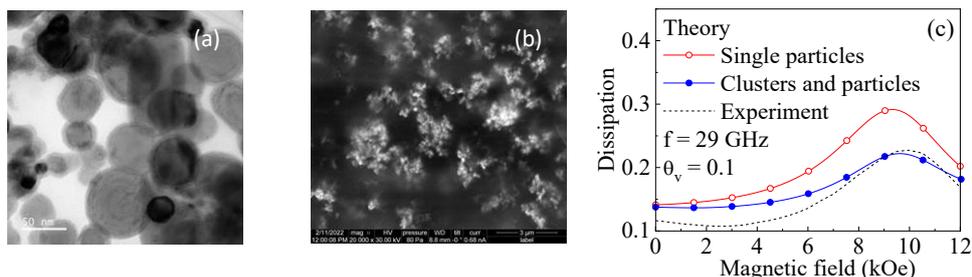


Рисунок 1 – Изображения внутренней структуры 3D нанокompозита (a), (b); доля поглощенной мощности (c).

Публикация:

1. [Electromagnetic waves attenuation in composite with Fe nanoparticles](#) / D.V. Perov, E.A. Kuznetsov, A.B. Rinkevich, O.V. Nemytova, M.A. Uimin, A.S. Konev. – Текст: непосредственный // J. Magn. Magn. Mater. — 2023. — V. 588. — 171459.
2. [Interaction of microwaves with nanocomposites containing Fe particles](#) / D.V. Perov, E.A. Kuznetsov, A.B. Rinkevich, O.V. Nemytova, M.A. Uimin. – Текст: непосредственный // Photonics Nanostruct.: Fundam. Appl. — 2024. — V. 58. — 101214.
3. [Scanning probe microscopy and microwave phenomena in composite containing iron nanoparticles and carbon nanotubes](#) / Y.V. Korkh, M.O. Ryabukhin, E.A. Kuznetsov, D.V. Perov, O.V. Nemytova, A.S. Klepikova, A.B. Rinkevich, M.A. Uimin. – Текст: непосредственный // Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct. — 2024. — Т. 32. — С. 817—827.
4. [Microwaves in ferromagnetic composites Fe/Epoxy with aggregates of nanoparticles: Theory and experiment](#) / D.V. Perov, Y.V. Korkh, E.A. Kuznetsov, O.V. Nemytova, A.B. Rinkevich, M.A. Uimin, A.S. Konev. – Текст: непосредственный // Photonics Nanostruct.: Fundam. Appl. — 2024. — V. 62. — 101311.
5. [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686436 Российская Федерация. MuCompClustH: № 2024686221: заявлено 08.11.24: опубликовано 08.11.24, Бюл. №11 / Перов Д.В.; правообладатель ФГБУН ИФМ УрО РАН — 1 с.](#)

Работа выполнена по теме шифр «Спин».

Актуальность исследования: интерес к созданию 3D нанокompозитных ферромагнитных материалов, относящихся к металлодиэлектрическим структурам, а также разработке теоретических моделей для описания их свойств, обусловлен перспективами их практического использования в качестве радиопоглощающих материалов и для создания элементов высокочастотных радиотехнических устройств, управляемых постоянным магнитным полем.

Цель нашего исследования: построить теоретическую модель, устанавливающую соответствие между характеристиками электромагнитных волн в образцах 3D нанокompозитов и учитывающую выявленные экспериментально структурные особенности внутреннего строения такого рода материалов.

Задачи исследования:

1) Определить особенности внутреннего строения 3D нанокompозитов; 2) Выполнить экспериментальные исследования процессов взаимодействия электромагнитных волн с образцами нанокompозитов; 3) Построить теоретическую модель для описания волновых процессов в ферромагнитных композитных средах, учитывающую структурные особенности их внутреннего строения.

Объект исследования: образцы ферромагнитных 3D нанокompозитов, полученных путем интегрирования порошка из наноразмерных сферических частиц железа, а также углеродных нанотрубок, в полимерную матрицу из эпоксидной смолы, различающиеся содержанием железа.

Методы исследования: определение внутренней структуры 3D нанокompозитов с использованием методов просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, а также атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии, экспериментальные исследования с использованием измерительных волноводов, работающих в микроволновом диапазоне частот, создание теоретической модели и выполнение численных расчетов (теоретическая электродинамика сплошных сред, теория волновых процессов в структурно неоднородных средах, теория эффективных сред).

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, выполнение и обработка результатов экспериментальных исследований, создание теоретической модели, проведение расчётов, анализ результатов исследований, подготовка текстов статей, создание программ для ЭВМ.

1. Определена внутренняя структура 3D нанокompозитных материалов.

Выполнены исследования внутренней и поверхностной структуры образцов нанокompозитов с использованием методов электронной, атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии. Было определено, что значительная доля сферических частиц в нанокompозите вовлечена в процесс агрегации, приводящей к образованию кластеров. Причем доля кластеризованных частиц возрастает по мере увеличения содержания железа в образце. Кроме того, показано, что добавление малого количества углеродных нанотрубок в состав нанокompозита приводит к заметному увеличению неоднородности внутренней структуры среды, способствует аккумуляции вблизи них наночастиц железа, стимулируя процессы кластеризации.

2. Выполнены экспериментальные исследования процессов взаимодействия электромагнитных волн с образцами нанокompозитов.

Измерены частотные и полевые зависимости коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн в диапазоне частот 26-38 ГГц и в интервале значений напряженности поля намагничивания 0-12 кЭ. На основании данных, полученных в нулевом магнитном поле, были построены частотные зависимости вещественных и мнимых частей комплексных диэлектрических проницаемостей нанокompозитов. Показано, что они не могут быть описаны формулой Коула-Коула.

Было определено, что доля поглощенной в среде мощности возрастает по мере увеличения содержания железа в нанокompозите. Кроме того, добавление в нанокompозит с частицами железа малого количества углеродных нанотрубок (1.5 % массовой доли) приводит к значительному (примерно в 4 раза) возрастанию диссипации.

3. Разработана теоретическая модель для описания волновых процессов в ферромагнитных 3D нанокompозитах.

Для интерпретации результатов микроволновых измерений, выполненных при намагничивании композитных сред, разработана теоретическая модель, описывающая высокочастотные магнитные свойства 3D нанокompозитных сред, в которых могут содержаться несколько типов ферромагнитных частиц, форма которых аппроксимируется эллипсоидами общего вида с произвольными соотношениями длин полуосей. При этом учитываются следующие факторы: наличие в среде одного или нескольких типов частиц, различная, в том числе случайная, ориентация частиц в композите относительно внешнего магнитного поля, существование скоплений магнитных частиц (кластеров), внутри которых объемная доля ферромагнитной фазы существенно больше, чем во всей композитной среде в целом. В рамках данной модели, высокочастотные магнитные свойства композитной среды описываются тензором магнитной проницаемости Полдеровского типа, который затем используется при анализе волновых процессов в такого рода средах.

Результаты численного моделирования, полученные с использованием специально разработанных программ для ЭВМ, показали, что для получения хорошего соответствия между теоретическими и экспериментальными полевыми зависимостями коэффициентов отражения, прохождения и диссипации необходимо учитывать наличие в нанокompозитах частиц несферической формы и кластеров, возникающих при агрегации исходных сферических частиц. Кроме того, было показано, что наблюдаемое увеличение коэффициентов прохождения в сильных магнитных полях не является следствием наличия низкополевого поглощения в рассматриваемых нанокompозитах.

Выводы:

Ферромагнитные 3D нанокompозитные материалы, полученные путем интегрирования порошка из наноразмерных сферических частиц железа, а также углеродных нанотрубок, в полимерную матрицу из эпоксидной смолы, имеют неоднородную внутреннюю структуру вследствие образования в среде объектов несферической формы и кластеров, возникающих при агрегации исходных сферических частиц. Это оказывает существенное влияние на высокочастотные магнитные параметры таких сред, в частности на соотношение между частотой и полем ферромагнитного резонанса, ширину и форму резонансной линии, а следовательно, и на характеристики распространяющихся в нанокompозитах электромагнитных волн, определяемые при микроволновых измерениях.

Рассматриваемые нанокompозитные материалы являются перспективными с точки зрения их возможного использования в качестве радиопоглощающих материалов и для создания элементов высокочастотных радиотехнических устройств, управляемых постоянным магнитным полем.