

УДК 537.622.4

О.В. Коплак¹, Е.И. Куницына¹,
Р.А. Валеев², Д.В. Королев², В.П. Пискорский², Р.Б. Моргунов²

ФЕРРОМАГНИТНЫЕ МИКРОПРОВОДА α -Fe/(PrDy)(FeCo)B ДЛЯ МИКРОМАНИПУЛЯТОРОВ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-60-67

Предложена технология изготовления микропроводов α -Fe диаметром 30 мкм, покрытых аморфной фазой (PrDy)(FeCo)B с высокой магнитострикцией. Микропровода удовлетворяют техническим требованиям по наличию прямоугольной петли магнитного гистерезиса и геометрическим характеристикам. Благодаря использованию метода экстракции жидкой капли расплава удалось создать двухфазный микропровод со значительной долей аморфной фазы, которая вносит существенный вклад в процесс переманипулирования единичного микропровода. Отметим, что одна из технологий изготовления постоянных редкоземельных магнитов включает стадию приготовления аморфной фазы, которая затем кристаллизуется, образуя кристаллиты с заданным направлением главных осей намагниченности (магнитной текстурой). Именно эта стадия приводит к получению микропроводов, обладающих функциональными свойствами.

Ключевые слова: магнитные микропровода, экстракция висящей капли расплава, магнитный гистерезис, бистабильное состояние, композиты.

O.V. Koplak¹, E.I. Kunitsyna¹,
R.A. Valeev², D.V. Korolev², V.P. Piskorski², R.B. Morgunov²

FERROMAGNETIC MICROWIRES α -Fe/(PrDy)(FeCo)B FOR MICROMANIPULATORS AND POLYMER COMPOSITES

Technology of manufacturing of the α -Fe microwires of 30 μ m diameter covered with amorphous (PrDy)(FeCo)B phase with high magnetostriction is developed. The microwires satisfy to technical conditions in rectangular shape of their magnetic hysteresis and geometric parameters. Note that one of the technologies for manufacturing permanent rare-earth magnets includes the stage of preparation of the amorphous phase, which then crystallizes, forming crystallites with a given direction of the main axes of magnetization (magnetic texture). It is this stage that leads to the production of microwires with functional properties.

Keywords: magnetic microwire, pendant drop melt extraction, magnetic hysteresis, bistability, composites.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук [The Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences]; e-mail: director@icp.ac.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Ферромагнитные микропровода являются основой для изготовления сенсоров магнитного поля и механических напряжений, электрического тока и температуры, сенсоров на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта, различных магнитных

нано- и микроманипуляторов (микроножниц и микропинцетов для биомедицинского применения). Микропровода эффективны для хранения и обработки магнитных цифровых кодов, для создания приборов неразрушающего контроля трещин в ферромагнитных металлах, а также в качестве наполнителя полимерных композитов с эффективным поглощением микроволн.

Так, благодаря эффекту гигантского магнитного импеданса из микропроводов можно делать датчики, которые на 2–3 порядка чувствительнее, чем магниторезистивные, и при этом значительно дешевле. Магнитный импеданс – это комплексное сопротивление микрокатушки индуктивности на переменном токе. Сердечником является микропровод, состоящий из ядра и оболочки с разными коэффициентами магнитострикции. При помещении в магнитное поле на поверхности раздела ядра и оболочки возникают механические напряжения, индуцируемые разным расширением ядра и оболочки в магнитном поле. Эти механические напряжения сильно влияют на магнитную анизотропию, а потому и на намагниченность микропровода. Результатом этих изменений является изменение магнитной проницаемости и магнитного импеданса, который полностью определяется магнитными свойствами микросердечника.

Явление ферромагнитного резонанса в магнитных микропроводах заключается в резонансном (сверхэффективном) поглощении сверхвысокочастотного излучения при совпадении энергии кванта этого излучения с энергией, требуемой для перемагничивания материала. Обычно удовлетворение этого условия требует наличия внешнего магнитного поля и электромагнита. В микропроводах необходимое магнитное поле создается внутри ферромагнитного ядра, поэтому сенсоры магнитного поля на основе микропроводов не нуждаются в источнике питания. Многообещающей областью использования ферромагнитных микропроводов является создание магниточувствительных композитных сред, резонансно поглощающих электромагнитную энергию. Микро-размерные структуры, где полимерная матрица выступает в качестве диэлектрической среды, а микропровода – в качестве чувствительных элементов, демонстрируют превосходные характеристики магнитного импеданса и высокое поглощение микроволн. В основном в научно-технической литературе можно найти данные о микропроводах из аморфного или нанокристаллического магнитного материала в стеклянной изоляции, диаметром от нескольких единиц до нескольких десятков микрометров [1–4]. Стеклянная оболочка – необходимый элемент производства аморфных микропроводов, обеспечивающий механические напряжения на интерфейсе при помещении микропровода в магнитное поле или при нагреве. Имеется сразу два недостатка в промышленных микропроводах со стеклянной оболочкой:

- незначительная разница магнитострикции оболочки и ядра и низкая чувствительность сенсоров к магнитному полю и температуре;

- хрупкость и ломкость стеклянной оболочки. Эти две проблемы в данной работе успешно решаются заменой стеклянной оболочки на аморфную редкоземельную оболочку с магнитострикцией, большей на порядок величины, и являющейся эластичной и стойкой к внешним воздействиям.

Ранее микропровода не изготавливали из магнито жестких сплавов редкоземельных магнитов типа RE–TM–B (RE – редкоземельный металл, TM – переходный металл), так как ожидаемая коэрцитивная сила казалась слишком высокой, что сделало бы непригодным их использование для чувствительных к магнитному полю сенсоров [5–7]. Однако в данной работе редкоземельный сплав использован в режиме сверхбыстрого охлаждения, когда происходит разделение фаз на ядро из переходных металлов и аморфную оболочку с почти нулевой коэрцитивной силой. Как показано в работах [8–11], благодаря легированию Pг и Ду и формированию аморфной фазы становится возможной

тонкая настройка максимального энергетического произведения. Цель данной работы – создание низкокоэрцитивных бистабильных микропроводов α -Fe с аморфной редкоземельной оболочкой из расплава (DyPr)(FeCo)B методом экстракции висящей капли расплава.

Материалы и методы

Методика исследования

Выбор метода экстракции висящей капли расплава (ЭВКР) для получения микропроводов предопределен необходимостью высокой скорости охлаждения расплава (PrDy)(FeCo)B, которая необходима для разделения фаз и формирования аморфной оболочки микропровода. Среди преимуществ метода ЭВКР следует отметить высокую производительность микропроводов правильной округлой формы с низкой дефектностью. Получены микропровода со средним радиусом 25–30 мкм и максимальной длиной ~20 мкм. Химический и фазовый состав микропроводов определен методом рентгенофазового (РФА) и энергодисперсионного (EDX) анализов. Объемные структурные свойства микропроводов исследованы на дифрактометре ДРОН-УМ2 в диапазоне углов 10–80 градусов с шагом сканирования 0,02 градуса. Использовали медный катод, дающий рентгеновское излучение, отвечающее K_{α} -линии. Для сравнения поверхностных и объемных свойств микропроводов произведен локальный энергодисперсионный анализ (EDX) с анализируемой площадью, определяемой шириной рентгеновского пучка (~1 мкм²). Рентгеновское излучение проникало на глубину ~1 мкм. Магнитные гистерезисы получены на сверхпроводящем квантовом интерференционном магнитометре MPMS XL Quantum Design при температуре 300 К. Рельеф поверхности микропроводов и распределение градиента магнитных сил на их поверхностях исследовали методом атомно-силовой (АСМ) и магнито-силовой микроскопии (МСМ) с помощью комплекса Aura Integra фирмы NT-MDT. В опытах использовали кремниевый кантилевер с магнитным покрытием CoCr и резонансной частотой 69 кГц. Сканирование производили в режиме двухпроходной методики *tapping-lift* при подъеме кантилевера на втором проходе на 70 нм от поверхности.

Преимуществом данных исследований было использование микроскопа Керра (МОКЕ), принцип действия которого основан на регистрации изменений угла плоскости поляризации света при отражении от поверхности ферромагнетика. Этот угол прямо пропорционален намагниченности ферромагнетика (эффект Керра). Эта техника давала возможность получения локальных петель магнитного гистерезиса, характеризующих малый участок поверхности микропровода диаметром 5 мкм, равным диаметру сфокусированного лазерного пучка. Петля магнитного гистерезиса и изображения доменной структуры поверхности получены при помощи микроскопа (Durham Magneto-optics NanoМОКЕЗ) на основе магнитооптического эффекта Керра. Микроскоп оснащен объективом для измерений полярного эффекта Керра и электромагнитом с диапазоном магнитного поля ± 1200 Э и разрешением 0,1 Э. С помощью микроскопа Керра возможно различать магнитные свойства концевых и центральных участков микропроводов.

Экспериментальная часть

Капля расплава прогревалась высокоинтенсивным электронным пучком. В результате высокоскоростного охлаждения капли расплава со скоростью ~ 10^6 К/с на холодном вращающемся диске получены микропровода с диаметрами $D=40$ – 200 мкм и длиной до $L=2000$ мкм. Рентгенофазовый и энергодисперсионный анализы показали весьма близкие химические составы относительно элементов Pr, Dy, Co, Fe. Определен

химический состав оболочки микропровода $\text{Pr}_{7,4}\text{Dy}_{6,3}\text{Fe}_{50,9}\text{Co}_{28,6}\text{B}_{6,8}$. На спектре рентгеновской дифракции одиночного микропровода хорошо идентифицируются гало, соответствующее аморфной фазе, и линии, отвечающие характерному спектру ядра микропровода $\alpha\text{-Fe}$. Объемные доли ядра микропровода и его оболочки составляли 48 и 52% соответственно. Исследование торца микропровода при сканировании от поверхности к центру микропровода подтвердило разделение фаз $\alpha\text{-Fe}$ и редкоземельной оболочки. Подтверждением двухфазности микропровода служат данные, полученные методом сканирующей и атомно-силовой и магнито-силовой микроскопии (МСМ). Установлено, что поверхность микропровода гладкая и однородная с низким параметром шероховатости ($\sim 1,2$ нм). Сканирование в режиме МСМ подтвердило наличие областей обратной намагниченности в приповерхностном слое вдоль оси микропровода. Суммируя сказанное, можно предложить модель микропровода, в котором цилиндрическое ядро состоит из магнитомягкой фазы $\alpha\text{-Fe}$, а поверхностные слои – из аморфной фазы $(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$ (рис. 1).

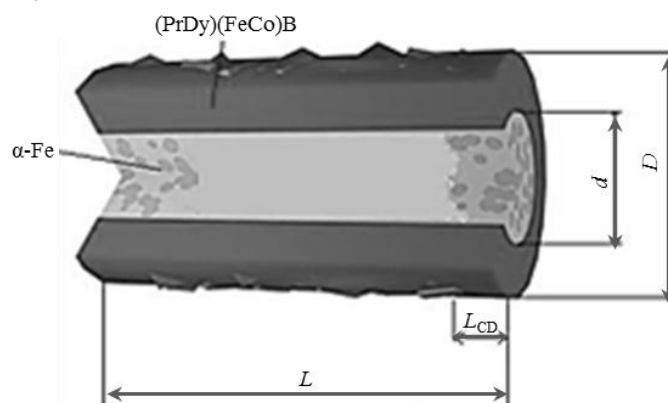


Рис. 1. Схематическое изображение магнитного микропровода диаметром $D=40\text{--}70$ мкм, содержащего ядро $\alpha\text{-Fe}$ диаметром $d=30\text{--}50$ мкм и поверхностные слои аморфной фазы $(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$. Пятна на концах микропровода длиной $L=1\text{--}20$ мм отвечают концевым доменам длиной L_{CD}

Еще одним свидетельством наличия ядра и оболочки является простой опыт, в котором микропровода погружаются в жидкий азот. В результате наблюдается расщепление микропроводов вдоль их оси на две половины цилиндра с плоским сечением. Такое расщепление становится возможным благодаря сильному различию коэффициентов линейного теплового расширения (КЛТР) железного ядра ($11,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и редкоземельной оболочки ($4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). При резком охлаждении с комнатной температуры до 77 K возникают значительные механические напряжения вдоль оси микропровода в области контакта железного ядра с редкоземельной оболочкой. Это приводит к разрушению микропровода и разделению его на части правильной геометрической формы.

Для исследования объемных магнитных свойств использовали одиночный микропровод. Получена узкая петля магнитного гистерезиса с коэрцитивной силой 105 Э . Форма петли близка к прямоугольной при ориентации внешнего магнитного поля вдоль длинной оси микропровода (рис. 1). Отношение намагниченности насыщения M_S к остаточной намагниченности M_R в этой ориентации микропровода близко к 1, так что параметр прямоугольности $1 - M_R/M_S$ достигал значений $0,93\text{--}0,96$, свойственных бистабильным магнитным системам. Если внешнее магнитное поле направлено перпендикулярно оси микропровода, то форма петли гистерезиса становилась округлой и показатель ее прямоугольности значительно уменьшался. Это свидетельствует о том, что главная ось намагниченности направлена вдоль оси микропровода.

Известно, что ядро микропровода обычно является однодоменным, но на его концах поле рассеяния наиболее сильно и приводит к появлению многодоменной структуры [12, 13]. Многодоменная область концевых замыкающих доменов характеризуется определенной длиной L_{CD} (рис. 1) [14]. Для того чтобы экспериментально определить ее длину нужно укорачивать провод до тех пор, пока прямоугольная петля гистерезиса не сменится на более пологую петлю неправильной формы. В данных опытах при укорочении длины микропровода с 0,8 до 0,2 мм коэрцитивная сила уменьшалась со 100 до 20 Э, при этом изменялись наклон и форма петли гистерезиса. Значение «прямоугольности» петли гистерезиса уменьшалось почти в 5 раз – с 0,93 до 0,18. Таким образом, удвоенная критическая длина мультидоменной области составляла $L_{CD}=0,6-0,8$ мм. Меньше этой длины петля гистерезиса становится асимметричной, что указывает на возникновение эффекта обменного смещения на интерфейсе между фазой α -Fe и аморфной фазой (PrDy)(FeCo)B (врезка на рис. 2, б).

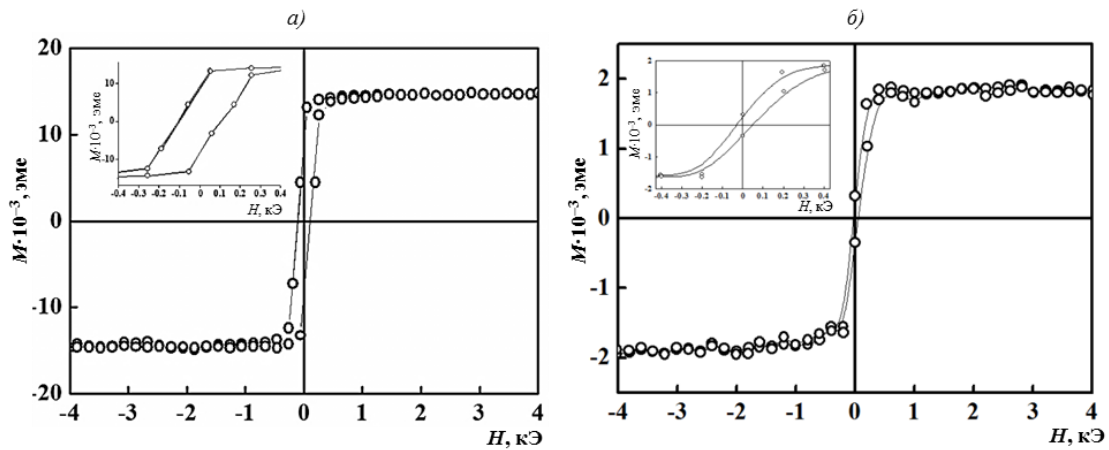


Рис. 2. Петли магнитного гистерезиса одного из того же микропровода длиной 0,8 (а) и 0,3 мм (б), записанные с помощью СКВИД-магнитометра при температуре 300 К (на врезках показаны низкополевые фрагменты петель гистерезиса; ось микропровода ориентирована вдоль поля)

Подтверждением однодоменности ядра и наличия концевых доменов, а также несимметричной петли гистерезиса, обусловленной обменным смещением, являются петли магнитного гистерезиса, записанные на конце микропровода и в его средней части с помощью микроскопа Керра (рис. 3).

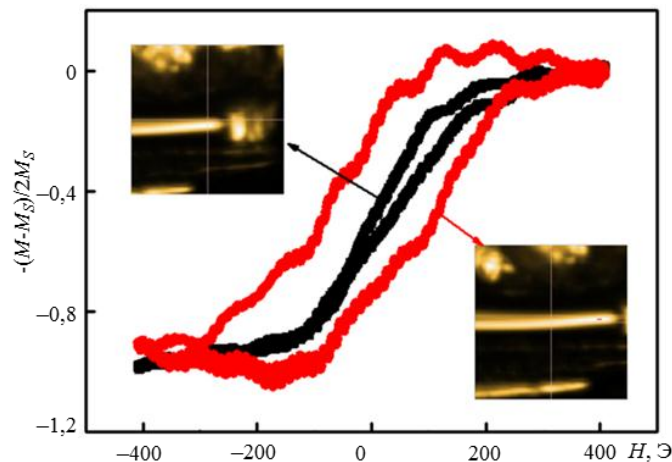


Рис. 3. Петли магнитного гистерезиса, записанные с помощью микроскопа Керра при температуре 300 К в участках микропровода, отмеченных перекрестием на врезках

Видно, что правильная форма петли, близкая к наклонному прямоугольнику в центре микропровода с длиной менее критической, сменяется на асимметричную петлю на конце того же микропровода. Такая асимметрия, как известно, может быть связана с наведенной анизотропией и со сдвигом петли гистерезиса по намагничивающему полю при контакте ферромагнитного и антиферромагнитного материалов [15–17]. Таким образом, локальная микроскопия Керра, позволяющая получать локальные петли гистерезиса, характеризующие малые области размером 5 мкм, показывает, что концы микропроводов обладают многодоменной структурой, в отличие от центральной однодоменной части. Этот вывод находится в полном соответствии с данными СКВИД-магнитометрии, которая приводит к аналогичному выводу.

Результаты и обсуждение

Из научно-технических литературных данных известно, что функциональные микропровода, пригодные для промышленного применения, должны удовлетворять следующим условиям:

- диаметр не должен превышать 50 мкм;
- поле переключения намагниченности должно лежать в диапазоне 30–100 Э;
- форма петли магнитного гистерезиса должна быть близкой к прямоугольной, с тем чтобы характер перемагничивания мог называться магнитным переключением (магнитная бистабильность).

Последнее условие обеспечивается положительным значением константы магнитострикции и длиной микропровода, превышающей удвоенный размер области концевых замыкающих доменов. Полученные результаты показывают, что все эти условия выполняются в данных опытах.

В железных микропроводах, покрытых стеклянной оболочкой, все полезные эффекты, которые могут быть использованы для изготовления из них сенсоров, основаны на различии коэффициентов магнитострикции ядра и оболочки или на различии значений КЛТР. В поле магнитного насыщения ~ 100 Э ядро такого микропровода удлиняется в $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-6}$ раз, а стеклянная оболочка, обладая нулевой магнитострикцией, не удлиняется. Поэтому нетрудно подсчитать, что величина магнитных напряжений, которая при этом возникает на поверхности раздела железа и стекла составляет $\sigma = E \cdot \varepsilon = 0,5\text{--}1$ МПа (где $E \approx 200$ ГПа – модуль упругости железа). Этих напряжений оказывается достаточно для значительного изменения магнитной восприимчивости сердечника микрокатушки в магнитоимпедансном сенсоре. В микропроводах, покрытых редкоземельной оболочкой вместо стекла, можно ожидать относительной деформации оболочки в 10 раз большей потому, что коэффициент магнитострикции (например, в магнитном материале NdFeB) в 10 раз превышает эту величину в α -Fe [7]. Такой же порядок величины магнитострикции имеют и другие редкоземельные магниты типа RE–TM–B. В результате удлинение ядра микропровода в данных опытах в $5 \cdot 10^{-6}$ раз будет происходить вместе с удлинением оболочки в $5 \cdot 10^{-5}$ раз, что вызовет почти десятикратное увеличение механических напряжений σ (до 5–10 МПа) и соответствующей чувствительности сенсора магнитного поля. Поэтому полученные микропровода по своим техническим характеристикам значительно превышают известные широко используемые промышленные образцы.

Аморфная редкоземельная оболочка имеет значительную эластичность и коррозионную стойкость, не является хрупкой и почти не вносит искажений в магнитные свойства микропроводов, поскольку коэрцитивная сила аморфного материала стремится к нулю. Магнитное насыщение аморфной оболочки происходит в значительно более сильных полях по сравнению с рабочим диапазоном полей железного ядра микропровода, что дает лишь небольшой вклад в наклон почти прямоугольной петли магнитного гистерезиса со стороны оболочки.

Из экспериментальных данных следуют все остальные требования к магнитному микропроводу. Прямоугольность петли гистерезиса у длинных микропроводов (рис. 2, *a*) или в их центре (рис. 3) достигает значений 0,93–0,96, что свидетельствует о наличии бистабильности магнитного состояния. Есть и дополнительное, пока мало исследованное явление, которое заключается в асимметричной форме локального магнитного гистерезиса концов провода. Известно, что отсутствие симметрии гистерезиса возникает в случае особых магнитных состояний на границе между антиферромагнетиком и ферромагнетиком. Возникновение таких состояний становится возможным при охлаждении композита в магнитном поле с температуры больше температуры Кюри. Обмен между ферро- и антиферромагнетиком в этом случае дает прибавку к обычному обменному взаимодействию и называется сдвигом намагниченности – BIAS (байес). В данных опытах использовали, по существу, оболочку на основе PrDyFeCoB, в которой намагниченности подрешеток PrDy и FeCo связаны антиферромагнитным взаимодействием и направлены противоположно друг другу. Такие магнитные состояния называют ферримагнетиками, поэтому, по существу, имеет место интерфейс между ферромагнитным ядром α -Fe и антиферромагнетиком состава PrDyFeCoB. Сдвиг намагниченности приводит к асимметрии петли гистерезиса, наличие которой подтверждает структурные исследования микропровода (рис. 1).

Таким образом, благодаря методу экстракции жидкой капли расплава удалось создать двухфазный микропровод со значительной долей аморфной фазы, которая вносит существенный вклад в процесс перемагничивания единичного микропровода. Отметим, что одна из технологий изготовления постоянных редкоземельных магнитов [18] включает стадию приготовления аморфной фазы, которая затем кристаллизуется, образуя кристаллиты с заданным направлением главных осей намагниченности (магнитной текстурой). Именно эта стадия приводит к получению микропроводов, обладающих функциональными свойствами.

Заключения

1. Методом экстракции капли расплава состава (PrDy)(FeCo)B в электронном пучке получены микропровода требуемых диаметров (40–200 мкм) и длин (1–20 мм). Микропровода, как правило, содержали ядро поликристаллической фазы α -Fe (52% (объемн.)) и оболочку аморфного сплава (PrDy)(FeCo)B (~48% (объемн.)). Такое распределение химического состава фаз в микропроводе вызвано высокой скоростью охлаждения расплава $\sim 10^6$ K/c.

2. В одиночном микропроводе диаметром 50 мкм и длиной 1–20 мм наблюдается магнитное бистабильное состояние, характеризующееся прямоугольной петлей магнитного гистерезиса с полем переключения намагниченности 50–100 Э. Показатель прямоугольности петель гистерезиса составляет 0,93–0,96.

3. Укорочение микропровода до длины $< 0,3$ мм приводит к резкому падению коэрцитивной силы и уменьшению параметра прямоугольности петли магнитного гистерезиса в ~ 5 раз. При длине провода меньше критической однодоменная структура ядра разбивается на домены.

4. Локальные петли магнитного гистерезиса, полученные с помощью микроскопии Керра, показывают симметричную петлю, близкую по форме к прямоугольной петле в центре микропровода, и асимметричную петлю, сходную с той, что получена в СКВИД-магнитометре при укорочении микропровода до длины менее критической. Это подтверждает применимость классических представлений о доменной структуре магнитных микропроводов как о однодоменных объектах с мультидоменными областями на концах микропровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Varga R., Zhukov A., Zhukova V., Blanco J. M., Gonzalez J. Supersonic domain wall in magnetic microwires // *Physical Review B*. 2007. Vol. 76. P. 132406. DOI: 10.1103/PhysRevB.76.132406.
2. Ivanov Yu.P., del Real R.P., Chubykalo-Fesenko O., Vázquez M. Magnetic reversal modes in cylindrical nanowires // *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 115. P. 063909. DOI: 10.1088/0022-3727/46/48/485001/meta.
3. Velazquez J., Vazquez M. An analysis of interacting bistable magnetic microwires: from ordered to chaotic behaviours // *Physica B: Condensed Matter*. 2002. Vol. 320. P. 230–235.
4. Peng H., Qin F., Phan M. Ferromagnetic microwire composites. From Sensors to Microwire applications. Series: Engineering Materials and Processes. Springer, 2016. P. 245. DOI: 10.1007/978-3-319-29276-2.
5. Szary P., Luciu I., Duday D., Périgo E.A., Wirtz T., Choquet P., Michels A. Synthesis and magnetic properties of Ta/NdFeB-based composite microwires // *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 117. P. 17D134. DOI: 10.1063/1.4917058.
6. Yamamoto K., Irie T., Takeuchi M. Influence of Cooling Rate on Constituent Phases and Distribution of Elements in (Nd, Dy)–Fe–B Magnet Alloys // *Journal of Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*. 2016. Vol. 63. P. 630. DOI: 10.2497/jjspm.63.630.
7. Algarabel P.A., Del Moral A., Ibarra M.R., Marquina C. High field magnetostriction and magnetic thermal expansion of RE₂Fe₁₄B hard intermetallics // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1992. Vol. 114. P. 161.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Резчикова И.И., Бузенков А.В. Фазовый состав спеченных материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 95–100. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-95-100.
9. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Давыдова Е.А. Фазовый состав спеченных материалов системы Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2 (39). С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9170-2015-0-S2-5-10.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Чередниченко И.В., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Пискорский В.П. Влияние содержания меди на фазовый состав и магнитные свойства термостабильных спеченных магнитов систем Nd–Dy–Fe–Co–B и Pr–Dy–Fe–Co–B // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S2. С. 11–19. DOI: 10.18577/2071-9170-2015-0-S2-11-19.
11. Моргунов Р.Б., Коплак О.В., Таланцев А.Д., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А. Феноменология петель магнитного гистерезиса в многослойных микропроводах α -Fe/DyPrFeCoB // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2019. №7 (79). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-67-75.
12. Severino A.M., Gómez-Polo C., Marín P., Vázquez M. Influence of the sample length on the switching process of magnetostrictive amorphous wire // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1992. Vol. 103. P. 117. DOI: 10.1016/0304-8853(92)90244-I.
13. Zhukov V., Zhukova A., Blancoc J.M., Cobeno A.F., Vazquez M., Gonzalez J. Magnetostriction of Co-Fe-Based Amorphous Soft Magnetic Microwires // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003. Vol. 151. P. 258–259. DOI: 10.1007/978-3-319-48220-0_29.
14. Gudoshnikov S.A., Grebenshchikov Yu.B., Ljubimov B.Ya. et al. Ground state magnetization distribution and characteristic width of head to head domain wall in Fe-rich amorphous microwire // *Physica Status Solidi A*. 2009. Vol. 206. No. 4. P. 613.
15. Ye J., del Real R.P., Infante G., Vazquez M. Local magnetization profile and geometry magnetization effects in microwires as determined by magneto-optical Kerr effect // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113. P. 043904. DOI: 10.1063/1.4776730.
16. Varga R., Klein P., Jimenez A., Vazquez M. Study of the single domain-wall structure in glass-coated microwires // *Physica Status Solidi A*. 2015. Vol. 213. Issue 2. P. 356–362.
17. Sampaio L.C., Sinnecker E., Cernicchiario G. et al. Magnetic microwires as macrospins in a long-range dipole-dipole interaction // *Physical Review B*. 2000. Vol. 61. P. 8976.
18. Королев Д.В., Резчикова И.И., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б. Метод горячей деформации для изготовления постоянных магнитов системы РЗМ–Fe–B с использованием установок искрового плазменного спекания (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №4 (49). С. 11–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-11-18.