

УДК 530.152.1

Р.Б. Моргунов¹, О.В. Коплак², А.Д. Таланцев²,
Д.В. Королев¹, В.П. Пискорский¹, Р.А. Валеев¹

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ПЕТЕЛЬ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА В МНОГОСЛОЙНЫХ МИКРОПРОВОДАХ α -Fe/DyPrFeCoB

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-67-75

Выполнен анализ формы локальных петель магнитного гистерезиса, записываемого с помощью микроскопа Керра в разных точках многослойного коаксиального микропровода α -Fe/DyPrFeCoB. В зависимости от удаленности от концов микропровода, где поле размагничивания вносит существенный вклад в намагниченность, получены петли гистерезиса разных форм. Наиболее существенные для практического применения фрагменты микропровода демонстрируют прямоугольную петлю гистерезиса с обменным смещением, а также петлю гистерезиса с четырьмя равновесными уровнями намагниченности по типу спин-вентильных устройств. Эти данные свидетельствуют о высоком практическом потенциале полученных микропроводов для изготовления из них сенсоров магнитного поля, механических напряжений и температуры.

Ключевые слова: многослойные микропровода, ферромагнитные аморфные сплавы, магнитострикция, обменное смещение.

R.B. Morgunov¹, O.V. Koplak², A.D. Talantsev²,
D.V. Korolev¹, V.P. Piskorski¹, R.A. Valeev¹

THE PHENOMENOLOGY OF THE MAGNETIC HYSTERESIS LOOPS IN MULTILAYER MICROWIRES α -Fe/DyPrFeCoB

The shapes of the magnetic hysteresis loops recorded with a Kerr microscope at different points of the α -Fe/DyPrFeCoB microwire were analyzed. Depending on the distance from the ends of the microwire, where the demagnetization field makes a significant contribution to the magnetization, hysteresis loops of various forms were obtained. The micro-wire fragments that are most significant for practical use demonstrate a rectangular hysteresis loop with exchange bias, as well as a hysteresis loop with 4 equilibrium levels of magnetization like a spin-valve device. These data indicate a high practical potential of the obtained microwires for the manufacture of magnetic field, mechanical stress and temperature sensors from them.

Keywords: multilayered microwires, ferromagnetic amorphous alloys, magnetostriction, exchange bias.

¹Федеральное 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

²Федеральное 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

Введение

При создании магнитных устройств используют технологии, в которых применяют элементы микро- и наноразмеров. Многие промышленные предприятия в мире уже создают серийные микроманипуляторы и микросенсоры, используемые в химической промышленности, биологии и медицине. В последние годы эта тенденция на высокотехнологичных рынках заставила вернуться к популярной в 1960-е и 1970-е годы

теме создания и исследования свойств микропроводов. Микропровода известны в материаловедении давно и ранее привлекали внимание в связи с тем, что образование дислокаций в них является невыгодным, а потому предел текучести оказывается близок к теоретическому пределу прочности. Поэтому в течение многих лет микропровода рассматривались как основа для композиционных материалов, которые позволили бы создавать сверхпрочные конструкции. Значительное изменение сопротивления кремниевых микропроводов при механической нагрузке и изменении температуры использовано в технологиях создания тензорезисторов и температурных сенсоров. Эти аспекты использования микропроводов в XXI в. остались востребованы, но к ним добавились многие другие направления, ставшие актуальными в связи с развитием измерительной техники. В частности, уникальными оказались магнитные свойства микропроводов. Способность демонстрировать бистабильные состояния, обусловленная однодоменным состоянием ядра микропроводов, быстро нашла применение для логических магнитных устройств, а значительное влияние механических напряжений на интерфейсе между ядром и оболочкой микропровода позволило создавать на их основе сенсоры температуры, механических напряжений и магнитного поля, а также микроманипуляторы, необходимые для управления биологическими объектами (живыми клетками) в медицине и биологии. Все эти аспекты применения микропроводов известны давно и остаются актуальными для разработки новых поколений приборов на их основе. Ведущими отечественными исследователями [1–4] обозначены новые горизонты развития науки и прорывные направления, в том числе и в области изготовления микропроводов, а также композиционных материалов на их основе.

Микропровода, изготавливаемые методом сверхбыстрого охлаждения расплава, как было показано ранее, демонстрируют расслоение на магнитомягкую фазу α -Fe и магнитомягкую аморфную оболочку DyPrFeCoB. С одной стороны, это позволяет сохранить все эффекты, связанные с магнитострикцией и механическими напряжениями на границе «ядро–оболочка». Эти напряжения значительно влияют на магнитную анизотропию двуслойных микропроводов. С другой стороны, как будет видно далее, появляются новые свойства микропроводов. Редкоземельная аморфная оболочка более предпочтительна по сравнению с повсеместно создаваемой стеклянной оболочкой, потому что, сохраняя защитные свойства микропровода, аморфная оболочка дополнительно придает: гибкость и отсутствие хрупкости; повышенный коэффициент магнитострикции (по сравнению со стеклом); собственные уникальные магнитные свойства, которые в сочетании с обменным взаимодействием с ядром могут приводить к появлению новых функциональных свойств микропроводов. В частности, широко известны приборы спинтроники, основанные на создании планарных гетероструктур, в которых два ферромагнитных слоя разделены тонкой (или ультратонкой) прослойкой немагнитного материала, позволяющей уменьшить обменное взаимодействие между слоями до такой степени, что переключение их намагниченности может быть осуществлено внешним магнитным полем. Такое устройство называется спиновым вентиляем и имеет множество модификаций. Одно из важнейших устройств в спинтронике – спиновый вентиль с обменным смещением. В этом устройстве гистерезис намагниченности смещен относительно нуля, потому что намагниченность интерфейса зафиксирована в одном направлении при охлаждении такого устройства от температуры Вейсса в магнитном поле. Фиксация магнитного момента на интерфейсе возникает из-за обменного смещения в месте контакта ферро- и антиферромагнетика, например, в гетероструктурах GdFeCo/IrMn [5]. Ферримагнетик DyPrFeCoB, так же как и антиферромагнетик, характеризуется отрицательным знаком обменного взаимодействия. Поэтому физическое состояние его контакта с ферромагнетиком α -Fe должно проявляться с теми же эффектами, что и в случае

использования антиферромагнетика. В данной работе показано, что, по крайней мере, в локальных местах микропровода обменное спиновое смещение реализуется. Следует отметить, что технология быстро охлаждаемых расплавов, использованная для изготовления микропроводов, обладает существенным недостатком. Она приводит к очень широкому разбросу свойств микропроводов не только от провода к проводу, но даже, как будет видно далее, в пределах одного и того же микропровода. С другой стороны, с учетом того, что процент изготовления планарных приборов спинтроники с нужными свойствами невысок, а также того факта, что требуемый размер устройства должен быть значительно меньше длины используемых проводов, можно считать, что вероятность получения пригодного устройства при сканировании вдоль микропровода довольно высока. Верификация нужных свойств бислойных приборов обычно осуществляется путем анализа петель гистерезиса намагниченности и магнитосопротивления.

Цель данной работы заключалась в сравнительном анализе локальных петель гистерезиса, записываемых на разных участках многослойного коаксиального микропровода α -Fe/DyPrFeCoB, для поиска фрагментов с обменным смещением и/или ступенчатым переключением намагниченности ядра и оболочки.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 11.1. «Термостабильные магнитотвердые материалы и математические модели расчета их температурных характеристик для навигационных приборов нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [4].

Материалы и методы

Микроскопия Керра является методом локального анализа магнитных свойств материалов. Поляризованный луч лазера падает на поверхность ферромагнетика (рис. 1). Переизлучение поглощенного света атомами металла происходит таким образом, чтобы выполнялся закон сохранения полного момента в паре «электрон–фотон». Другими словами, спины электронов в атоме поглощают только такие фотоны, спин которых направлен вдоль электронного спина. Поскольку в ферромагнетике электронные спины связаны обменным взаимодействием и направлены в одну сторону, переизлучение происходит избирательно и затрагивает только те электронные спины, которые расположены благоприятно для поглощения поляризованного света. Поэтому в отраженном луче лазера происходит поворот угла поляризации света в зависимости от локальной ориентации спинов в ферромагнетике или его намагниченности.

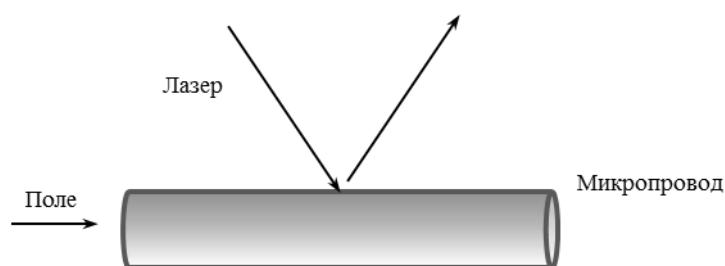


Рис. 1. Схема записи петель магнитного гистерезиса с микроскопа Керра в конфигурации наблюдения полярного эффекта

Поворот плоскости поляризации света обычно очень небольшой – составляет единицы или десятки миллиградусов. Однако и этого поворота оказывается достаточно, чтобы свет, отраженный от поверхности ферромагнетика и затем прошедший через анализатор, изменил интенсивность. Это изменение интенсивности легко регистрируется

современными фотодетекторами и пересчитывается автоматически в угол поворота. В результате приложения положительного и отрицательного магнитного поля к ферромагнетику можно обнаружить потемнение и посветление намагниченных участков поверхности, а также локальные области намагниченности – домены. Следует отметить, что пространственное разрешение этого метода не превышает длины волны света 0,4 мкм, и поэтому не может быть использовано для исследования площадок размером менее нескольких микрометров, которые соответствуют минимально достижимому диаметру сфокусированного света лазера. Таким образом, в данной работе использована микроскопия Керра для анализа отдельных участков ферромагнитных микропроводов диаметром до 5 мкм.

Глубина проникновения света в металл обычно составляет несколько нанометров. Для случая ультратонких магнитных пленок в спинтронике этого вполне достаточно, чтобы анализировать намагниченности слоев, которые являются полностью прозрачными для света оптического диапазона из-за их очень малой толщины (<1 нм). Однако применительно к микропроводам, слои которых имеют толщину >10 мкм, поглощение света в тонких приповерхностных слоях означает, что с помощью микроскопа Керра можно исследовать только намагниченность внешнего слоя, состоящего из редкоземельного сплава, а на самом деле намагниченность ядра создает магнитное поле, которое влияет на намагниченность внешней оболочки. Более того, разные типы атомов по-разному взаимодействуют с оптическим излучением. Эффективность поглощения света редкоземельными металлами значительно ниже, чем переходными металлами. Поэтому в действительности в данных экспериментах можно по повороту плоскости поляризации света судить лишь о степени намагниченности подрешетки переходных металлов в оболочке DyPrFeCoB. При этом необходимо учитывать тот факт, что суммарное внешнее поле, определяющее намагниченность этих внешних слоев толщиной ~1 нм, складывается из внешнего поля и магнитного поля ядра микропровода. Поэтому не следует считать, что метод Керра нечувствителен к намагниченности тех слоев, которые лежат глубже 1 нм.

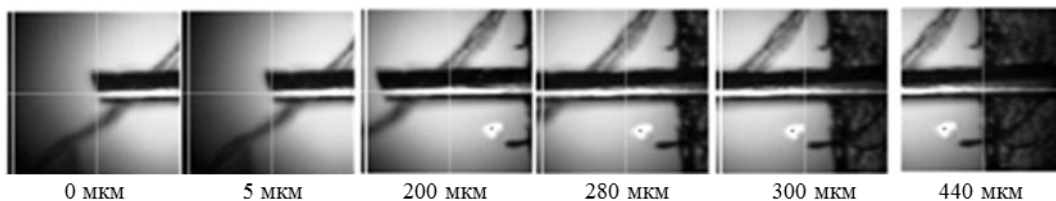


Рис. 2. Фрагменты микропровода, для которых записывали петли гистерезиса с помощью микроскопа Керра на разных расстояниях от конца микропровода

Поскольку известно, что поле рассеяния цилиндра влияет на его намагниченность сильнее всего на его концах, то в данных опытах можно было ожидать значительного изменения формы петель гистерезиса при продвижении от конца провода к его середине. Поэтому исследовали различные области одного и того же микропровода, показанные знаком «+» на рис. 2. Другим фактором, изменяющим вид локальных петель гистерезиса, является неоднородность микропровода, неконтролируемо затвердевающего из расплава с высокой скоростью. Все опыты выполняли при температуре 300 К, петли магнитного гистерезиса и изображения доменной структуры поверхности микропроводов записывали с помощью установки Durham Magneto-optics NanoMOKE3 для изучения полярного эффекта Керра. Микроскоп оснащен квадрупольным электромагнитом с диапазоном магнитного поля ± 1200 Э и разрешением 0,1 Э. В опытах использовали только одну катушку Гельмгольца, которая создавала магнитное поле строго вдоль оси микропровода. Полная длина микропровода составляла 2000 мкм, а его диаметр равен 50 мкм.

Результаты сканирования микропровода микроскопом Керра

На рис. 3 показаны результаты сканирования микропровода с помощью микроскопа Керра в постоянном магнитном поле напряженностью -800 (рис. 3, *a*) и -100 Э (рис. 3, *б*). Хорошо видна многослойная структура при распределении намагниченности. Это распределение вполне отвечает ранее установленному химическому распределению элементов в сечении микропровода. В центре видна сплошная область намагниченности – ядро, которое, согласно данным химического анализа, состоит из α -железа. Изменение магнитного поля ведет к осветлению приблизительно половины ядра, что можно интерпретировать как смещение доменной границы от конца провода к его середине так, что перекрестие на рис. 3, *б* приблизительно попадает на границу светлой и темной зон и соответствует переходной области (доменной стенке). Таким образом, микроскопия Керра позволяет исследовать не только стационарное распределение намагниченности, но и динамику доменных стенок с очень высоким временным разрешением до $0,1$ мкс. В данных опытах это разрешение использовано не было, а развертка поля осуществлялась со скоростью ~ 1 кЭ/с. Таким образом, два изображения на рис. 3 разделены во времени на $0,7$ с. Промежуточные снимки (не представлены на рис. 3) показывают постепенную эволюцию светлых и темных участков при изменении внешнего магнитного поля.

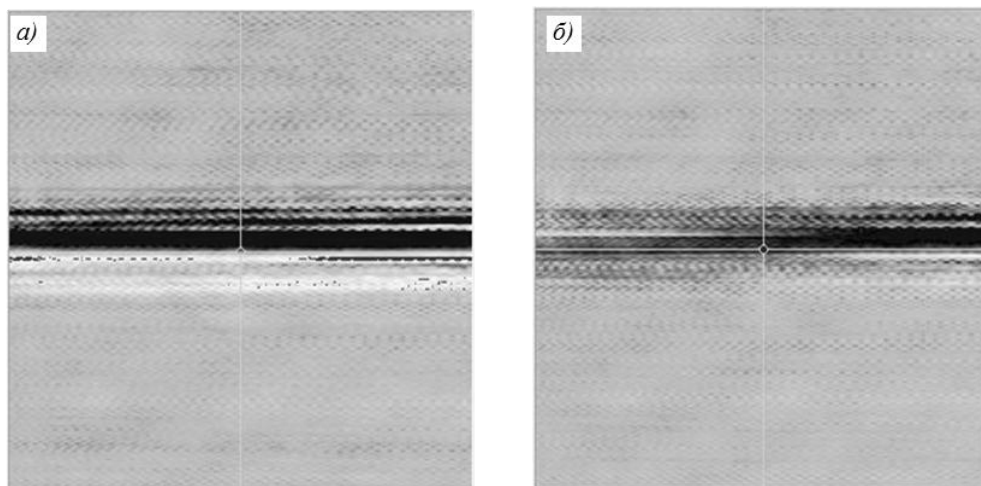


Рис. 3. Распространение домена в ядре микропровода в поле напряженностью -800 (*a*) и -100 Э (*б*)

Внешние слои микропровода демонстрируют противоположную тенденцию – являются светлыми в поле напряженностью -800 Э, когда ядро демонстрирует темный контраст. В поле напряженностью -100 Э, когда ядро светлеет, окружающая оболочка дает темный контраст. Следовательно, в диапазоне полей с напряженностью $-(100-800)$ Э можно говорить о противоположно направленных намагниченностях ядра и оболочки микропровода. Это хорошо согласуется с дальнейшей интерпретацией петель гистерезиса в данных опытах и подчеркивает многослойность микропровода. По рис. 3, вероятно, нельзя определить материал, из которого состоят слои, однако многослойный характер микропровода ясно виден. Кроме того, противоположный контраст ядра и оболочки свидетельствует о противоположном направлении намагниченности этих компонент микропровода.

На рис. 4 представлены все типы петель магнитного гистерезиса, которые встречаются при сканировании микропровода вдоль его длины. На каждом рисунке даны соответствующие расстояния исследуемого участка от конца провода. Видно, что всего имеется шесть типов гистерезисных петель.

Близко к краю микропровода (на расстоянии 15 мкм от него) форма петли напоминает бабочку и известна в научно-технической литературе под названием «бабочка» (рис. 4, *е*). Небольшой сдвиг от края на расстояние 20 мкм приводит к несимметричной петле со сдвигом в сторону положительного поля («обменное смещение» – на рис. 4, *б*). Ближе к центру провода на расстояниях 240 и 540 мкм наблюдаются петли гистерезиса, содержащие переходы между четырьмя или тремя состояниями намагниченности (рис. 4, *в*, *д*). В центре микропровода на расстоянии 740 мкм от его конца петля магнитного гистерезиса становится практически прямоугольной, демонстрируя переключение между бистабильными состояниями, хорошо известными для совершенных микропроводов (рис. 4, *а*). Следует отметить, что центр прямоугольной петли магнитного гистерезиса сдвинут на 4–5 Э от начала координат в сторону положительных полей. Этот эффект обменного смещения важен как для понимания физики магнетизма исследуемых микропроводов, так и для практического применения. Смещение петли гистерезиса в многослойных ферромагнитных структурах связано с тем, что магнитомягкая компонента (в данном случае – это ядро микропровода) испытывает влияние одной из магнитных подрешеток антиферромагнитной компоненты (в данных опытах – это ферромагнитная редкоземельная оболочка микропровода). Такое влияние называется обменным подмагничиванием и обусловлено обменным взаимодействием. Наконец, при приближении к другому концу провода на расстоянии 1440 мкм снова начинают наблюдаться петли гистерезиса с несколькими стабильными состояниями намагниченности (почти горизонтальные участки на рис. 4, *з*). Таким образом, сканирование микропровода позволяет выделять его участки с разными магнитными свойствами, обусловленными взаимодействием ядра и оболочки.

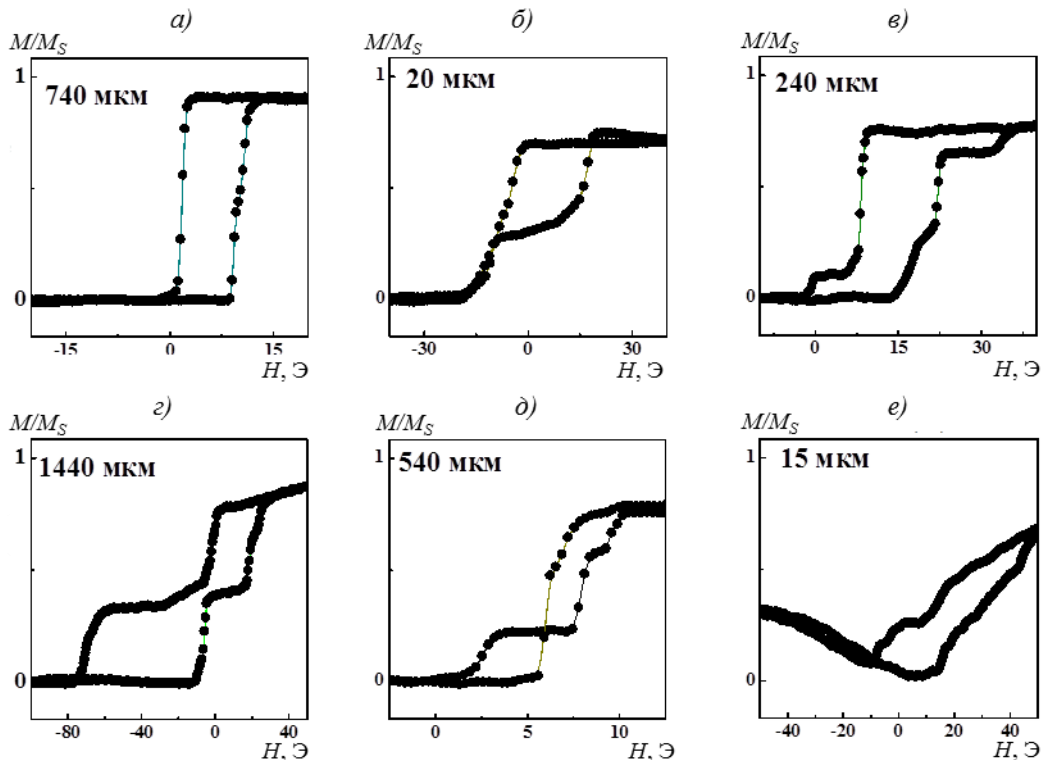


Рис. 4. Типы петель гистерезиса на разном удалении от конца микропровода (рис.1). Поворот плоскости поляризации света, пропорциональный намагниченности поверхности микропровода M , представлен в виде, нормированном на намагниченность насыщения M_S

Результаты и обсуждение

Обменное смещение прямо доказывает, что имеется обменный контакт между ферро- и антиферромагнетиком, т. е. ядро и оболочка связаны не магнитным дипольным, а обменным взаимодействием, которое является короткодействующим и действует на расстояниях ~ 1 нм и менее. При расстояниях между ферро- и антиферромагнетиком на уровне межатомных расстояний ($\sim 0,1$ нм) это обменное взаимодействие не позволило бы влиять внешнему магнитному полю на взаимную ориентацию намагниченности ядра и оболочки, потому что в этом случае величина обменного взаимодействия значительно (на много порядков) превышала бы зеемановское взаимодействие. Тогда в представленных опытах не наблюдались бы петли магнитного гистерезиса с несколькими стабильными состояниями, подобными тем, которые показаны на рис. 5. Можно предположить, что существует, например, немагнитный оксидный слой между ядром и оболочкой, который в среднем поддерживает расстояние между ферро- и ферромагнетиком на уровне ~ 1 нм. Именно при таком расстоянии обменное взаимодействие ослабевает настолько, что становится сравнимым с зеемановским взаимодействием во внешнем магнитном поле небольшой величины с напряженностью $\sim (100-1000)$ Э. Этот эффект используется в спинтронике для создания синтетических ферромагнетиков и спиновых вентилях, намагниченность которых нужно переключать внешним магнитным полем [6, 7]. Поэтому наибольший интерес представляют те петли гистерезиса из представленных на рис. 4, которые демонстрируют несколько (обычно четыре) стабильных состояний намагниченности, не меняющейся в магнитном поле, но скачком переключающихся в другие состояния (рис. 5). Такие петли магнитного гистерезиса можно назвать петлями «спин-вентильного» типа. Их возникновение можно объяснить тем, что имеется всего четыре взаимных ориентации намагниченностей ядра и оболочки (рис. 5).

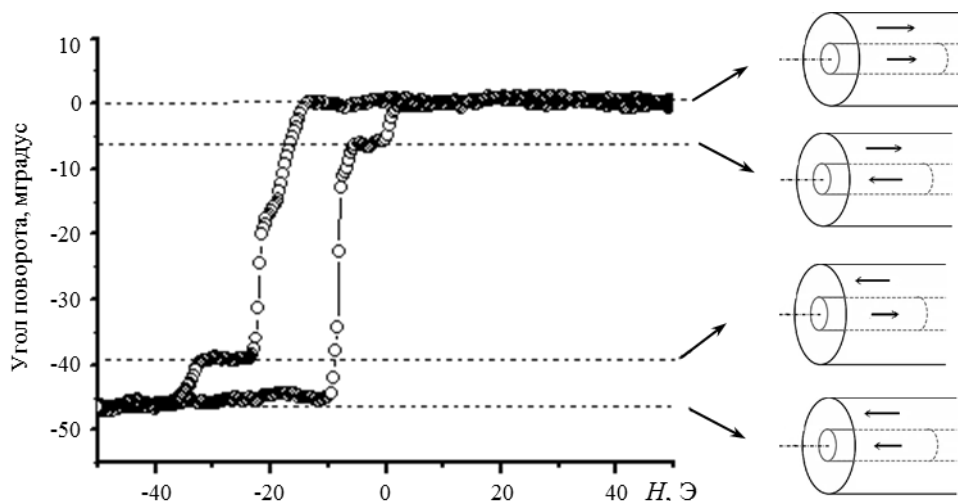


Рис. 5. Петля гистерезиса «спин-вентильного» типа, записанная на расстоянии 240 мкм от конца микропровода. Четыре уровня намагниченности микропровода показаны пунктирными линиями. На врезках показаны соответствующие ориентации намагниченности ядра и оболочки микропор

В общем случае величина намагниченности ядра не равна намагниченности оболочки, поэтому векторное сложение намагниченностей не приводит к нулевому значению полного магнитного момента. В результате каждому уровню намагниченности,

определяемому по горизонтальным участкам зависимости угла поворота плоскости поляризации от напряженности магнитного поля, можно найти соответствующую взаимную ориентацию ядра и оболочки (рис. 5).

В данной статье не приведены доказательства самого спин-вентильного эффекта, который требует исследования магнитосопротивления. Однако существенным представляется наличие обменного смещения при одновременном ступенчатом переключении состояния микропроводов. Это означает, что переключение намагниченностей и критические поля этого переключения могут определяться не дипольным магнитным взаимодействием, а обменным взаимодействием между ядром и оболочкой. Следует отметить, что ступенчатая петля намагниченности наблюдалась и ранее при отсутствии обменного взаимодействия [8]. Для этого было достаточно просто сложить вместе несколько микропроводов, переключение бистабильных состояний которых в разных полях давало ступенчатый гистерезис [8]. Однако в работе [8] центр петли гистерезиса лежал в начале координат, и поэтому, в отличие от приведенных в данной статье исследований, не было ни одной причины для упоминания сходства этого явления со спин-вентильными переключениями намагниченности в магнитном поле. Созданные авторами данной статьи микропровода впервые демонстрируют именно спин-вентильный эффект. Можно предполагать, что отсутствие ровного интерфейса, случайные вариации свойств и химического состава в микропроводе не позволят добиться высокого значения магнитосопротивления и использовать такие микропровода в спинтронике. Однако совершенствование технологии изготовления микропроводов с редкоземельной оболочкой [9], очевидно, является новой стратегией получения приборов спинтроники. Из приведенных на рис. 3 фотографий также следует, что количество слоев может значительно превышать два компонента (ядро и оболочку), рассмотренные для интерпретации рис. 5. Хотя химический анализ подтвердил распределение материала в виде сегрегированного железного ядра и окружающей аморфной оболочки, можно допустить, что вариация режимов сверхскоростного охлаждения может приводить к более разнообразным многослойным структурам с важными функциональными свойствами. Современные технологии применения микропроводов подробно описаны в монографии [10], где можно насчитать десятки устройств, основанных на магнитных микропроводах.

Заключения

Вариации толщины ядра α -Fe и редкоземельной оболочки DyPrFeCoB микропровода наряду с изменением поля рассеяния по мере удаления от его конца создают вариативность локальных петель магнитного гистерезиса, записанных в его разных частях. Встречаются три основных типа петель гистерезиса: вблизи конца микропровода – скошенная петля сложной формы «бабочка», ближе к середине микропровода – петли с несколькими стационарными уровнями намагниченности (до четырех) либо прямоугольная петля со смещением. Последние два типа петель гистерезиса свидетельствуют о наличии обменного смещения на границе между ядром и оболочкой, которое, в свою очередь, свидетельствует об обменно-связанных системах ферро- и ферримагнетика, аналогичных спин-вентильным структурам. Созданные микропровода демонстрируют предпосылки к их возможному использованию для создания новых типов сенсоров, действующих на основе переключения намагниченностей ядра и оболочки и соответствующего изменения магнитосопротивления [10–15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Валеев Р.А. и др. Термостабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой на основе Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B // Физика и химия обработки материалов. 2011. Т. 3. С. 43–47.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Зависимость свойств спеченных материалов системы Nd–Dy–Fe–Co–B от технологических параметров // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S2 (39). С. 24–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-24-29.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Резчикова И.И. Механизм влияния содержания бора и термообработки на свойства магнитов системы Nd–Fe–Al–Ti–B // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S2 (39). С. 30–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-30-34.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Коплак О.В., Горнаков В.С., Кабанов Ю.П., Куницына Е.И., Шашков И.В. Температурная зависимость обменной анизотропии ферритмагнитной пленки GdFeCo, связанной с антиферромагнетиком IrMn // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 2019. Т. 109. Вып. 11. С. 753–760.
6. Fache T., Tarazona H.S., Lu Y. et al. Nonmonotonic aftereffect measurements in perpendicular synthetic ferrimagnets // Physical Review B. 2018. Vol. 98. P. 064410–064418.
7. Morgunov R., Lu Y., Lavanant M. et al. Magnetic aftereffects in CoFeB/Ta/CoFeB spin valves of large area // Physical Review B. 2017. Vol. 96 (5). P. 054421.
8. Knobel M., Sampaio L.C., Sinnecker E.H.C.P. et al. Dipolar magnetic interactions among magnetic microwires // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002. Vol. 249. P. 60–72.
9. Пискорский В.П., Королев Д.В., Валеев Р.А., Моргунов Р.Б., Куницына Е.И. Физика и инженерия постоянных магнитов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 360 с.
10. Peng H., Qin F., Phan M. Ferromagnetic Microwire Composites From Sensors to Microwave Applications // Engineering Materials and Processes. Springer, 2016. 240 p.
11. Draganová K., Blažek J., Praslička D., Kmec F. Possible applications of magnetic microwires in aviation // Journal of Fatigue of Aircraft Structures. 2013. Vol. 1. P. 12–17.
12. Panina L., Ipatov M., Zhukova V. et al. Tuneable Composites Containing Magnetic Microwires // Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses. 2011. P. 431–461.
13. Evstigneeva S., Morchenko A., Trukhanov A. Structural and magnetic anisotropy of directionally – crystallized ferromagnetic microwires // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 185. P. 04022.
14. Baranov S.A. Cast Amorphous Magnetic Microwires for Medical Applications // Advanced in Biotechnology and Microbiology. 2018. Vol. 8 (3). P. 555736.
15. Szary P., Luciu I., Duday D. et al. Synthesis and magnetic properties of Ta/NdFeB-based composite microwires // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 117. P. 17D134.