

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.311.6

ЭПОКСИКОМПОЗИТЫ С МИКРОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА – МОДЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

© 2022 г. Г. Ю. Мельников^{а, *}, Л. М. Ранеро^б, А. П. Сафронов^а, А. Лараньяга^с,
А. В. Свалов^а, Г. В. Курляндская^{а, б}

^аУральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

^бУниверситет Страны Басков UPV/EHU, Лейоа, 48940 Испания

^сУниверситет Страны Басков UPV/EHU, SGIKER, Лейоа, 48940 Испания

*e-mail: grisha2207@list.ru

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 02.09.2022 г.

Принята к публикации 06.09.2022 г.

Исследованы особенности структуры и статические магнитные свойства композитов на основе эпоксидных смол с микрочастицами оксида железа FeO_x как модельных материалов для магнитного детектирования. В качестве чувствительного элемента прототипа детектора слабых магнитных полей, работающего на основе магнитоимпедансного эффекта (МИ), был использован пленочный элемент $[FeNi/Cu]_5/Cu/[Cu/FeNi]_5$ с поперечной магнитной анизотропией. Показано, что наблюдается линейная зависимость удельного магнитного момента от концентрации микрочастиц в интервале 0–70 мас. %, несмотря на заметные различия в структуре композитов. С помощью прототипа МИ детектора слабых полей установлена линейная зависимость изменения МИ от концентрации микрочастиц FeO_x в интервале частот 80–260 МГц. Показано, что созданные композиты и пленочные элементы на основе пермаллоя с точки зрения их функциональных свойств являются комплементарными и могут быть использованы как модельная “пара” для магнитного детектирования.

Ключевые слова: магнитные эпоксикомпозиты, микрочастицы оксида железа, структура наполненных композитов, пленки пермаллоя, магнитные свойства, магнитный импеданс

DOI: 10.31857/S0015323022601015

ВВЕДЕНИЕ

Создание композиционных магнитных материалов для электроники – важная научная задача. К востребованным электронным устройствам следует отнести детекторы слабых магнитных полей, которые используют для различных приложений [1, 2]. Их разработка требует создания модельных калибровочных материалов. Использование эпоксидных композитов, наполненных магнитными микрочастицами, позволяет решить данную задачу [3, 4]. Эпоксидные наполненные магнитные материалы – это среды, магнитными свойствами которых можно управлять, изменяя концентрацию и тип наполнителя. Особый интерес вызывает возможность бесконтактного детектирования концентрации магнитных частиц в составе композиционных материалов типа “полимерная матрица–магнитный наполнитель” разного происхождения [2, 5].

Существует много способов определения концентрации магнитных частиц в различных материалах. Например, ЯМР-релаксометрия является

наиболее чувствительным методом, однако он требует дорогостоящего оборудования [6]. Индукционный метод [7] подразумевает воздействие на частицы возбуждающего поля, и за счет нелинейной магнитной индукции генерируемый сигнал измеряется приемными катушками. Однако чувствительный элемент в виде катушки индуктивности сильно подвержен влиянию переменных электромагнитных полей и требует дополнительной защиты от электромагнитных помех. Отдельно следует отметить магнитоимпедансные детекторы, обладающие высокой чувствительностью к внешнему магнитному полю.

Магнитоимпедансный эффект (МИ) – это изменение импеданса ферромагнитного проводника во внешнем магнитном поле при протекании по нему тока высокой частоты [2, 8]. МИ-эффект с высокой чувствительностью к магнитному полю наблюдается в магнитомягких пленочных структурах на основе пермаллоя (FeNi) с поперечной магнитной анизотропией. Однако при толщине слоя пермаллоя выше критической,

происходит переход в “закритическое” состояние и снижение эффекта МИ [9, 10]. Решением данной проблемы стало использование многослойных пленочных структур [11, 12].

Магнитные эпоксикомпозиты – это востребованный материал, имитирующий магнитные частицы в биологических тканях, изучение которого требуется для биомедицинских приложений [13]. Распределение магнитных частиц в биологических тканях и органах чаще всего не является однородным, а отражает биологическую структуру данных объектов [14]. Например, можно упомянуть модель тромба, в которой доставка тромболитиков может осуществляться магнитными частицами. МИ-детектирование их полей рассеяния позволяет контролировать локальную концентрацию лекарственного препарата [15, 16]. МИ-детектирование полей рассеяния и сопоставление структурных и магнитных свойств композитов с различной концентрацией магнитных частиц позволят лучше понять особенности детектирования частиц в реальных тканях.

Цель настоящей работы – исследование структуры и магнитных свойств микрочастиц магнетита и цилиндрических образцов композитов на основе эпоксидной смолы и возможности их использования в качестве модельных калибровочных материалов для пленочных МИ-детекторов слабых полей на примере пленочного элемента типа $[\text{FeNi}/\text{Cu}]_5/\text{Cu}/[\text{Cu}/\text{FeNi}]_5$.

ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Многослойные пленочные структуры были получены методом ионно-плазменного распыления на подложки из стекла с использованием сплавной мишени состава $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$. МИ-элементы имели размеры: 10.0×0.5 мм. Состав многослойной структуры $[\text{Fe}_{21}\text{Ni}_{79}(100 \text{ нм})/\text{Cu}(3 \text{ нм})]_5/\text{Cu}(500 \text{ нм})/[\text{Fe}_{21}\text{Ni}_{79}(100 \text{ нм})/\text{Cu}(3 \text{ нм})]_5$ был выбран на основе литературных данных [2, 15]. При получении пленочных структур постоянное внешнее магнитное поле величиной 100 Э прикладывали вдоль короткой стороны элемента в его плоскости для формирования наведенной одноосной магнитной анизотропии. Напыление проводили через металлические маски; предварительный вакуум составлял 3×10^{-7} мбар, рабочее давление аргона 3.8×10^{-3} мбар.

Для наполнения полимерных матриц использовали коммерческие магнитные частицы компании Alfa Aesar (Ward Hill, MA, USA) оксида железа. Их геометрические параметры и фазовый состав анализировали с помощью рентгенофазового анализа (РФА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). РФА выполнен на рентгеновском дифрактометре Philips X'pert PRO, в медном Cu-K α

излучении (длина волны $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) [17]. СЭМ выполнена с использованием микроскопа JEOL JSM-640.

Образцы эпоксидных композитов с концентрацией магнитного наполнителя (С) от 0 до 70 мас. % представляли собой цилиндры диаметром 5 мм и высотой 4 мм. Для изготовления композитов в качестве полимерной матрицы была выбрана эпоксид-дифенилолпропановая смола KDA (Chimex Ltd., Россия), которую смешивали с отвердителем – три(этил)-тетра(амин) (Erital, Россия) в соотношении 6 : 1 по весу. После этого навески порошков (для получения концентраций 0–70%) смешивали с жидкой композицией эпоксидной смолы при температуре 25°C в течение 10 мин. Затем смесь помещали в форму из полиэтилена для отверждения в течение 2 ч при 70°C.

Для исследования особенностей структуры эпоксикомпозитов использовали метод СЭМ (JEOL JSM-640). На поверхность композитов, во избежание накопления электрического заряда, методом ионно-плазменного распыления дополнительно наносили тонкий (20–25 нм) слой углерода, не влияющий на особенности структуры композитов.

Магнитные свойства как микрочастиц, так и полимерных композитов исследовали с помощью вибрационного магнетометра Cryogenics Ltd. при комнатной температуре. Измерения продольного МИ эффекта (внешнее магнитное поле прикладывали параллельно направлению протекания высокочастотного тока) проводили с помощью анализатора импеданса Agilent HP E 4991 A во внешнем магнитном поле, создаваемом катушками Гельмгольца. Поле прикладывали вдоль длинной стороны пленочных элементов в направлении протекания переменного тока в диапазоне полей ± 100 Э с шагом 0.33 Э.

Комплексный импеданс (Z) измеряли в зависимости от величины внешнего магнитного поля в интервале частот тока возбуждения от 1 до 400 МГц. Образцы крепили на специальные держатели, составляя часть линии “микрострайп” (рис. 1а), а для выделения вклада образца из общего сигнала использована описанная ранее стандартная процедура калибровки и учета вклада микроволнового тракта [12].

Импеданс пленочного МИ-элемента измеряли при разных положениях центра магнитного цилиндра относительно пленочного элемента. Магнитный цилиндр располагали на расстоянии порядка 1.1 ± 0.2 мм над поверхностью элемента, он мог передвигаться вдоль оси ОХ с шагом 1 мм (рис. 1б). Предварительно магнитный цилиндр намагничивали до насыщения в поле 2 кЭ, после чего в нулевом внешнем поле величина его магнитного момента совпадала с величиной остаточного магнитного момента (σ_r). Для описания ре-

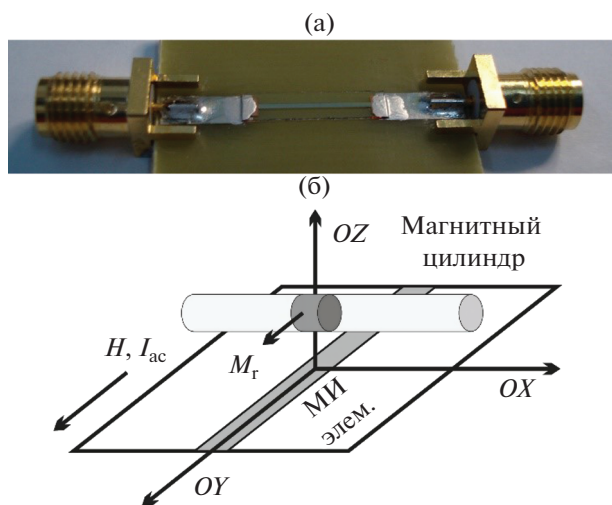


Рис. 1. Общий вид микрополосковой линии с МИ пленочным элементом (а). Схема детектирования эпоксидных композитов. H – прикладываемое магнитное поле; I_{ac} – высокочастотный ток; M_r – остаточная намагниченность магнитного цилиндра (б).

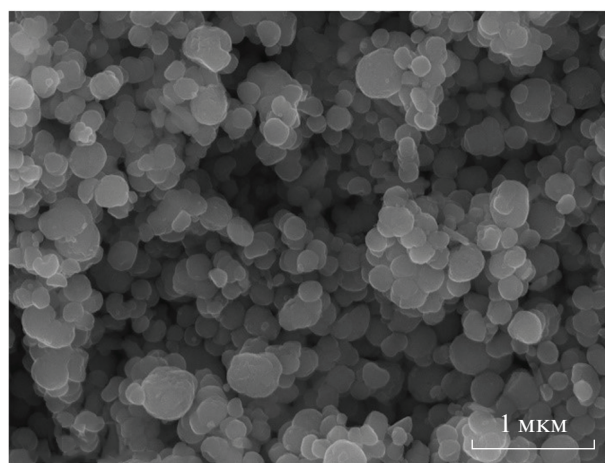
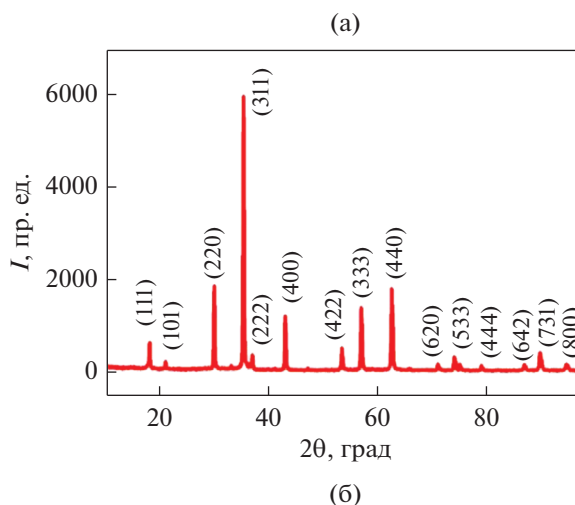


Рис. 2. Рентгеновский спектр исследуемых микрочастиц оксидов железа, индексы Миллера указаны в круглых скобках (а); микрочастицы FeO_x , СЭМ (б).

зультатов МИ-исследований использована полевая зависимость МИ соотношения (1) и МИ-отклик на положение магнитного цилиндра (2):

$$\frac{\Delta Z}{Z}(H) = 100\% \times \frac{Z(H) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})}; \quad (1)$$

$$\Delta\left(\frac{\Delta Z}{Z}(H)\right) = \frac{\Delta Z}{Z_{control}} - \frac{\Delta Z}{Z_{position}}, \quad (2)$$

где $H_{max} = 100$ Э – поле, в котором происходит магнитное насыщение пленочного элемента при приложении поля вдоль его длинной стороны, $\Delta Z/Z_{control}$ – МИ-соотношение для пленочного элемента с расположенным над ним эпоксидным композитом с 0% концентрацией (контроль); $\Delta Z/Z_{position}$ – МИ-пленочного элемента с расположенным над ним магнитным цилиндром в определенной позиции. Частотная зависимость МИ-соотношения описывается с помощью параметра $\Delta Z/Z_{max}$, или максимального значения МИ-соотношения для полевой зависимости при определенной частоте тока возбуждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ дифрактограммы (рис. 2а) показал, что микрочастицы FeO_x содержат следующие фазы: Fe_3O_4 – 94 мас. %; Fe_2O_3 – 1 мас. % и $FeO(OH)$ – 5 мас. %. Максимумы с индексами Миллера (111), (200), (311), (400), (422), (333) (440), (620), (533) и (444) соответствуют магнетиту. На рис.2б приведено СЭМ изображение эпоксикомпозита: большая часть микрочастиц имеет форму, близкую к сферической. Определение среднего размера области когерентного рассеяния (d) дает следующие

значения: $Fe_3O_4 - d = 130 \pm 10$ нм; $Fe_2O_3 - d = 75 \pm 5$ нм, $FeO(OH) - d = 70 \pm 5$ нм. Однако анализ данных сканирующей микроскопии показал, что распределение по размерам использованных микрочастиц хорошо описывается нормальной (гауссовой) функцией распределения $Pn(d)$ с медианой 248 нм и дисперсией 57 нм. Различие данных о среднем размере микрочастиц можно объяснить тем, что крупные частицы магнетита состоят из нескольких поликристаллитов. Как будет показано ниже, последнее объяснение хорошо согласуется с особенностями магнитного гистерезиса и ненулевой коэрцитивностью магнитных микрочастиц и композитов на их основе.

На рис. 3 представлены результаты электронно-микроскопического исследования структуры магнитных композитов. Полимерная матрица обладает меньшей плотностью в отношении прохождения электронов, поэтому матрица выглядит более темной, а светлые включения представляют собой отдельные микрочастицы или агрегаты не-

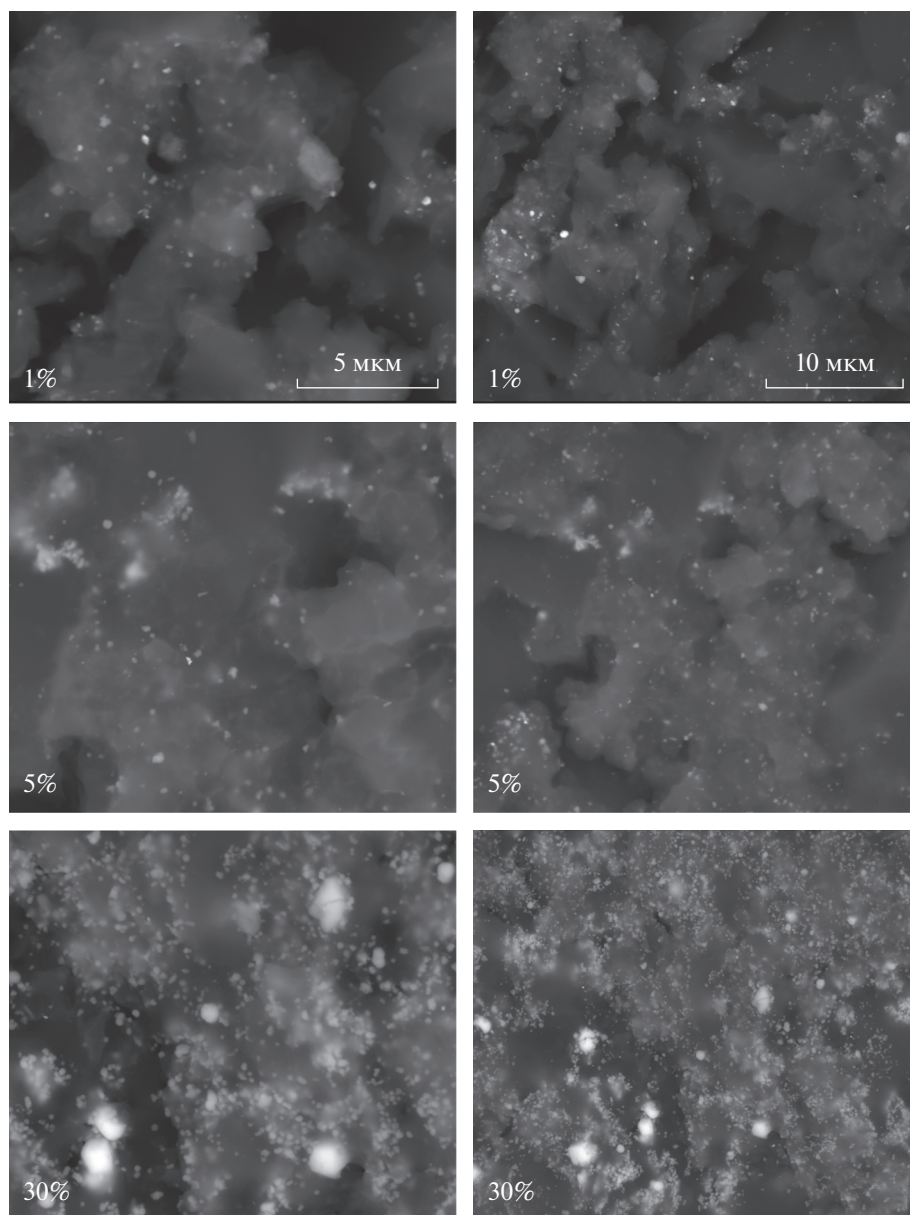


Рис. 3. Фотография СЭМ поверхности эпоксидных композитов с массовыми концентрациями микрочастиц FeO_x в 1, 5 и 30% при двух увеличениях: единица шкалы 5 мкм (столбец слева); единица шкалы 10 мкм (столбец справа).

скольких микрочастиц. Следует отметить, что “информационная глубина” СЭМ для данного композита по приблизительным оценкам составила до 3 микрон. Таким образом, несмотря на ограничение глубины проникновения, использованная методика позволяет с хорошей степенью достоверности оценить распределение микрочастиц не только на поверхности, но и в приповерхностной области.

Структура композитов с малой концентрацией микрочастиц около 1% может быть описана как довольно однородное распределение отдельных частиц и их небольших агломератов, состоящих из нескольких частиц, по объему. Увеличение

концентрации частиц не меняет однородного распределения отдельных частиц и их агрегатов по объему, но наряду с небольшими агрегатами появляются и более крупные. Их размер при концентрации частиц в 30% доходит до нескольких микрон, а расстояние между ближайшими агрегатами составляет несколько десятков микрон. Несмотря на сложную форму возникающих скопленных микрочастиц и достаточно рыхлую структуру самого скопления, общая форма больших агрегатов близка к сферической.

На рис. 4а показана петля магнитного гистерезиса микрочастиц: коэрцитивная сила составляет 75 Э, удельный магнитный момент насыщения

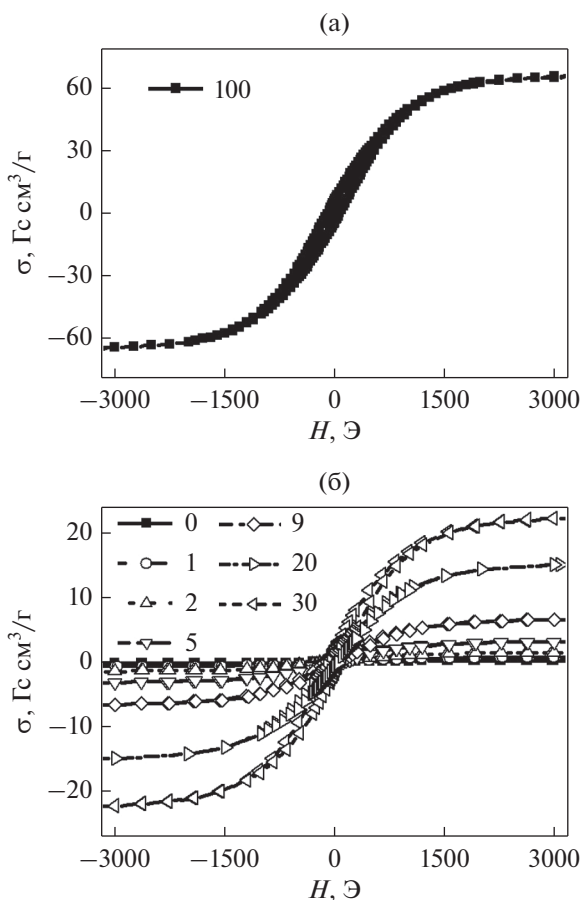


Рис. 4. Зависимость удельного магнитного момента от величины внешнего магнитного поля: (а) магнитных микрочастиц FeO_x; (б) композитов с различными концентрациями магнитных микрочастиц FeO_x. Цифры указывают концентрацию магнитных частиц в весовых процентах.

составляет порядка $\sigma_s = 65 \text{ Гс см}^3/\text{г}$, как и следует ожидать для микрочастиц магнетита.

Удельный магнитный момент насыщения композитов, содержащих магнитные наночастицы, зависит от содержания магнитного наполнителя (рис. 4б). Магнитные композиты обладают ненулевым остаточным магнитным моментом, а значит, магнитные поля рассеяния при МИ-детектировании должны быть приняты во внимание [15, 16]. Несмотря на образование скоплений микрочастиц, эволюции структуры композита с увеличением количества магнитного наполнителя, удельный магнитный момент насыщения σ_s композитов линейно растет при увеличении концентрации микрочастиц. Следовательно, полученные композиты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к модельным композитам для МИ-детектирования (рис. 5). Ввиду наблюдаемой линейной зависимости магнитного момента от концентрации микрочастиц в очень широком интервале концентраций от 0 до 70% можно легко выбирать композиты с необходимыми магнитными свойствами, используя их в качестве калибровочных образцов.

Величина МИ-эффекта и его чувствительность по отношению к внешнему магнитному полю зависят от частоты тока возбуждения (f) и величины данного поля. Поэтому на первом этапе необходимо подобрать оптимальную частоту переменного тока, а также диапазон полей, при которых МИ-элемент будет обладать максимальной чувствительностью к внешнему полю. Максимальное значение МИ-пленочного элемента [FeNi/Cu]₅/Cu/[Cu/FeNi]₅ с поперечной магнитной анизотропией составляло 160% при частоте тока 169 МГц в полях до 6 Э (рис. 6а). Данной частоте также соответствует максимальная чувствительность к внешнему магнитному полю около

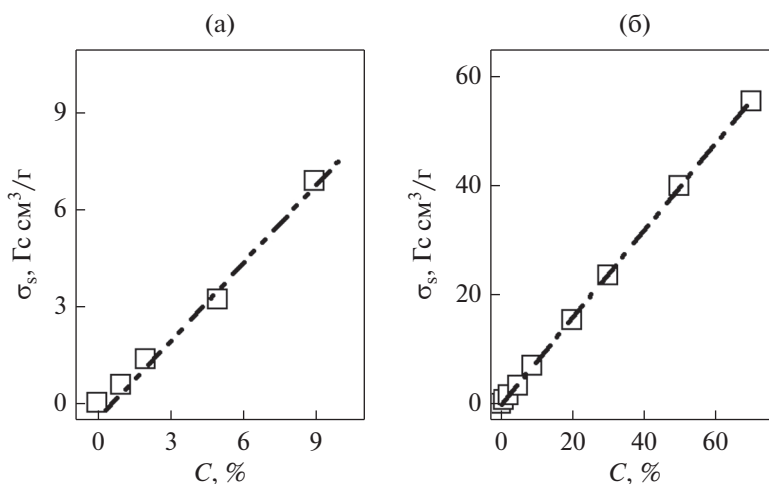


Рис. 5. Зависимость удельного магнитного момента насыщения от концентрации магнитных микрочастиц FeO_x в областях с различными концентрациями: (а) 0–10; (б) 0–70%. Уравнение линейной аппроксимации $y = 0.8x - 0.3$.

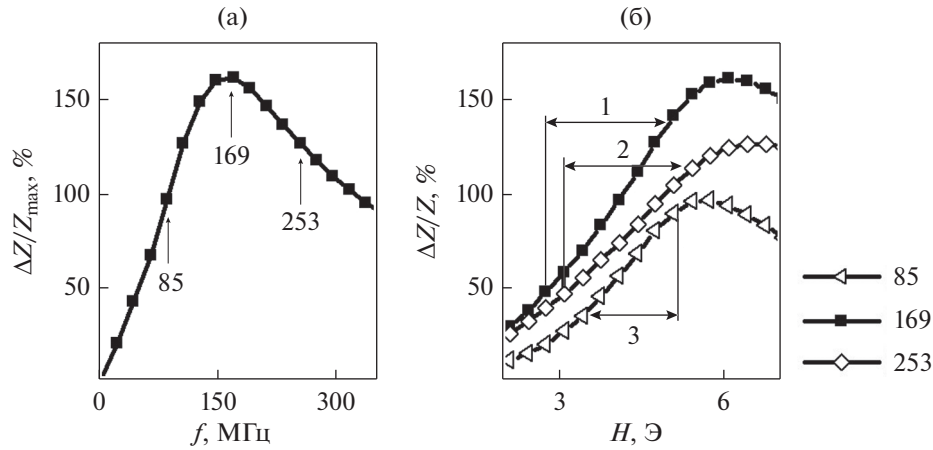


Рис. 6. (а) Частотная зависимость максимального значения МИ соотношения пленочного $[\text{FeNi/Cu}]_5/\text{Cu}/[\text{Cu/FeNi}]_5$ МИ элемента; (б) полевая зависимость МИ соотношения в области максимальной чувствительности и при разных частотах, указанных цифрами 85, 169 и 253 в МГц; в единицах $\%/Э$ указана чувствительность на определенном участке: 1 – 42; 2 – 22; 3 – 32 $\%/Э$.

42%/Э, в диапазоне полей от 3 до 5 Э (рис. 6б). Увеличение или снижение частоты относительно частоты $f = 169$ МГц приводит к снижению максимального значения МИ-соотношения и ее чувствительности. При увеличении частоты наблюдается смещение пика полевой зависимости в область больших полей, а также его сглаживание. Уменьшение частоты тока возбуждения характеризуется противоположными тенденциями (рис. 6а).

Цилиндрический модельный образец в виде эпоксидной смолы без добавления магнитных частиц (Control) вблизи МИ элемента не вносит вклада в МИ отклик (рис. 7). В диапазоне полей, в котором проводили МИ-детектирование, магнитные цилиндры находились в состоянии оста-

точной намагниченности, создавая магнитные поля рассеяния, хорошо детектируемые пленочным МИ-детектором. Наблюдали две тенденции: смещение МИ кривых в область больших полей, связанное с наличием продольной компоненты H_y полей рассеяния (вдоль длинной стороны МИ-элемента), и уменьшение пика МИ, являющееся следствием вклада поперечной компоненты H_x полей рассеяния (вдоль короткой стороны МИ-элемента).

Для всех эпоксидных композитов с концентрацией микрочастиц FeO_x вплоть до 30% в области максимальной чувствительности (во внешнем магнитном поле около 5 Э) удалось количественно определить изменение импеданса пленочного элемента и рассчитать положение образца магнитного композита (рис. 8). По форме МИ-кривых можно судить о распределении по-

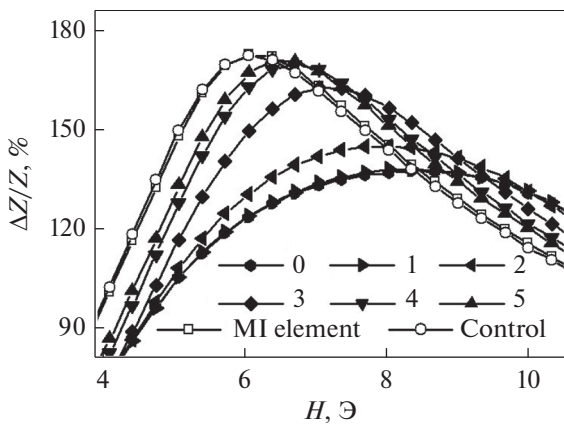


Рис. 7. Полевая зависимость МИ пленочного $[\text{FeNi/Cu}]_5/\text{Cu}/[\text{Cu/FeNi}]_5$ элемента при разных положениях магнитной вставки на частоте 169 МГц при концентрации микрочастиц FeO_x 20%. Числа в подписях к кривым соответствуют различному положению (в миллиметрах) центра магнитной вставки относительно центра МИ элемента (см. рис. 1б).

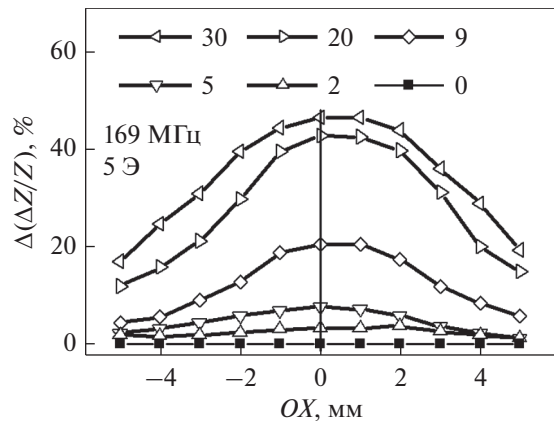


Рис. 8. Зависимость МИ отклика от положения магнитного цилиндра, в области максимальной чувствительности (при поле 5 Э).

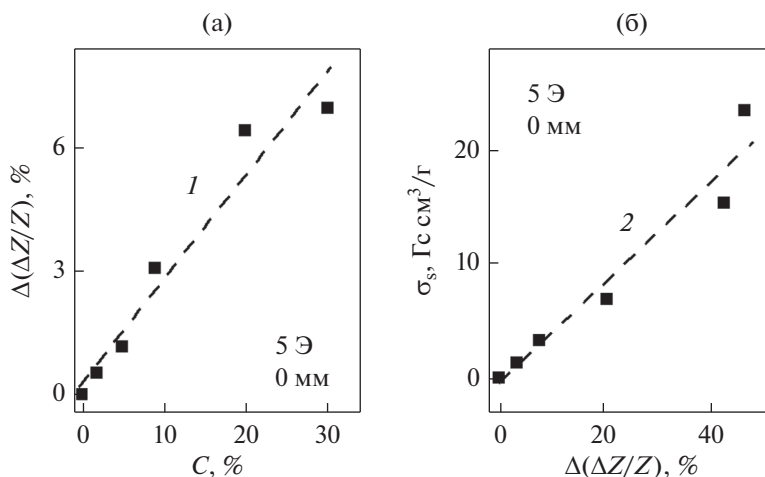


Рис. 9. Зависимость МИ от концентрации микрочастиц FeO_x в положении 0 мм (а). Зависимость удельного магнитного момента насыщения от МИ отклика (б). Линейная аппроксимация: (1) $y = 1.6x + 1.7$; (2) $y = 0.4x - 0.5$.

лей рассеяния, создаваемых магнитным композитом в виде цилиндра. Пик МИ отклика для больших концентраций микрочастиц FeO_x (5, 9, 20, 30%) характеризуется плато шириной 3 мм, что близко к высоте магнитных цилиндров (4 мм).

Следующим этапом может быть разработка принципов детектирования образцов различной геометрии, однако особый интерес представляет задача определения распределения магнитных частиц в составе полимерного композита с помощью анализа МИ-откликов. Ее решение давно востребовано в физике магнитных полимерных материалов.

Зависимость МИ-отклика от концентрации при фиксированном положении цилиндра точно над центром пленочного МИ-элемента (0 мм) хорошо описывается линейным законом (рис. 9), т.е. данную методику можно использовать для определения концентрации магнитных частиц в композитах. Зависимость удельного магнитного момента насыщения от величины МИ-отклика также линейна (рис. 9б), фактически представляя собой калибровочную кривую для определения магнитного момента композитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были синтезированы композиты на основе эпоксидной смолы с концентрацией микрочастиц FeO_x в интервале 0–70 мас. %. Удельный магнитный момент насыщения композитов линейно растет при увеличении концентрации, несмотря на образование скоплений микрочастиц, и эволюцию структуры композита с увеличением количества магнитного наполнителя.

Величина магнитоимпедансного эффекта пленочного $[\text{FeNi}/\text{Cu}]_5/\text{Cu}/[\text{Cu}/\text{FeNi}]_5$ элемента ис-

следована в интервале частот от 1 до 400 МГц как в отсутствие, так и в присутствии модельных образцов в виде цилиндров с различной концентрацией магнитного наполнителя от 0 до 30%. Особенности создаваемых полей рассеяния композиционных образцов зависели как от концентрации магнитного наполнителя, так и от взаимного положения чувствительного МИ-элемента и образца композита. Показано, что МИ линейно зависит от концентрации магнитных частиц в композитах при определенной геометрии измерений. Предложенную методику можно использовать для определения концентрации магнитных частиц в композитах, а также магнитных свойств композитов.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FEUZ-2020-0051. Отдельные измерения были выполнены в SGIKER UPV/EHU.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milyaev M., Naumova L., Proglyado V., Krinitsina T., Bannikova N., Ustinov V. High GMR effect and perfect microstructure in CoFe/Cu multilayers // IEEE Trans. Magn. 2019. V. 55. P. 8630979.
2. Chlenova A.A., Buznikov N.A., Safronov A.P., Golubeva E.V., Lepalovskii V.N., Melnikov G.Y., Kurlyandskaya G.V. Detecting the total stray fields of ferrogel nanoparticles using a prototype magnetoimpedance sensor: Modeling and experiment // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 906–908.
3. Ramajo L.A., Cristybal A.A., Botta P.M., Porto Lypez J.M., Reboredo M.M., Castro M.S. Dielectric and magnetic response of Fe_3O_4 /epoxy composites // Composites: Part A. 2009. V. 40. P. 388–393.
4. Gu H., Tadakamallaet S., Huang Y., Colorado H.A., Luo Z., Haldolaarachchige N., Young D.P., Wei S., Guo Z. Polyaniline stabilized magnetite nanoparticle rein-

- forced epoxy nanocomposites // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2012. V. 4. № 10. P. 5613–5624.
5. Rinkevich A.B., Perov D.V. Determination of the Effective Magnetic Permeability of Nanocomposite Media // Doklady Physics. 2021. V. 66. P. 199–201.
 6. Ye F., Laurent S., Fornara A., Astolfi L., Qin J., Roch A., Martini A., Toprak M.S., Muller N.R., Muhammed M. Uniform mesoporous silica coated iron oxide nanoparticles as a highly efficient nontoxic MRI T₂ contrast agent with tunable proton relaxivities // Contrast media & molecular imaging. 2012. V. 7. № 5. P. 460–468.
 7. Nikitin M., Torno M., Chen H., Rosengart A., Nikitin P.I. Quantitative real-time in vivo detection of magnetic nanoparticles by their nonlinear magnetization // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. № 7. P. 07A304.
 8. Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.Б., Дьячков А.Л., Парамонов В.П., Перов Н.С., Прокошин А.Ф., Усов Н.А., Лагарьков А.Н. Гигантский магнитоимпеданс в аморфных и нанокристаллических мультислоях // ФММ. 1997. Т. 83. № 6. С. 60.
 9. Тукадзуми С. Магнитные характеристики и практическое применение // М.: Мир, 1987. 416 с.
 10. Svalov A.V., Aseguinolaza I.R., Garcia-Arribas A., Orue I., Barandiaran J.M., Alonso J., Fernandez-Gubieda M.L., Kurlyandskaya G.V. Structure and Magnetic Properties of Thin Permalloy Films Near the “Transcritical” State // IEEE Trans. Magn. 2010. V. 46. № 2. P. 333.
 11. Correa M.A., Bohn F., Chesman C., da Silva R.B., Viegas A.D.C., Sommer R.L. Tailoring the magnetoimpedance effect of NiFe/Ag multilayer // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 295004-7.
 12. Buznikov N.A., Safronov A.P., Orue I., Golubeva E.V., Lepalovskij V.N., Svalov A.V., Chlenova A.A., Kurlyandskaya G.V. Modelling of magnetoimpedance response of thin film sensitive element in the presence of ferrogel: Next step toward development of biosensor for intissue embedded magnetic nanoparticles detection // Biosens. Bioelectron. 2018. V. 117. P. 366.
 13. Енукашвили Н.И., Коткас И.Е., Боголюбов Д.С., Котова А.В., Боголюбова И.О., Багаева В.В., Левчук К.А., Масленникова И.И., Иволгин Д.А., Артамонов А.Ю., Марченко Н.В., Миндукшев И.В. Детектирование клеток, содержащих интернализированные мульти-доменные магнитные наночастицы оксида железа(II, III), методом магнитно-резонансной томографии // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 9. P. 1418.
 14. Khawja Ansari S.A.M.; Ficiara E., Ruffinatti, F.A., Stura I., Argenziano M., Abollino O., Cavalli R., Guiot C., D’Agata F. Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, characterization and functionalization for biomedical applications in the central nervous system // Materials. 2019. V. 12. P. 465.
 15. Melnikov G.Y., Lepalovskij V.N., Svalov A. V., Safronov A.P., Kurlyandskaya G.V. Magnetoimpedance thin film sensor for detecting of stray fields of magnetic particles in blood vessel // Sensors. 2021. V. 21. № 11. P. 3621.
 16. Мельников Г.Ю., Лепаловский В.Н., Курляндская Г.В. ГМИ-детектирование магнитного композита из эпоксидной смолы, имитирующего тромб в кровеносном сосуде // В: Известия высших учебных заведений. Физика. 2021. V. 64. № 10. P. 86–90.
 17. http://ipmckp.ru/ru/equipment/philips_xpert.