

08
**Магнитный импеданс структурированных пленочных меандров
в присутствии магнитных микро- и наночастиц**

© А.А. Ювченко,¹ В.Н. Лепаловский,¹ В.О. Васьковский,¹ А.П. Сафронов,^{1,2}
С.О. Волчков,¹ Г.В. Курляндская^{1,3}

¹ Уральский федеральный университет,
620000 Екатеринбург, Россия

² Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия

³ Университет Страны Басков,
48940 Бильбао, Испания
e-mail: stanislav.volchikov@usu.ru

(Поступило в Редакцию 12 марта 2013 г.)

Исследован магнитный импеданс (МИ) пленочных элементов в форме меандров со слоистой структурой $[\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}]_4/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}/[\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}]_4/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}$ и варьируемыми геометрическими параметрами. Для меандров с наилучшими свойствами (максимальной величиной МИ до 125% и максимальной чувствительностью МИ около 30%/Oe) определено влияние магнитных полей рассеяния, создаваемых сферическими частицами железа диаметром 500 нм и феррожидкостями, содержащими наночастицы оксида железа, на МИ пленочных элементов. Показана возможность детектирования полей рассеяния сложных конфигураций, создаваемых набором ферромагнитных сфер, а также возможность детектирования полей рассеяния ансамбля наночастиц при их различной концентрации на поверхности МИ элемента. Выполнено моделирование чувствительности МИ меандровых пленочных структур к неоднородным внешним магнитным полям. Результаты работы могут быть полезны при разработке специализированных сенсоров магнитных полей для микропозиционирования, неразрушающего контроля, биомагнитного детектирования.

Введение

Магнитный импеданс (МИ) — это изменение комплексного сопротивления ферромагнитного проводника при варьировании напряженности внешнего магнитного поля [1]. МИ-эффект может быть описан в рамках классической электродинамики как разновидность скин-эффекта в условиях изменения магнитной проницаемости ферромагнитного проводника [2]. Очень высокая чувствительность МИ-эффекта, т.е. изменение, например, модуля импеданса на единицу внешнего магнитного поля, делает данный эффект перспективным для детектирования очень малых магнитных полей [3–5]. С точки зрения чувствительности наилучшие результаты (до 600%/Oe) получены для аморфных быстрозакаленных лент, микропроводов в стеклянной оболочке, композиционных проволок типа „немагнитная сердцевина/магнитное покрытие“ и электроосажденных проволок с определенной магнитной анизотропией [4–8]. Тем не менее наибольший интерес для технических и биомедицинских приложений представляют собой пленочные структуры, лучше всего адаптированные к существующим технологиям производства сенсорных устройств, для которых в настоящее время получены значения чувствительности до 50%/Oe [4,9].

Большое количество исследований МИ ориентировано на оптимизацию структурно-химических параметров, дисперсии магнитной анизотропии, процессов перемагничивания МИ-элементов для достижений наибольшей

чувствительности в однородном внешнем магнитном поле. Однако для более полного понимания закономерностей формирования МИ и для совершенствования технических устройств, работающих на основе данного эффекта, необходимы целенаправленные исследования свойств МИ-элементов в присутствии неоднородных магнитных полей [4,10]. При этом важна конкретная топология чувствительных элементов. Например, при разработке магнитных сенсоров, ориентированных на биодетектирование, общая поверхность чувствительного элемента является важным параметром, во многом определяющим работоспособность устройств [11,12]. В частности, авторы работы [13] предложили прототип магнитного биосенсора в форме меандра, работающего на основе эффекта МИ, и показали преимущества такого элемента в сравнении с простейшим полосовым МИ-элементом. При этом для изготовления элементов применялась методика химического травления аморфной ленты. Однако экономически более перспективной представляется пленочная технология. Кроме того, пленочные элементы в форме меандров могут быть предпочтительны для регистрации полей рассеяния от малых магнитных объектов (размером менее 1 мм), которое имеет место при биомагнитном детектировании и исследовании динамики феррожидкостей, содержащих магнитные наночастицы [14,15].

В настоящей работе исследуются особенности магнитного импеданса пленочных элементов в форме меандров со слоистой структурой $[\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}/\text{Cu}]_4/$

Fe19Ni81/Cu/[Fe19Ni81/Cu]₄/Fe19Ni81 при варьировании геометрии элементов и воздействии на элементы неоднородных магнитных полей, создаваемых сферическими частицами железа или феррожидкостями различной концентрации на основе наночастиц оксида железа.

Методическая часть

Пленки [Fe19Ni81(100)/Cu(3)]₄/FeNi(100)/Cu(500)/[FeNi(100)/Cu(3)]₄/FeNi(100) были получены путем последовательного высокочастотного распыления мишеней пермаллоя и меди. В приведенной структурной формуле символами „ / “ выделены слои разного состава, квадратными скобками ограничены повторяющиеся слоистые элементы, а цифры в круглых скобках обозначают толщины соответствующих слоев, выраженные в нанометрах. Функционально такая пленочная структура включает три основных слоя (пермаллой/медь/пермаллой) толщиной по 500 нм. Однако для блокирования „закритического“ магнитного состояния, которое наблюдается в относительно толстых пленках пермаллоя и ведет к сильному снижению магнитной проницаемости [16], магнитные слои искусственно структурировались. Это осуществлялось за счет введения в них ультратонких прослоек Cu. Конкретные толщинные параметры всех слоистых элементов пленочной структуры выбраны в соответствии с данными [17,18].

Подложками для пленок служили термоокисленные монокристаллические пластины кремния диаметром 60 мм. Формирование пленочных структур осуществлялось в следующих условиях: давление остаточных газов в рабочей камере — 10⁻⁶ Торр, давление рабочего газа аргона — 10⁻³ Торр, в плоскости подложек присутствовало технологическое однородное магнитное поле напряженностью 100 Ое. Магнитные свойства пленочных образцов контролировались с помощью магнитооптического эффекта Керра. На основе анализа соответствующих петель гистерезиса установлено наличие в плоскости пленок одноосной магнитной анизотропии с низкой дисперсией осей легкого намагничивания и полем анизотропии около 6 Ое. При этом ориентация оси легкого намагничивания задавалась технологическим магнитным полем.

Все пленочные элементы с топологией прямоугольного меандра (рис. 1) были получены методом фотолитографии в идентичных условиях из одной исходной пленочной структуры. При этом длинные части меандров были ориентированы перпендикулярно оси легкого намагничивания пленки. Геометрия образцов контролировалась с помощью оптической микроскопии и контактной профилометрии. Значения основных линейных размеров элементов приведены в таблице. На поверхность меандров после их изготовления был нанесен слой SiO₂ толщиной 50 нм, который обеспечивал механическую защиту пленочной структуры и предотвращал короткое замыкание между полосами меандра при его контакте

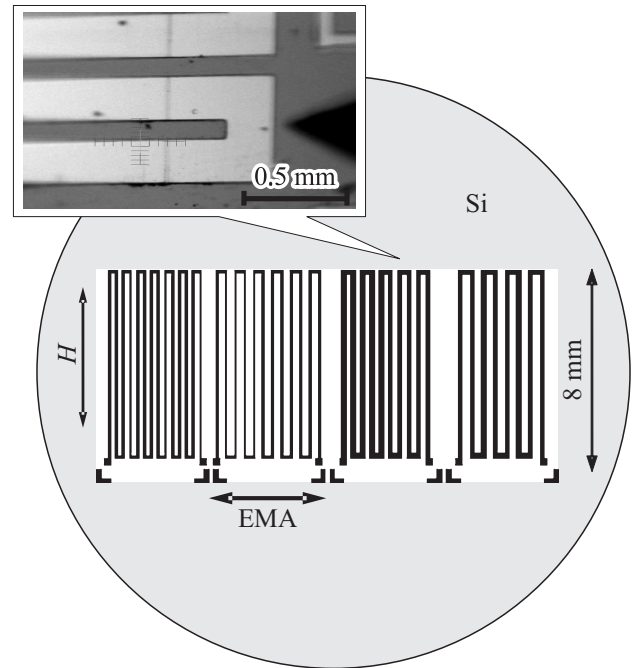


Рис. 1. Топология МИ-элементов, изготовленных на единой подложке Si. Утолщенными стрелками указаны ориентации оси легкого намагничивания (EMA) и оси приложения внешнего однородного магнитного поля (H) при проведении измерений МИ. На вставке приведен фрагмент реального меандра.

с исследуемыми объектами. При работе с феррожидкостью по внешнему контуру меандров из непроводящего полимера формировалась прямоугольная ограничивающая рамка со сторонами, превышающими на 1 мм соответствующие размеры пленочного элемента.

Активное сопротивление элементов на постоянном токе (R_{DC}) определялось двухконтактным методом с помощью мультиметра HP Agilent 3440 при силе тока 10 мА. Импеданс измерялся в линии „микрострип“ на анализаторе импеданса Agilent HP e4991A с погрешностью 0.8%. Амплитуда тока возбуждения составляла 10 мА для всех измерений в диапазоне частот 1–400 МГц. Внешнее квазистатическое магнитное поле H напряженностью от +100 до –100 Ое создавалось соленоидом и прикладывалось либо вдоль длинных частей меандра (продольный импеданс — конфигурация L), либо вдоль коротких частей меандра (поперечный импеданс — конфигурация T). Все измерения проведены при комнатной температуре.

Для характеристики эффекта магнитного импеданса использовались зависимости модуля полного электросопротивления Z или относительной величины $\Delta Z/Z$ от напряженности внешнего магнитного поля H . При этом применялось следующее определение:

$$\Delta Z/Z = [(Z(H) - Z(H_{\max})) / Z(H_{\max})] 100\%, \quad (1)$$

Линейные размеры и магнитоэлектрические свойства пленочных меандров: W — ширина одной полосы, N — число поворотов, D — расстояние между полосами, R_{DC} — сопротивление на постоянном токе, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ и $s(\Delta Z/Z)$ — соответственно максимальное значение модуля относительного магнитного импеданса и чувствительность к внешнему полю на частоте 50 МГц

Образец	$W, \text{ mm} D, \text{ mm}$	N	R_{DC}, Ω	$(\Delta Z/Z)_{\max}, \%$	$s(\Delta Z/Z), \%/Oe$	
					$2 Oe < H < 3 Oe$	$9 Oe < H < 10 Oe$
M12	0.175 0.125	7	28.6	115.1	26.2	6.0
M13	0.175 0.225	6	22.6	111.2	21.1	6.1
M22	0.275 0.125	5	18.3	125.6	31.2	9.1
M23	0.275 0.225	4	23.6	80.9	21.7	6.3

где $H_{\max} = 100$ Oe. Чувствительность к внешнему магнитному полю определялась из соотношения

$$s(\Delta Z/Z) = \delta(\Delta Z/Z)/\delta H, \quad (2)$$

где $\delta(\Delta Z/Z)$ — изменение относительной величины импеданса при изменении внешнего магнитного поля на $\delta H = 1$ Oe.

Для исследования влияния неоднородных магнитных полей на МИ пленочных элементов были выбраны два модельных объекта. Первый — коммерческие стандартизированные сферы чистого железа диаметром 500 μm . Магнитные свойства отдельной сферы были определены с помощью вибрационного магнетометра. Количественное описание полей рассеяния, создаваемых такой сферой с известным магнитным моментом, получено расчетным путем с использованием метода конечных элементов. Второй — феррожидкость на основе наночастиц магнетита была разработана и изготовлена в Институте электрофизики УрО РАН. Наночастицы, полученные методом лазерной абляции [19], были аттестованы различными методиками, описанными в работах [15,19]. В ходе нашего эксперимента определенное количество феррожидкости (0.1 ml) наносилось на пленочный элемент в зону, ограниченную прямоугольной рамкой (см. выше). Затем жидкость высушивалась, и проводились измерения магнитного импеданса. Перед повторными измерениями поверхность пленочного элемента очищалась до такой степени, чтобы его МИ совпадал со значениями МИ данного элемента в исходном состоянии.

Результаты и их обсуждение

В целом данное исследование включало несколько составляющих: оценку функциональных возможностей пленочных элементов в форме меандров как магнитных сенсоров на магнитном импедансе, аттестацию модельных объектов — источников неоднородного магнитного по магнитным свойствам, теоретическую оценку возможностей магнитного детектирования указанных объектов, получение экспериментальных данных по такому детектированию.

На рис. 2, *a* представлены зависимости $\Delta Z/Z(H)$ в конфигурации L для меандров с различными геометрическими параметрами при частоте тока возбуждения 50 МГц. Как видно, все они имеют характерный немонотонный вид с максимумами в области полей, близких к полю анизотропии, и глубокими минимумами при $H = 0$. Величины относительного изменения импеданса в точках максимумов $(\Delta Z/Z)_{\max}$ колеблются в пределах 80–130% (см. таблицу), что можно рассматривать как

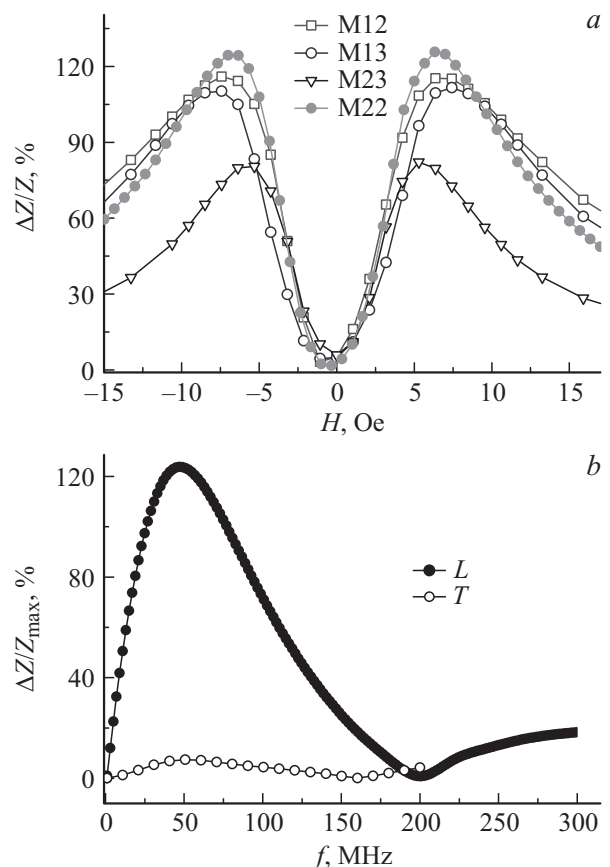


Рис. 2. *a* — зависимости относительного изменения импеданса $(\Delta Z/Z)$ для меандров с различными геометрическими параметрами от напряженности магнитного поля в конфигурации L при частоте возбуждающего тока $f = 50$ МГц; *b* — зависимости максимального относительного изменения импеданса $(\Delta Z/Z)_{\max}$ от частоты для образца M22 в конфигурациях L и T .

свидетельство высоких функциональных возможностей данных элементов. Кроме того, для интервала полей от 2 до 3 Ое, достаточно типичных для многих технических приложений, все элементы характеризуются высокими значениями чувствительности. Как видно из таблицы, величины $s(\Delta Z/Z)$ превышают 20%/Ое. Для более высоких полей (9–10 Ое) чувствительность оказывается заметно ниже. Но и в этом случае она значительно превышает чувствительность, характерную, например, для магнито-резистивных сенсоров [4]. Сравнение свойств различных элементов показывает, что предпочтительными как по величине МИ, так и по чувствительности являются меандры с большей шириной полосы и с меньшим расстоянием между полосами, а наилучшими свойствами обладает элемент типа М22.

На рис. 2, *b* приведены зависимости величины $(\Delta Z/Z)_{\max}$ от частоты тока возбуждения в конфигурациях *L* и *T* для элемента М22. Из этих данных следует, что продольный МИ доминирует, и его наибольшая величина реализуется при частоте около 50 МГц. В случае приложения внешнего магнитного поля вдоль коротких сторон меандра МИ мал при всех частотах переменного тока. Таким образом, конфигурация *L* и частота 50 МГц были признаны оптимальными условиями эксплуатации тестируемых МИ-сенсоров. Для них элементы с топологией типа М22 характеризовались максимальной величиной МИ-эффекта 125%, которая достигалась в поле напряженностью 6.3 Ое, и максимальной чувствительностью 31%/Ое для рабочей точки $H = 3$ Ое. Следует отметить, что эти параметры не являются рекордными в сравнении с данными, сообщаемыми в литературе для пленочных структур на основе пермаллоя [4,18]. Однако они получены на элементах со сравнительно малыми размерами в плоскости и в присутствии защитного слоя SiO₂, наличие которого, как правило, несколько снижает чувствительность МИ-эффекта из-за внесения дополнительных напряжений.

Одним из модельных объектов магнитного детектирования являлись микросферы железа. На рис. 3, *a* показана петля магнитного гистерезиса, измеренная при комнатной температуре на единичной сфере железа, размер которой, согласно данным оптической микроскопии, составлял 500 μm. Как и следовало ожидать, такой образец характеризуется достаточно высоким полем насыщения и ненулевым гистерезисом (коэрцитивная сила ~ 5 Ое). На вставке рис. 3, *a* приведен фрагмент петли гистерезиса в полях H , соответствующих области достаточно большой чувствительности меандра М22. В частности, видно, что при $H < 5$ Ое, когда реализуется максимальная чувствительность МИ-элемента, магнитный момент сферы мал, что затруднило бы ее детектирование. Однако в области несколько больших полей (7–12 Ое) намагниченность сферы приобретает приемлемые значения (не менее 7 Г), а чувствительность меандра еще достаточно велика (около 9%/Ое).

В расчете на указанную величину намагниченности с использованием метода конечных элементов была со-

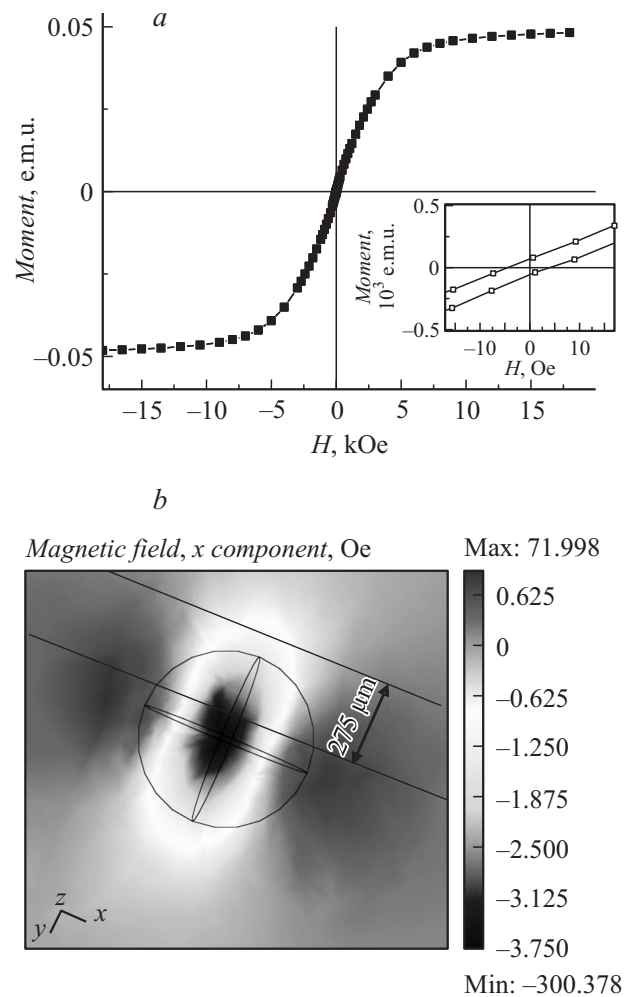


Рис. 3. *a* — полная петля магнитного гистерезиса сферы железа. На вставке — фрагмент петли в области слабых полей; *b* — диаграмма распределения продольной компоненты магнитного поля, создаваемого магнитной сферой диаметром 500 nm с намагниченностью 7 Г на плоскости, параллельной магнитному моменту сферы и удаленной от ее ближайшей точки на 50 nm.

ставлена компьютерная модель магнитного поля рассеяния H_m сферы выбранного размера (500 μm). Ее фрагмент в виде цветовой диаграммы показан на рис. 3, *b*. Диаграмма отражает распределение компоненты поля $(H_m)_x$ (продольная компонента) на плоскости XOY , расположенной на расстоянии 50 nm от ближайшей точки сферы, при том, что магнитный момент сферы ориентирован вдоль положительной полуоси OX . Видно, что в пределах полосы, соответствующей ширине продольных частей меандра, напряженность поля варьирует в пределах от +0.7 до -3.8 Ое. Можно рассчитывать, что этой величины, несмотря на локальный характер поля рассеяния, вполне достаточно, чтобы заметным образом модифицировать МИ исследуемого чувствительного элемента. Однако из-за сложного характера магнитного воздействия на чувствительный элемент дать количественную теоретическую оценку такой мо-

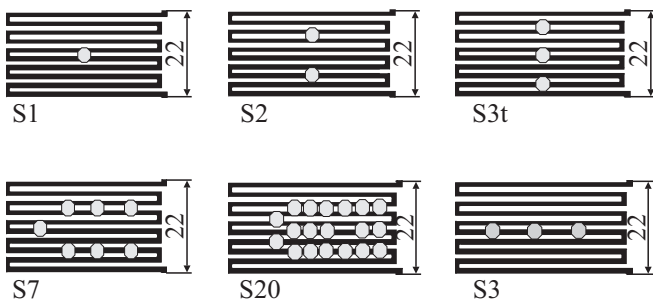


Рис. 4. Схемы расположения сфер железа на поверхности МИ-элемента, используемого для детектирования.

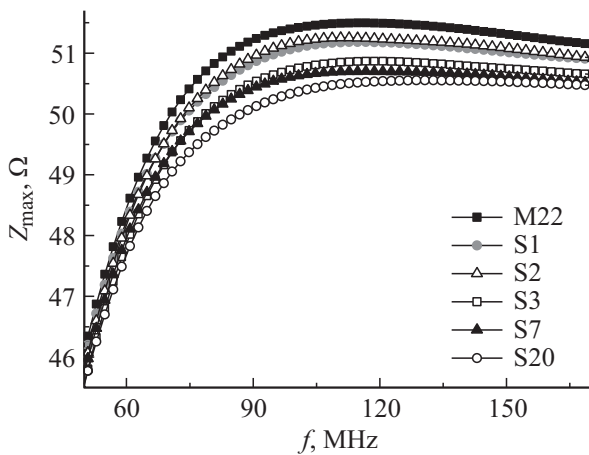


Рис. 5. Частотные зависимости максимального импеданса меандра в исходном состоянии и в присутствии различных конфигураций сфер железа.

дификации не представляется возможным, и приходится ориентироваться на данные эксперимента.

Эксперимент проводился для нескольких конфигураций одинаковых железных сфер. Сферы жестко закреплялись на поверхности меандра, а их число варьировалось от 1 до 20 (см. схемы на рис. 4). Поиск условий оптимального детектирования частиц состоял в измерениях на всех образцах зависимостей $Z(H)$ для широкой области частот возбуждающего тока f и определении при каждой частоте максимального значения импеданса (Z_{\max}). В целом зависимости $Z_{\max}(f)$ представлены на рис. 5. Как видно, эффект присутствия магнитных сфер есть, хотя и не столь велик. Прежде всего он состоит в снижении величины Z_{\max} для всех рассмотренных конфигураций в диапазоне частот от 50 до 170 МГц. Кроме того, изменение Z_{\max} в зависимости от числа магнитных частиц при фиксированных частотах не носит линейного характера. Последнее, по-видимому, означает, что при близком расположении сфер происходит частичное замыкание их полей рассеяния вне меандра.

Для численной оценки наблюдаемых изменений нами был использован параметр, представляющий собой разность между максимальными значениями импеданса

меандра в отсутствие и при наличии магнитных частиц:

$$\delta Z_{\max} = Z_{\max}(0) - Z_{\max}(Sx). \quad (3)$$

На рис. 6, *a* представлены зависимости параметра ΔZ_{\max} от частоты тока возбуждения. Согласно принятому определению (3), прямая $\delta Z_{\max} = 0$ соответствует собственному импедансу элемента в отсутствие частиц. Отметим, что наибольшая величина $\delta Z_{\max} \approx 1 \Omega$ наблюдается для конфигурации S20 при частоте около 90 МГц, а конфигурации S1 и S2 оказываются плохо различимыми между собой.

Однако детальное изучение зависимостей $Z(H)$ показало, что наиболее информативным является сравнение не максимальных, а постмаксимальных (определенных в большем магнитном поле) значений импеданса. Это иллюстрируется рис. 6, *b*, на котором показаны зависимости $Z(H)$ при $f = 50$ МГц для нескольких конфигураций магнитных частиц. Как видно, наличие сфер приводит к увеличению скорости падения импеданса при $H > 7$ Ое, что, вероятно, является следствием намагничивания ча-

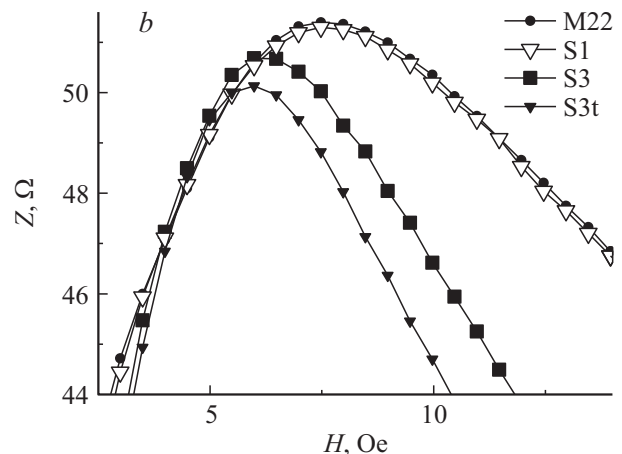
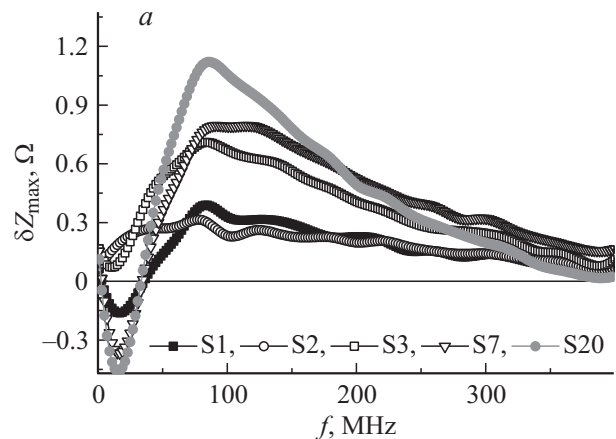


Рис. 6. *a* — частотные зависимости изменений максимального импеданса, обусловленных наличием магнитных частиц в различных конфигурациях (параметр δZ_{\max}); *b* — зависимости импеданса меандра в исходном состоянии и в присутствии различных конфигураций сфер железа от напряженности магнитного поля ($f = 50$ МГц).

стиц. Причем важным является не только количество частиц, но их расположение на элементе. В частности, цепочка из трех сфер, выстроенных перпендикулярно оси приложения магнитного поля (конфигурация S3t), более эффективна, чем аналогичная цепочка, ориентированная вдоль оси приложения поля (конфигурация S3).

Вопрос о совместном выборе пары „магнитная метка — МИ-элемент“ обсуждался ранее в литературе для случая суперпарамагнитных сфер Dynabeads-M 450 и МИ-элемента в виде аморфной ленты [20]. По результатам данного исследования фактически предлагается иная пара, которая включает пленочный элемент, изготовленный по стандартной микроэлектронной технологии, и простые конфигурации магнитных меток-сфер из доступного материала. Ее использование при невысоких магнитных полях позволяет проводить эффективное магнитное детектирование, что может быть интересно для практических приложений.

Другим объектом детектирования в данном исследовании являлись сухие осадки феррожидкостей различной концентрации (от 1 до 5 wt.% частиц оксида железа), которые наносились непосредственно на чувствительный элемент. С целью ускорения процесса высыхания и получения более однородных распределений наночастиц на поверхности меандров использовались магнитные жидкости на основе химически инертного изопропанола. Детальная аттестация наночастиц маггемита Fe_2O_3 , которые являлись наполнителем феррожидкостей, по дисперсности, магнитным свойствам и микроволновому поглощению дана в [21]. Здесь на рис. 7 приведено только их изображение, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии. По нему можно заключить, что частицы имеют сферическую форму, а средний диаметр по ансамблю составляет около 14 nm.

Анализ петель магнитного гистерезиса компактированных образцов наночастиц Fe_2O_3 (здесь не приводят-

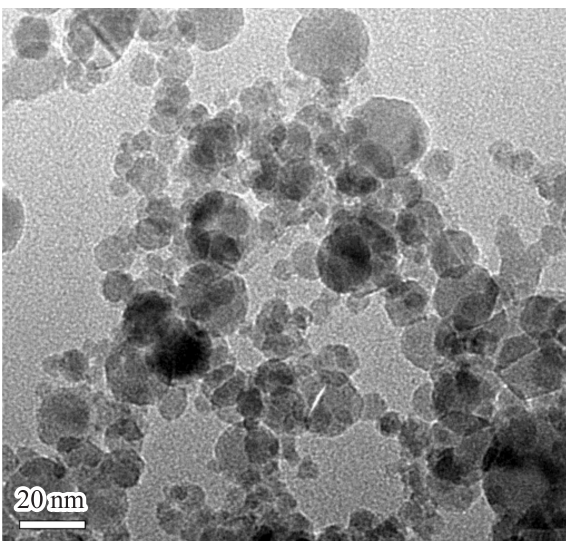


Рис. 7. Изображение наночастиц ферроколлоида, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии.

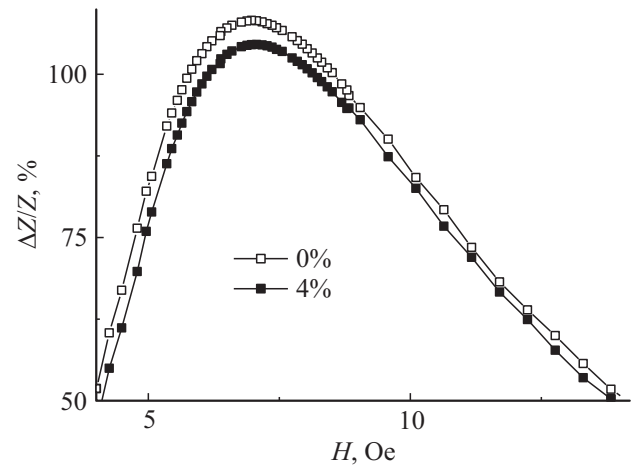


Рис. 8. Зависимости относительного изменения импеданса меандра от поля в отсутствие и при наличии на нем осадка феррожидкости с концентрацией 4%.

ся) показал, что в области слабых полей ($H < 10$ Oe) процесс намагничивания осуществляется практически линейно. Причем магнитная восприимчивость близка, а коэрцитивная сила (~ 1.5 Oe) заметно меньше по сравнению с соответствующими характеристиками микросфер железа. Однако прямого сопоставления между этими объектами по эффективности воздействия на импеданс меандров провести нельзя из-за вероятных различий в конфигурациях, создаваемых ими полями рассеяния.

На рис. 8, а показаны фрагменты полевых зависимостей величины $\Delta Z/Z$ для меандра в исходном состоянии и после высыхания на нем 1 порции (примерно 0.1 ml) феррожидкости при концентрации наночастиц 4%. Видно, что присутствие осадка маггемита приводит к некоторому снижению МИ-эффекта. В частности, максимальное значение $\Delta Z/Z$ уменьшается от 108 до 104%. Более детальное изучение этого вопроса выявило немонотонность в изменении импеданса в зависимости от концентрации наночастиц в феррожидкости. Этот факт может быть следствием определенной агломерации частиц или отражать особенности их магнитной релаксации. Так или иначе, но для более полной характеристики влияния феррожидкостей и других слабомагнитных объектов [22] на магнитный импеданс пленочных элементов необходимы дальнейшие исследования.

Заключение

В ходе данного исследования разработаны, изготовлены и оптимизированы по характеристикам магнитного импеданса элементы с топологией меандра на основе пленочных структур $[FeNi/Cu]_4/FeNi/Cu/[FeNi/Cu]_4/FeNi$. На частоте возбуждающего тока 50 MHz в них реализованы величина магнитного импеданса — 125% и максимальная чувствительность к однородному внеш-

нему полю — 30%/Ое. Такие элементы были использованы для детектирования магнитных полей рассеяния, создаваемых сферическими частицами железа диаметром 500 нм и осадками феррожидкостей на основе наночастиц маггемита. В первом случае получены вариации магнитного импеданса до 1Ω , что указывает на определенный потенциал технического приложения исследованной пары „пленочный элемент — магнитные микросферы“ как системы типа „ключ–замок“. Во втором случае установлена специфическая модификация формы кривых магнитного импеданса при нанесении на его поверхность наночастиц маггемита, что открывает перспективу создания магнитоактивных покрытий для детекторов малых магнитных полей, включая системы биомагнитного детектирования.

Работа поддержана Министерством образования и науки в рамках государственного задания № 2.2362.2011, грантом Уральского федерального университета по Программе поддержки молодых ученых (грант 2.1.2.1/12) и грантом РФФИ № 12-02-31385.

Список литературы

- [1] Beach R.S., Berkowitz A.E. // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. P. 6209–6213.
- [2] Антонов А.С., Гадецкий С.Н., Грановский А.В., Дьячков А.Л., Парамонов В.П., Перов Н.С., Прокошин А.Ф., Усов Н.А., Лагарьков А.Н. // ФММ. 1997. Т. 83. № 6. С. 61–71.
- [3] Nishibe Y., Yamadera H., Ohta N., Tsukada K., Nonomura Y. // Sens. Actuat. A Phys. Vol. 82. P. 155–160.
- [4] Kurlyandskaya G.V., de Cos D., Volchkov S.O. // Russ. J. Nondestr. Test. Vol. 45. P. 377–398.
- [5] Семиров А.В., Букреев Д.А., Мусеев А.А., Лушина В.А., Волокова Е.Г., Волчков С.О., Курляндская Г.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 80–84.
- [6] Kraus L., Frait Z., Pirota K.R., Chiriack H. // J. Magn. Magn. Mater. 2000. Vol. 254–255. P. 399–403.
- [7] Buznikov N.A., Antonov A.S., Kim C.G., Kim C.O., Rakhmanov A.A., Yoon S.S. // J. Magn. Magn. Mater. 2005. Vol. 285. P. 101–111.
- [8] Kisker E., Kurlyandskaya G.V., Yakabchuk H.P., Vas'kovskiy V.O., Bebenin N.G. // Phys. Met. Metall. 2001. Vol. 91. Supl. 1. P. S129–S132.
- [9] Volchkov S.O., Svalov A.V., Kurlyandskaya G.V. // Russ. Phys. Journal. 2009. Vol. 52. N 8. P. 769–776.
- [10] Chiriack H., Tibu M., Moga A.-E., Herea D.D. // J. Magn. Magn. Mater. 2005. Vol. 293. P. 671–676.
- [11] Baselt D.R., Lee G.U., Natesan M., Metzger S.W., Sheehan P.E., Colton R. // Bios. Bioelectr. 1998. Vol. 13. P. 734–739.
- [12] Kurlyandskaya G.V. // J. Magn. Magn. Mater. 2009. Vol. 321. P. 659–662.
- [13] Yand H., Chen L., Lei Ch., Zhang J., Li D., Zhou Z.-M., Bao Ch.-Ch., Hu H.-Y., Chen X., Cui F., Zhang Sh.-X., Zhou Y., Cui D.-X. // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 97. P. 043 702.
- [14] Blanc-Beguín F., Nabily S., Gieraltowski J., Turzo A., Querellou S., Salaun P.Y. // J. Magn. Magn. Mater. 2009. Vol. 321. P. 192–197.
- [15] Beketov I.V., Safronov A.P., Medvedev A.I., Alonso J., Kurlyandskaya G.V., Bhagat S.M. // AIP Adv. 2011. Vol. 2. P. 022 154.
- [16] Coisson M., Vinai F., Tiberio P., Celegato F. // J. Magn. Magn. Mater. 2009. Vol. 321. P. 806–809.
- [17] Kurlyandskaya G.V., Elbaile L., Alves F., Ahamada B., Barrue R., Svalov A.V., Vas'kovskiy V.O. // J. Phys.: Condens. Matter. 2004. Vol. 16. P. 6561–6568.
- [18] Volchkov S.O., Fernández E., Garcia-Arribas A., Barandiaran J.M., Lepalovskij V.N., Kurlyandskaya G.V. // IEEE Trans. Magn. 2011. Vol. 47. N 10. P. 3328–3331.
- [19] Safronov A.P., Kalinina E.G., Smirnova T.A., Leiman D.V., Bagazeev A.V. // Russ. J. Phys. Chem. A. 2010. Vol. 84. P. 2122–2127.
- [20] Kurlyandskaya G.V., Levit V.I. // Mater. Sci. Eng. C. 2007. Vol. 27. P. 495–503.
- [21] Safronov A.P., Beketov I.V., Komogorcev S.V., Kurlyandskaya G.V., Medvedev A.I., Murzakayev A.M., Larranaga A., Bhagat S.M. // AIP Adv. 2012. В печати.
- [22] Chaturvedi A., Stojak K., Laurita N., Mukherjee P., Srikanth H., Phan M.-H. // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111. P. 07E 507.