

МИКРОВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА КОМПОЗИТОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ ЖЕЛЕЗА

А. Б. Ринкевич^{*}, *Д. В. Перов*^{**}, *Е. А. Кузнецов*^{***}, *М. А. Уймин*^{****}

*Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
620108, Екатеринбург, Россия*

Поступила в редакцию 25 ноября 2025 г.,
после переработки 24 февраля 2026 г.
Принята к публикации 25 марта 2026 г.

Изучены зависимости коэффициентов прохождения и отражения микроволн для композитов, содержащих наночастицы железа в диэлектрической матрице, от частоты волны и от внешнего магнитного поля. Измерения выполнены на частотах от 26 до 38 ГГц. Рассчитана диссипация микроволновой мощности в образцах. Показано, что при малых концентрациях частиц образцы представляют собой диэлектрики с потерями. При больших концентрациях частиц, но все же значительно меньших порога перколяции, действительная часть волнового числа при измерениях в магнитном поле примерно равна мнимой части и в отношении электромагнитных характеристик композиты приобретают некоторые свойства проводящих сред. Выполнены оценки глубины проникновения микроволн в композиты и установлены условия, при которых важна интерференция волн внутри образца.

Ключевые слова: композиты, ферромагнитные наночастицы, микроволны, коэффициенты отражения и прохождения, глубина проникновения, поглощение мощности

DOI: 10.31857/S0044451026050044

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие электродинамики композитных материалов вызвано как существованием принципиальных фундаментальных проблем, так и многими перспективными приложениями. Материалы с сильным поглощением электромагнитных волн, а также, наоборот, с малым поглощением, востребованы в технике микроволновых устройств, в конструировании антенн, устройств 5G-коммуникаций, в защите от внешних излучений. Актуальна проблема создания эффективных радиопоглощающих материалов [1, 2]. Для всех этих целей находят применение наноструктурные и композитные материалы [3]. В композитных материалах с большим поглощением применяются микро- или наночастицы ферромагнитных металлов и сплавов [4, 5]. Недавно был предложен состав из частиц железа, MoS₂ и час-

тиц графита, позволяющий создавать тонкие экраны [6]. Распространение электромагнитных волн в композитах, содержащих чешуйки сплава файнмет, изучено в [7]. Часто используются порошковые материалы из частиц карбонильного железа, кобальта, сплавов FeNi [8–11].

Для расчета распространения электромагнитных волн в композитной среде требуется знать эффективные диэлектрическую и магнитную проницаемости. Диэлектрическая проницаемость может быть измерена экспериментально или рассчитана, если известны проницаемости и концентрация компонентов композита [12]. Значительное внимание в литературе уделено определению магнитной проницаемости композитов. В [13] введен эффективный размагничивающий фактор для системы магнитных частиц и развит метод расчета магнитной проницаемости. Подобный метод расчета применен в [14]. Динамическая магнитная проницаемость композита в диэлектрической матрице в условиях ферромагнитного резонанса (ФМР) рассчитана в [15]. Влияние эффективного размагничивающего фактора, а также присутствие кластеров частиц учтены в [16, 17] при расчете кривой намагничивания

* E-mail: rin@imp.uran.ru

** E-mail: peroff@imp.uran.ru

*** E-mail: kuzeag@imp.uran.ru

**** E-mail: uimin@imp.uran.ru

композита и петли гистерезиса. Вопросы получения минимального значения коэффициента отражения от композита и согласования импедансов сред рассмотрены в [18].

Распространение волн в намагниченных средах детально рассмотрено в монографии [19]. Исследование распространения волн в композите, содержащем проводящие ферромагнитные частицы в диэлектрической матрице, проведено в условиях ФМР в [20, 21]. В [21] уделено внимание влиянию концентрации частиц на свойства композита. Явления ферромагнитного резонанса и антирезонанса (ФМАР) экспериментально и теоретически изучены в [22] для композитов с ферромагнитными чешуйками и в [23] для композитов со сферическими частицами. Влияние магнитного поля на поглощение в композитах рассмотрено в [24] с применением методики, в которой изменяется частота волны, а магнитное поле поддерживается постоянным. Установлено, что обнаруженное там раздвоение пика потерь в магнитном поле связано со случайной ориентацией магнитных частиц в форме чешуек. Действие магнитного поля на поглощение микроволн и на коэффициент отражения исследовано в [25] для частиц карбонильного железа, помещенных в диэлектрическую матрицу. ФМР в композите с сильно анизотропными магнитными частицами, случайным образом ориентированными в композите, изучен в [26]. Коэффициент рефракции микроволн в композите с чешуйками из сплава файнмет исследован экспериментально в [27].

Выбор материала диэлектрической матрицы оказывает существенное влияние на поглощающие свойства композита [28]. В качестве диэлектрической матрицы нередко выбираются эпоксидная смола [29] или парафин [30]. Обзор технологии радиопоглощающих материалов для микроволнового диапазона приведен в [31]. Структурное состояние ферромагнитных частиц и образование кластеров из них также значительно влияет на электромагнитные характеристики [13, 32]. При измерениях электромагнитных характеристик образец часто помещается в прямоугольный волновод [7, 33, 34].

В настоящей статье выполнено экспериментальное исследование электродинамических характеристик композитов, содержащих сферические частицы железа при концентрациях, заметно меньших порога перколяции. Выполнены измерения модулей коэффициентов прохождения и отражения на частотах от 26 до 38 ГГц, соответствующих верхней части сантиметрового и нижней части миллиметрового диапазонов длин волн. Рассчитаны зависимости

от магнитного поля действительной и мнимой частей волнового числа и диссипации мощности, проведено сопоставление расчета и эксперимента. Выполнены оценки глубины проникновения электромагнитного поля в композит.

2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ

Порошок сферических наночастиц железа был приготовлен газофазным методом. Железная капля массой около 1 г нагревалась высокочастотным электромагнитным полем до температуры 2000 °С, образующиеся пары железа конденсировались в потоке аргона. Для приготовления композита в качестве матрицы использована эпоксидная смола марки ЭДП (комплект 10:1), изготовленная по ТУ 2385-024-75678843-2010 с аминным отвердителем. Смешивание смолы, пластификатора и порошка Fe осуществлялось в пробирке. Смесь сначала подвергалась ультразвуковой обработке тонким активатором 4 раза длительностью по 10 с. После этого добавлялся отвердитель и смесь перемешивалась. После этого жидкая смесь заливалась в оправки для СВЧ-измерений и в форму образцов для магнитных измерений и для микроскопии. Далее проводилось вакуумирование для удаления пузырьков воздуха. Пока смесь жидкая, на начальной стадии затвердевания периодически, через каждые 15 минут, она перемешивалась для выравнивания концентрации частиц. Была приготовлена серия композитов с весовой концентрацией частиц от 15 до 60 масс.%. В табл. 1 приведены объемные и массовые доли частиц Fe в образцах.

Изображение структуры композита с концентрацией частиц железа 60 масс.%, полученное на микроскопе Tescan MIRA LMS в режиме BSE при увеличении 55800, приведено на рис. 1 а. Распределение

Таблица 1. Весовые и объемные концентрации частиц Fe

Массовая доля Fe, %	Объемная доля Fe, %
15	2.56
20	3.58
25	4.72
30	5.99
40	9.02
44	10.46
60	18.24

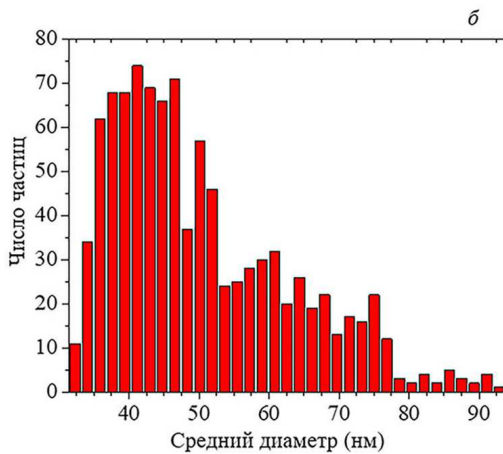
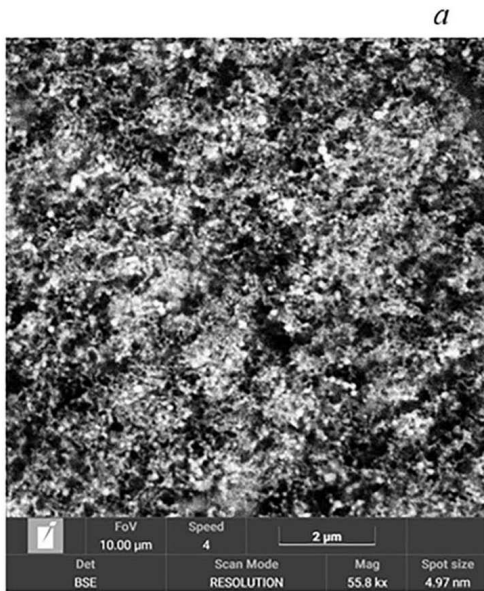


Рис. 1. Структура образца с концентрацией частиц Fe 60 масс.% (а), распределение частиц по размерам (б)

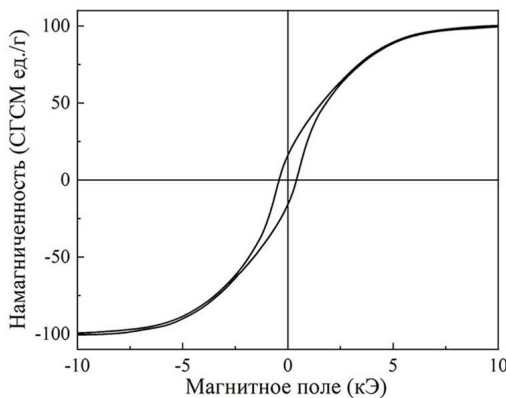


Рис. 2. Петля магнитного гистерезиса образца с концентрацией частиц Fe 60 масс.%

диаметров частиц для этого же образца показано на рис. 1 б. Оно построено в результате обработки изображений, полученных на электронном микроскопе Tescan MIRA LMS с помощью модульной программы анализа данных Gwyddion. Средний размер частиц составляет 58 нм, медианный размер 48 нм. Магнитные свойства композитов были измерены на вибромагнитометре в полях до 30 кЭ. На рис. 2 показана петля гистерезиса, измеренная для образца с концентрацией частиц Fe 60 масс.%. Коэрцитивное поле для этого образца составляет 0.37 кЭ, поле насыщения около 8 кЭ. Намагниченность насыщения составляет 103 ед. СГСМ/г. Для композитных образцов намагниченность насыщения приблизительно пропорциональна концентрации частиц железа.

3. МИКРОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроволновые измерения проведены на скалярном анализаторе цепей на частотах от 26 до 38 ГГц. При измерениях образец толщиной 2 мм помещался в прямоугольный волновод с поперечными размерами $3.6 \times 7.2 \text{ мм}^2$, полностью перекрывающая его поперечное сечение. Измерялись зависимости коэффициентов прохождения T и отражения R от частоты f при отсутствии внешнего магнитного поля, а также зависимости коэффициентов T и R от напряженности магнитного поля H . Рассчитывались относительные изменения модулей коэффициента прохождения

$$t_m = \frac{|T(H)| - |T(0)|}{|T(0)|},$$

где $|T(H)|$ — модуль коэффициента прохождения в магнитном поле H , и отражения

$$r_m = \frac{|R(H)| - |R(0)|}{|R(0)|},$$

где $|R(H)|$ — модуль коэффициента отражения в магнитном поле H . Далее будем подразумевать под коэффициентами прохождения и отражения их модули. Рассчитывалась также диссипация

$$D(H) = 1 - |T(H)|^2 - |R(H)|^2,$$

показывающая долю микроволновой мощности, поглощенной и рассеянной в образце. При измерениях в магнитном поле направления векторов постоянного магнитного поля \mathbf{H} и переменного магнитного поля волны \mathbf{h} были перпендикулярны, $\mathbf{H} \perp \mathbf{h}$.

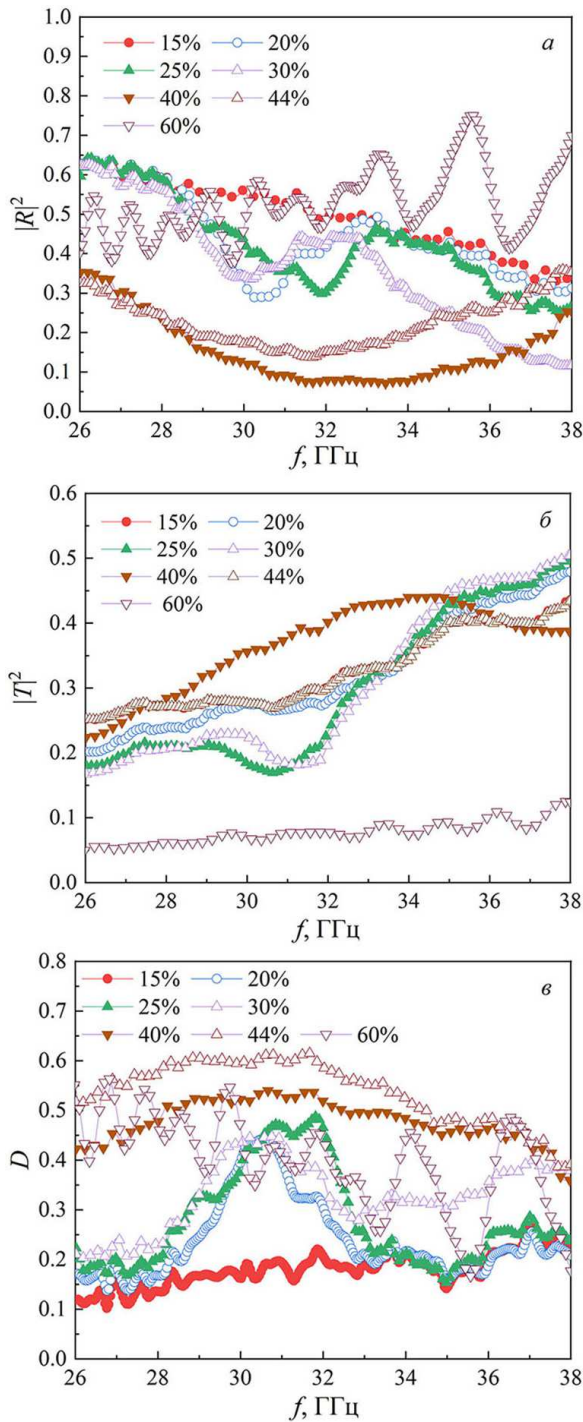


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов отражения (а), прохождения (б) и диссипации (в), измеренные без магнитного поля

Постоянное магнитное поле до 12 кЭ создавалось электромагнитом.

Частотные зависимости коэффициентов отражения, прохождения и диссипации, измеренные без

магнитного поля в образцах композитов с концентрацией частиц Fe от 15 до 60 масс.%, показаны на рис. 3. Обращает на себя внимание изменение характера этих зависимостей при изменении концентрации частиц. Сначала, при повышении концентрации от 15 до 40 масс.%, коэффициент отражения в целом уменьшается. При дальнейшем увеличении концентрации частиц коэффициент отражения начинает увеличиваться, и на частотах свыше 33 ГГц коэффициент отражения композита с наибольшей концентрацией частиц, 60 масс.%, становится наибольшим среди всех образцов. В большей части рассматриваемого интервала частот коэффициент прохождения T имеет наибольшее значение для композита с концентрацией частиц Fe 44 масс.%. Диссипация мощности монотонно возрастает при увеличении концентрации частиц от 15 до 44 масс.%, затем при дальнейшем увеличении уменьшается. Отметим, что на зависимостях $R(f)$, $D(f)$ для образца с концентрацией частиц 60 масс.% наблюдаются осцилляции.

Перейдем к рассмотрению зависимостей коэффициентов от магнитного поля. Соответствующие зависимости для образца с концентрацией частиц Fe 15 масс.% приведены на рис. 4. Экспериментальные результаты для нескольких частот показаны штриховыми линиями, сплошными линиями приведены также расчетные зависимости, о которых будет сказано ниже. На зависимостях коэффициентов R и T присутствуют минимумы, обусловленные ФМР. На зависимостях $D(H)$ присутствуют максимумы, соответствующие поглощению микроволновой мощности при условии ФМР [23]. Диссипация мощности в этом образце изменяется в пределах от 0.2 до 0.5. Подобные зависимости для образца с концентрацией частиц Fe 60 масс.% представлены на рис. 5. Они носят более сложный характер. Легче всего анализировать данные рис. 5б для коэффициента прохождения. Минимумы, наблюдающиеся на разных частотах в полях от 6 до 12 кЭ, соответствуют ФМР. В более слабых полях, от 1 до 2.5 кЭ, наблюдается максимум $T(H)$, вызванный ФМАР. Диссипация мощности в этом образце изменяется в очень широких пределах, от 0.15 до 0.85, при изменении магнитного поля и частоты волны. Разумеется, во всех случаях ФМР вызывает максимум диссипации.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Для выполнения расчетов коэффициентов прохождения и отражения потребуется знание диэлек-

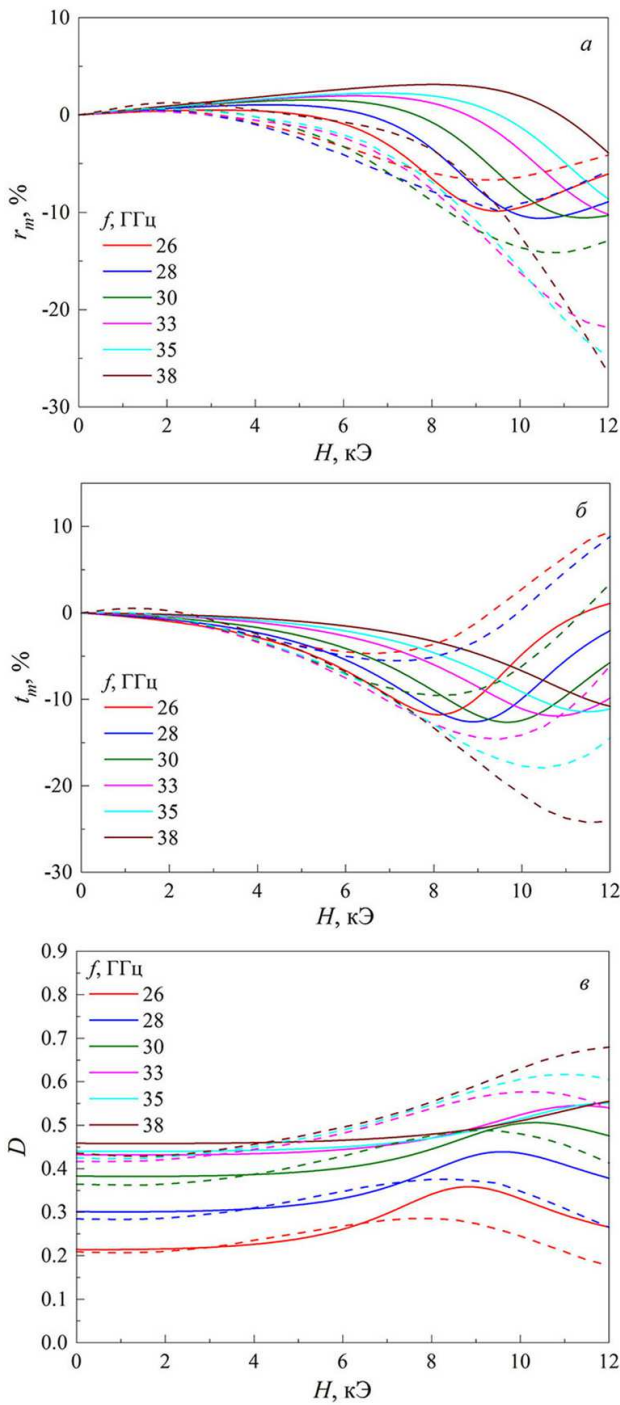


Рис. 4. Зависимости от магнитного поля, измеренные на нескольких частотах, коэффициентов отражения (а), прохождения (б) и диссипации (в) для образца композита с концентрацией частиц Fe 15 масс.%. Сплошные линии — теория, штриховые — эксперимент

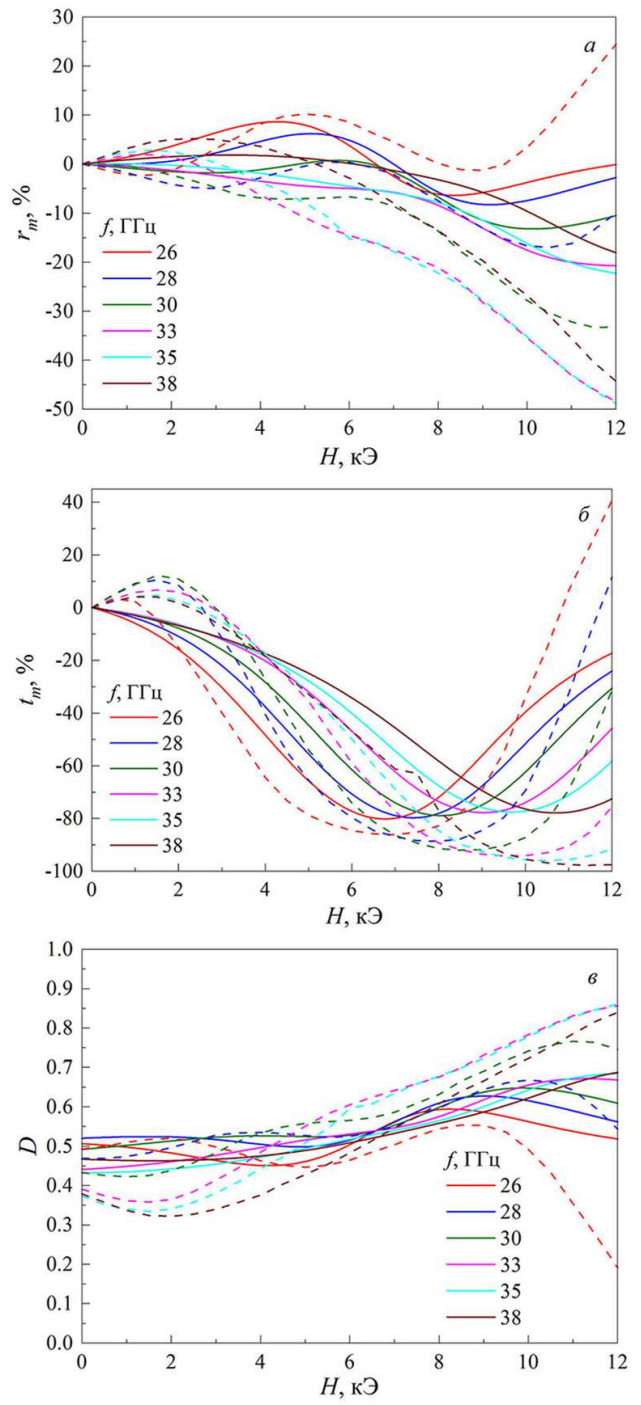


Рис. 5. Зависимости от магнитного поля, измеренные на нескольких частотах, коэффициентов отражения (а), прохождения (б) и диссипации (в) для образца композита с концентрацией частиц Fe 60 масс.%. Сплошные линии — теория, штриховые — эксперимент

трической и магнитной проницаемостей. Диэлектрическая проницаемость может быть определена из сопоставления частотных зависимостей коэффициентов и формул для расчета этих коэффициентов, приведенных, например, в [7, 34, 35]:

$$T = \frac{1}{\cos kd + \frac{i}{2}(\xi + \xi^{-1}) \sin kd}, \quad (1)$$

$$R = \frac{\frac{i}{2}(\xi - \xi^{-1}) \sin kd}{\cos kd + \frac{i}{2}(\xi + \xi^{-1}) \sin kd}, \quad (2)$$

где k — комплексное волновое число в образце, d — толщина образца, ξ — отношение волновых сопротивлений волновода с образцом и незаполненного волновода. Полученные экспериментально частотные зависимости коэффициентов отражения, прохождения и диссипации мощности для всех исследованных образцов показаны на рис. 3. Из этих зависимостей с помощью алгоритма, описанного в [7], определены значения действительной $\text{Re}(\epsilon_{eff})$ и мнимой $\text{Im}(\epsilon_{eff})$ частей эффективной диэлектрической проницаемости композитов. На рис. 6 а показаны концентрационные зависимости компонент диэлектрической проницаемости, соответствующие частоте 28 ГГц. Быстрый рост этих зависимостей наблюдается, начиная с концентраций 40–44 масс.%. Видно, что для всех концентраций $\text{Re}(\epsilon_{eff}) > \text{Im}(\epsilon_{eff})$, так что без внешнего магнитного поля все образцы представляют собой диэлектрики с потерями.

Расчеты магнитной проницаемости композитов, результаты которых показаны на рис. 6 б, проведены в соответствии с методиками, описанными в [22, 23]. В этих методиках учитывается форма и размагничивающий фактор отдельных частиц, их пространственная ориентация, если частицы несферические. Намагниченность материала частиц принята равной намагниченности массивного железа, эффективный параметр затухания в магнитной системе определен экспериментально из ширины линии ФМР для диссипации данного образца композита. В расчетах предполагается, что частицы Fe находятся на достаточно больших расстояниях друг от друга, так что взаимодействием между частицами можно пренебречь.

Теоретический расчет зависимостей коэффициентов отражения и прохождения, а также диссипации от магнитного поля выполнен по методикам, развитым в [7, 22]. Вклады немагнитной матрицы и ферромагнитных частиц в тензор магнитной проницаемости композитной среды учитываются следующим образом [36]:

$$\boldsymbol{\mu}^m = (1 - \theta_v) + \theta_v \langle \boldsymbol{\mu} \rangle, \quad (3)$$

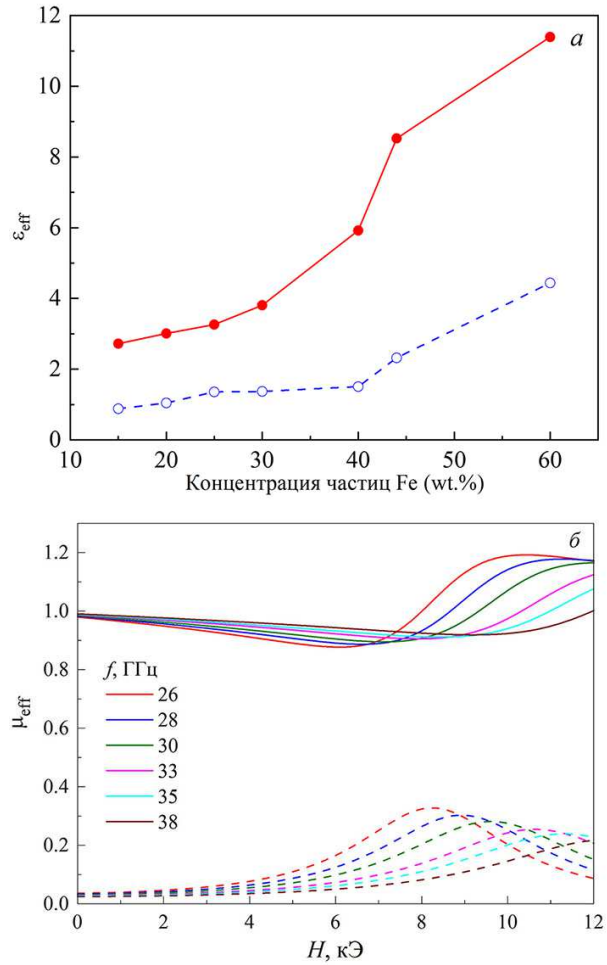


Рис. 6. Зависимости действительной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости от концентрации частиц Fe на частоте 28 ГГц (а) и от магнитного поля для композита с концентрацией частиц 30 масс.%. Действительные и мнимые части зависимостей показаны соответственно сплошными и штриховыми линиями

где θ_v — объемная доля ферромагнитных частиц,

$$\langle \boldsymbol{\mu} \rangle = \sum_{n=1}^N \left[\frac{\rho_n}{P_n} \sum_{p_n=1}^{P_n} \boldsymbol{\mu}_{p_n} \right]$$

— тензор магнитной проницаемости ферромагнитной фазы. Как было показано в работе [36], такая форма записи данного тензора учитывает статистическое усреднение по множеству частиц N типов, каждый из которых имеет свою форму и ориентацию в пространстве относительно внешнего магнитного поля. Количество частиц n -го типа полагается равным P_n , ρ_n — отношение объемной доли ферромагнитных частиц n -го типа к объемной доле всех ферромагнитных частиц θ_v ,

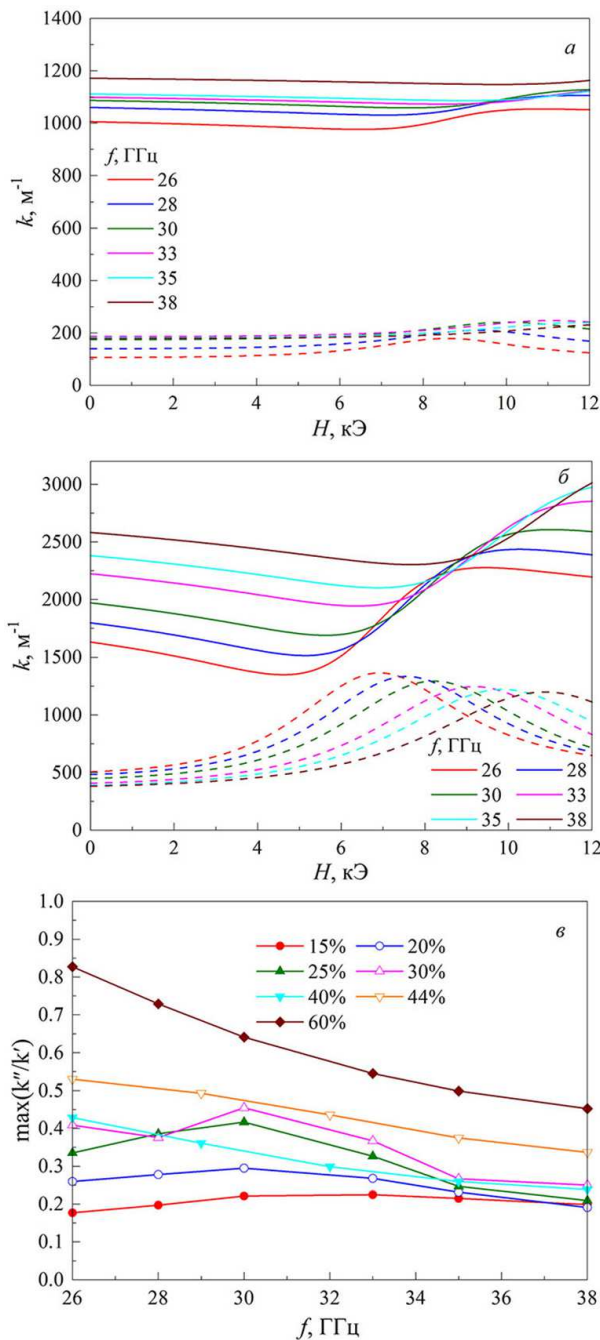


Рис. 7. Зависимости волнового числа от магнитного поля, измеренные на нескольких частотах, для образцов композитов с концентрациями частиц Fe 15 масс.% (а) и 60 масс.% (б); частотная зависимость максимального значения отношения k''/k' для образцов композитов с разной концентрацией частиц Fe (в). На рис. а и б действительные и мнимые части зависимостей показаны соответственно сплошными и штриховыми линиями

$$\mu_{p_n} = \mu_n [L_n(\Theta_{p_n}), M_z(L_n(\Theta_{p_n}), M), H_z] \quad (4)$$

— тензор магнитной проницаемости для отдельной частицы n -го типа с индексом p_n . В формуле (4) ориентация частицы задается вектором вращения Θ_{p_n} . Также учтена зависимость компонент тензора (4) от внешнего магнитного поля H_z , от проекции вектора M_z на ось z и от намагниченности насыщения ферромагнетика M . Вычисление эффективного тензора размагничивания частицы L_n , учитывающего, что в композите каждая из частиц окружена средой с тензором магнитной проницаемости μ^m , является самосогласованной задачей, так как оба этих тензора зависят друг от друга [22]. Однако в случае малой доли ферромагнитных частиц в композите, $\theta_v \ll 1$, когда взаимодействием между частицами можно пренебречь, L_n выражается через тензор N_n для одиночной частицы, окруженной немагнитной средой, при помощи простого соотношения [14,21,22]

$$L_n = (1 - \theta_v)N_n.$$

Явный вид компонент тензора магнитной проницаемости μ^m приведен в [22]. Заметим также, что количество частиц n -го типа P_n выбирается, исходя из условия, чтобы значения компонент тензора μ , полученные в результате усреднения, были статистически устойчивы [36]. В последующих численных расчетах принято, что все частицы в композитах, рассмотренных в данной статье, имеют сферическую форму, так что $N = 1$. Также используются значения размагничивающего фактора N_n , соответствующие сферической частице.

Известно [19], что в случае, когда $\mathbf{H} \perp \mathbf{h}$, компоненты тензора магнитной проницаемости ферромагнитной среды входят в соответствующие выражения для волнового числа и волнового сопротивления в виде определенной комбинации — скалярной величины, называемой эффективной магнитной проницаемостью. Точно также, используя компоненты тензора μ^m , определяемого согласно соотношению (3), можно найти эффективную магнитную проницаемость композитной среды [22, 23, 36]

$$\mu_{eff} = \mu_{xx}^m - \frac{\mu_{xy}^m \mu_{yx}^m}{\mu_{yy}^m}.$$

Волновые числа можно рассчитать по формулам

$$k = k' - ik'' = \sqrt{q^2 - \Gamma_{10}^2}, \quad (5)$$

где k' и k'' — действительная и мнимая части волнового числа соответственно,

$$q = q' - iq'' = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_{eff} \mu_{eff}}, \quad \Gamma_{10} = \frac{\pi}{a}.$$

Формула (5) соответствует тому, что в эксперименте образец помещен в волновод прямоугольного поперечного сечения шириной a , в котором распространяется мода TE_{10} с поперечным волновым числом Γ_{10} . Коэффициенты прохождения и отражения можно рассчитать по формулам (1), (2). Детали расчета описаны в работе [22].

На рис. 7 *а, б* показаны зависимости от напряженности магнитного поля величин действительной и мнимой компонент волнового числа для образцов с концентрацией частиц Fe 15 и 60 масс.%. Компоненты волнового числа можно рассчитать, зная диэлектрическую и магнитную проницаемости, по формулам, приведенным в [19, 22]. Для образца с небольшим содержанием частиц Fe, 15 масс.%, для всех частот и всех значений магнитных полей выполняется неравенство $k' \gg k''$, так что композит с концентрацией частиц 15 масс.% имеет электродинамические свойства диэлектрика с потерями. Иная картина наблюдается для образцов с содержанием частиц 44 и 60 масс.%. На более высоких частотах, 35 и 38 ГГц, выполняется то же неравенство частей волнового числа, так что на этих частотах образец также можно считать диэлектриком с потерями. На более низких частотах справедливость неравенства нарушается, и на частоте $f = 26$ ГГц существует область полей 5–7 кЭ, где можно написать приближенное равенство $k' \approx k''$. Точное равенство $k' = k''$ осуществляется для хорошо проводящих сред (металлов). Поэтому данный композит в отношении электромагнитных характеристик подобен проводящей среде. Такое изменение электромагнитных свойств произошло в магнитном поле за счет большого поглощения электромагнитных волн в условиях ФМР. Важно заметить, что эта трансформация типа среды произошла при концентрациях θ_v равных 0.104 и 0.182, значительно меньших порога перколяции ($\theta_v = 0.3$ для сферических частиц). Выполнение приближенного $k' \approx k''$ наблюдалось в [27] для композита с чешуйками из сплава фанмет. Полученные в этой статье результаты более убедительны, так как для чешуек порог перколяции намного ниже, чем для сферических частиц.

На рис. 7 *в* показаны частотные зависимости максимального значения отношения k''/k' для исследованных образцов. Неравенство $k'' > k'/2$, выполнение которого указывает на сильное отклонение от свойств диэлектрика с потерями, осуществляется на частоте 26 ГГц только для образцов с наибольшей концентрацией частиц Fe — 44 и 60 масс.%. От-

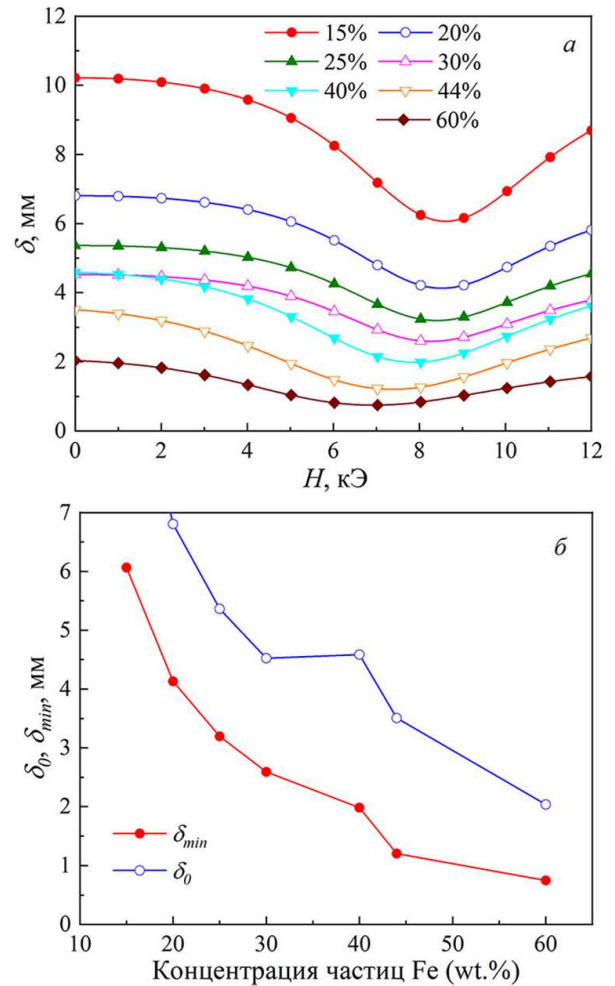


Рис. 8. Полевые зависимости глубины проникновения электромагнитной волны в образец на частоте $f = 26$ ГГц для образцов с разной концентрацией частиц Fe (*а*); концентрационные зависимости глубины проникновения при условии ФМР, δ_{min} , и без магнитного поля, δ_0 , на частоте $f = 26$ ГГц (*б*)

метим, что эти результаты коррелируют с данными рис. 3, полученными без внешнего магнитного поля, когда для этих же образцов с наивысшей концентрацией частиц Fe наблюдалось увеличение коэффициента отражения и уменьшение диссипации.

На рис. 4 и 5 помимо экспериментальных результатов показаны еще результаты расчетов. Расчеты выполнены по методике, разработанной в [22] и кратко описанной выше. Эта методика была применена в [23] к композитам с малой концентрацией сферических частиц железа. Применение в данной статье композитов с большей концентрацией позволило получить качественно новые результаты о распространении волн. Сравнение экспериментальных

и теоретических результатов на рис. 4 и 5 позволяет заключить, что в расчетах удастся отразить наиболее существенные черты наблюдаемых явлений, а именно, присутствие минимумов коэффициентов прохождения и отражения, а также максимума диссипации в области ФМР, примерное совпадение полей этих особенностей и приближенное соответствие величины изменений. Упрощения, принятые в расчетной модели, не дают возможности добиться количественного согласия расчета и эксперимента.

Глубина проникновения электромагнитной волны в среду может определяться как проводимостью среды, так и затуханием в ней. Для проводящих сред характерно проявление скин-эффекта, и глубина проникновения — это скин-глубина. Для композитов с металлическими частицами в условиях, когда осуществляется волновой режим распространения, глубина проникновения δ определяется затуханием и рассеянием, а именно:

$$\delta = \frac{1}{k''}$$

На рис. 8 а показаны зависимости глубины проникновения электромагнитной волны в образцы композитов с разной концентрацией частиц железа от магнитного поля. По этим зависимостям легко определить, будет ли в данном образце существенна интерференция двух- и многократно отраженных волн. Для того чтобы интерференция была важна, нужно, чтобы выполнялось неравенство $\delta > 2d$. На рис. 8 а видно, что для образцов с малой концентрацией, 15 и 20 масс.%, интерференция важна во всем интервале магнитных полей. Для образцов с большой концентрацией, 44 и 60 масс.%, интерференция не важна, так как двух- и многократные отражения успевают затухнуть. Отметим, что для промежуточных концентраций, от 25 до 40 масс.%, интерференция существенна вне области ФМР, а вблизи ФМР доминирует затухание. На рис. 8 б показаны концентрационные зависимости глубины проникновения без магнитного поля, δ_0 , и при выполнении условия ФМР, δ_{min} . При этом условии глубина проникновения минимальная.

На рис. 9 показана концентрационная зависимость максимального изменения диссипации микроволновой мощности на частоте $f = 26$ ГГц. Максимальное значение D_{max} достигается при условии ФМР, а $D(0)$ — это диссипация в отсутствие магнитного поля. Наибольшее значение разности $D_{max} - D(0)$ принимает при концентрации частиц, равной 40 масс.%. Уменьшение разности при дальнейшем увеличении концентрации, по-видимому,

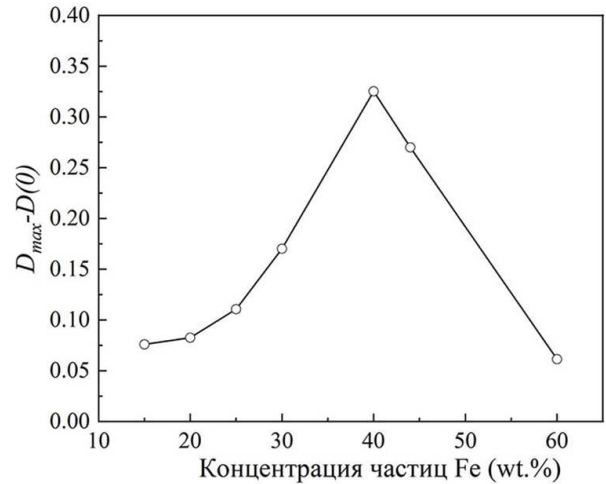


Рис. 9. Концентрационная зависимость максимального изменения диссипации микроволновой мощности на частоте $f = 26$ ГГц

связано с тем, что при больших концентрациях поглощение волн велико и вне области ФМР.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование электромагнитных свойств композитов, состоящих из сферических частиц железа со средним размером 58 нм в матрице из эпоксиаминной смолы. Исследованы образцы композитов с содержанием частиц железа от 15 до 60 масс.%. Измерения коэффициентов прохождения и отражения выполнены на частотах от 26 до 38 ГГц. Установлено, что в отсутствие внешнего магнитного поля все образцы проявляют свойства диэлектрика с потерями. Это неудивительно, так как все образцы имеют концентрацию частиц ниже порога перколяции. При наложении магнитного поля в области ФМР в образцах с наибольшей концентрацией частиц, 44 и 60 масс.%, выполняется приближенное равенство $k' \approx k''$, несмотря на то, что концентрация проводящих частиц намного ниже порога перколяции. В отношении электромагнитных свойств эти композиты, являющиеся диэлектриками на постоянном токе, в микроволновом диапазоне проявляют свойства, подобные свойствам проводящей среды. Это заключение подтверждается увеличением коэффициента отражения от этих образцов, по сравнению с образцами с меньшей концентрацией частиц, при измерениях без магнитного поля.

Расчитана глубина проникновения электромагнитного поля в композиты в зависимости от кон-

центрации частиц железа и от напряженности магнитного поля. Установлены пределы толщины образцов композитов, когда существенна интерференция волн внутри образца.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для Института физики металлов Уральского отделения Российской академии наук.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Вклад авторов равноценен.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. J. Vinoy and R. M. Jha, *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publishers, Boston (1996).
2. S. Sharma, S. R. Parne, S. S. S. Panda, and S. Gandi, *Adv. Colloid Interface Sci.* **327**, 103143 (2024).
3. Y. Wang, T. Li, L. Zhao, Z. Hu, and Y. Gu, *Energy Power Eng.* **3**, 580 (2011).
4. H. Zhao, Z. Zhu, C. Xiong, X. Xu, and Q. Lin, *J. Magn. Magn. Mater.* **422**, 402 (2017).
5. H. Gargama, A. K. Thakur, and S. K. Chaturvedi, *J. Alloys Compd.* **654**, 209 (2016).
6. Z. Yang, B. Wang, S. Wei, X. Wang, Y. Wang, Y. Liang, and Z. Liu, *J. Alloys Compd.* **1025**, 180367 (2025).
7. A. B. Rinkevich, D. V. Perov, and Yu. I. Ryabkov, *Materials* **14**, 3499 (2021).
8. H. Wang, D. Zhu, W. Zhou, and F. Luo, *Int. J. Magn. Electromagn.* **2**, 005 (2016).
9. Y. Yao, C. Zhang, Y. Fan, and J. Zhan, *Adv. Powder Technol.* **27**, 2285 (2016).
10. Y. Zhang, M. Piao, H. Zhang, F. Zhang, J. Chu, X. Wang, H. Shi, and C. Li, *J. Magn. Magn. Mater.* **486**, 165272 (2019).
11. A. Teber, I. Unver, H. Kavas, B. Aktas, and R. Bansal, *J. Magn. Magn. Mater.* **406**, 228 (2016).
12. A. Sihvola, *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*, The Institution of Electrical Engineers, London (1999).
13. R. Skomski, G. C. Hadjipanayis, and D. J. Sellmyer, *IEEE Trans. Magn.* **43**, 2956 (2007).
14. J.-L. Mattei and M. Le Floch, *J. Magn. Magn. Mater.* **215-216**, 589 (2000).
15. C. P. Neo, Y. Yang, and J. Ding, *J. Appl. Phys.* **107**, 083906 (2010).
16. M. Beleggia, M. De Graef, Y. T. Millev, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 891 (2006).
17. M. Belkadi, B. Ramdane, D. Trichet, and J. Fouladgar, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 4317 (2009).
18. Y. Liu, M. G. B. Drew, and Y. Liu, *J. Appl. Phys.* **134**, 045303 (2023).
19. A. G. Gurevich and G. A. Melkov, *Magnetization Oscillations and Waves*, CRC Press, Boca Raton (1996) [А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков, *Магнитные колебания и волны*, Наука, Москва (1994)].
20. R. Ramprasad, P. Zurcher, M. Petras, and M. Miller, *J. Appl. Phys.* **96**, 519 (2004).
21. A. Chevalier, J.-L. Mattei, and M. Le Floch, *J. Magn. Magn. Mater.* **215-216**, 66 (2000).
22. D. V. Perov and A. B. Rinkevich, *Nanomaterials* **11**, 1748 (2021).
23. D. V. Perov, E. A. Kuznetsov, A. B. Rinkevich, O. V. Nemytova, and M. A. Uimin, *Photonics Nanostructures: Fundam. Appl.* **58**, 101214 (2024).
24. A. Shiryayev, K. Rozanov, A. Naboko, A. Artemova, S. Maklakov, S. Bobrovskii, and D. Petrov, *Physics* **3**, 678 (2021).
25. H. Wang, M. Li, and X. Li, *AIP Adv.* **6**, 125030 (2016).
26. A. Butera, *Eur. Phys. J. B* **52**, 297 (2006).
27. A. B. Rinkevich, Y. I. Ryabkov, D. V. Perov, and O. V. Nemytova, *J. Magn. Magn. Mater.* **529**, 167901 (2021).
28. F. M. Idris, M. Hashim, Z. Abbas, I. Ismail, R. Nazlan, and I. R. Ibrahim, *J. Magn. Magn. Mater.* **405**, 197 (2016).

29. W. M. Abd El-Gawad, E. M. Eldesouki, and W. A. Abd El-Ghany, *Sci. Rep.* **14**, 5190 (2024).
30. Y. Wang, P. Zhang, Z. Liu, K. Li, C. Xian, W. Yang, Z. Luo, S. Liu, J. Han, H. Du, C. Wang, and J. Yang, *AIP Adv.* **13**, 025240 (2023).
31. D. Q. Zuo, Y. Q. Jia, J. H. Xu, and J. J. Fu, *Ind. Eng. Chem. Res.* **62**, 14791 (2023).
32. D. Rosická and J. Šembera, *Nanoscale Res. Lett.* **6**, 527 (2011).
33. L. Wang, R. Zhou, and H. Xin, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **56**, 499 (2008).
34. V. V. Ustinov, A. B. Rinkevich, D. V. Perov, A. M. Burkhanov, M. I. Samoylovich, S. M. Kleshcheva, and E. A. Kuznetsov, *Tech. Phys.* **58**, 568 (2013) [В. В. Устинов, А. Б. Ринкевич, Д. В. Перов, А. М. Бурханов, М. И. Самойлович, С. М. Клещева, Е. А. Кузнецов, *ЖТФ* **83**, 104 (2013)].
35. L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, Acad. Press, San Diego (1960) [Л. М. Бреховских, *Волны в слоистых средах*, Изд-во АН СССР, Москва (1957)].
36. D. V. Perov, Yu. V. Korkh, E. A. Kuznetsov, O. V. Nemytova, A. B. Rinkevich, M. A. Uimin, and A. S. Konev, *Photonics Nanostructures: Fundam. Appl.* **62**, 101311 (2024).

Microwave Electrodynamics of Composites with Iron Nanoparticles

*A. B. Rinkevich**, *D. V. Perov***, *E. A. Kuznetsov****, *M. A. Uimin*****

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
620108, Ekaterinburg, Russia

*E-mail: rin@imp.uran.ru

**E-mail: peroff@imp.uran.ru

***E-mail: kuzeag@imp.uran.ru

****E-mail: uimin@imp.uran.ru

Received November 25, 2025

Revised February 24, 2026

Accepted March 25, 2026

Abstract

The dependences of the transmission and reflection coefficients of microwaves for composites containing iron nanoparticles in a dielectric matrix on the frequency of the wave and on an external magnetic field have been studied. The measurements were performed at frequencies from 26 to 38 GHz. The dissipation of microwave power in the samples is calculated. It is shown that at low concentrations of particles, the samples are lossy dielectrics. At high concentrations of particles, but still significantly lower than the percolation threshold, the real part of the wavenumber when measured in a magnetic field is approximately equal to the imaginary part, and with respect to electromagnetic characteristics, composites acquire some properties of conductive media. The depth of penetration of microwaves into composites has been estimated and the conditions under which wave interference inside the sample is important have been established.

Keywords: composites, ferromagnetic nanoparticles, microwaves, reflection and transmission coefficients, penetration depth, power dissipation

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Conflict of interest. The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

Authors' contribution. The contribution of the authors is equal.