

05,13

Формирование обменного смещения и анизотропия формы в микрообъектах на основе спиновых клапанов

© А.А. Гермизина¹, Л.И. Наумова^{1,2}, М.А. Миляев^{1,2}, Р.С. Заворницын^{1,2}, А.Ю. Павлова¹, И.К. Максимова¹, В.В. Проглядо¹, И.Ю. Каменский¹, В.В. Устинов^{1,2}

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Институт естественных наук и математики Уральского федерального университета им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: germizina@imp.uran.ru

Поступила в Редакцию 3 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 мая 2023 г.

Принята к публикации 4 мая 2023 г.

Из пленки спинового клапана изготовлены микрообъекты в виде ромба, образованного полосками шириной два микрометра. Исследовано влияние анизотропии формы на поворот магнитных моментов слоев при перемагничивании спинового клапана. Найден способ двухэтапной термомагнитной обработки в фиксированном по направлению магнитном поле, позволяющий получить противоположные по знаку величины полей обменного сдвига в непараллельных сторонах ромба. Формируемый обменный сдвиг зависит от угла отклонения микрополоски от оси одноосной анизотропии и от приложенного при термомагнитной обработке магнитного поля. На основе имеющего форму ромба микрообъекта, изготовленного из единой пленки спинового клапана, реализовано устройство представляющее собой полный мост Уитстона. Каждая сторона ромба является активным магниточувствительным элементом.

Ключевые слова: спиновый клапан, обменное смещение, анизотропия формы, мост Уитстона, микрообъект.

DOI: 10.21883/FTT.2023.08.56152.76

1. Введение

Наноструктуры типа спиновый клапан обладают гигантским магниторезистивным эффектом, хорошо воспроизводимым стабильно высоким магнитосопротивлением и высокой магниторезистивной чувствительностью в слабых полях. Эти характеристики позволяют использовать спиновые клапаны в сенсорах магнитного поля [1,2].

Спиновый клапан является многослойной структурой, в которую входят два ферромагнитных (FM) слоя, разделенные немагнитным слоем меди, антиферромагнитный (AFM) слой, буферный и защитный слой. Один из FM-слоев, называемый закрепленным, находится рядом с антиферромагнитным и связан с ним обменным взаимодействием. В результате возникает однонаправленная магнитная анизотропия с осью однонаправленной анизотропии (PD). Петля гистерезиса перемагничивания закрепленного слоя сдвинута в область больших полей. Величина поля сдвига (H_{ex}) характеризует обменное взаимодействие на границе FM/AFM. Второй FM-слой называется свободным и перемагничивается в малых полях. Сдвиг низкополевой петли гистерезиса (H_j) определяется характерным полем взаимодействия FM-слоев, разделенных слоем меди [3]. При напылении в магнитном поле в спиновом клапане формируется одноосная анизотропия с осью легкого намагничивания (EA), параллельной приложенному при напылении магнитному

полю. В микрообъектах большое значение имеет анизотропия формы [4].

Часто в спиновом клапане для расширения интервала рабочих температур закрепленный слой заменяют синтетическим антиферромагнетиком — САФ [5,6]. САФ состоит из двух FM-слоев, разделенных слоем рутения и связанных антиферромагнитным RKKY-взаимодействием. В этом случае ферромагнитный слой, соседствующий с антиферромагнетиком, называют закрепленным, другой FM-слой — референтным. САФ при определенной величине приложенного поля (H_{sf}) переходит в спин-флоп состояние. При $H = H_{sf}$ магнитные моменты закрепленного (M_p) и референтного (M_r) слоев антипараллельны и перпендикулярны приложенному полю. При уменьшении приложенного поля ($H < H_{sf}$) M_p и M_r ориентируются параллельно H и антипараллельно друг другу, а при возрастании поля ($H > H_{sf}$) M_p и M_r поворачиваются, устанавливаясь в направлении H .

Направление PD в спиновом клапане можно изменить с помощью термомагнитной обработки (ТМТ). ТМТ состоит из нагрева спинового клапана до температуры выше температуры блокировки (T_b), при которой поле H_{ex} стремится к нулю, и последующего охлаждения. При охлаждении PD формируется вновь и совпадает с направлением магнитного момента M_p закрепленного FM-слоя.

При конструировании различных электронных устройств, работа которых связана с фиксацией изме-

нений магнитного поля и измерением его величины, магниточувствительные элементы часто соединяют в соответствии с электрической схемой моста Уитстона [7–11]. Это позволяет избежать температурного дрейфа, уменьшить шум и получить выходной сигнал симметричный относительно $H = 0$ [10]. Принцип работы моста Уитстона основан на измерении разности потенциалов (U_{out}) между средними выводами двух параллельных ветвей. В каждой ветви последовательно соединены два магниточувствительных элемента (плеча). Максимальное соотношение между напряжением питания, подаваемым на ветви моста, (U_{in}) и U_{out} получается, если при изменении магнитного поля в двух плечах моста электросопротивление увеличивается, а в двух других — уменьшается. Такая схема с четырьмя активными элементами называется полным мостом Уитстона.

Если активными элементами моста Уитстона являются спиновые клапаны, то их PD должны быть взаимно попарно противоположны. Для получения требуемой ориентации PD используются следующие методики: двухэтапное последовательное напыление спиновых клапанов с разными направлениями PD [12] и EA [13] или с различной композицией [14] на соответствующие части подложки; проведение ТМТ в поле, соответствующем спин-флоп состоянию в САФ [6,13]; использование постоянного магнита, для создания дополнительных противоположно направленных составляющих поля в активных элементах моста [11].

Ранее нами в работе [13] была предложена методика формирования попарно противоположного обменного сдвига и перпендикулярного взаимного расположения PD и EA в спин-вентильных элементах моста Уитстона. Методика заключалась в двухэтапном напылении пленки спинового клапана на соответствующие части подложки для получения взаимно перпендикулярных направлений EA и последующей трехэтапной ТМТ с использованием поля спин-флоп перехода H_{sf} .

В настоящей работе исследуются обусловленные сочетанием анизотропии формы, однонаправленной и одноосной анизотропии особенности перемагничивания спиновых клапанов и влияние анизотропии формы на изменения обменного смещения при термомагнитной обработке микрообъектов на основе спиновых клапанов. С учетом полученных данных найдена методика формирования попарно противоположного обменного сдвига при малом угле отклонения PD от EA в спин-вентильных элементах моста Уитстона.

2. Эксперимент

Спиновые клапаны композиции

$Ta(5\text{ nm})/[Ni_{80}Fe_{20}]_{60}Cr_{40}(5\text{ nm})/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}(t_{FMF})/Cu(t_{Cu})/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}(t_{FMR})/Ru(0.8\text{ nm})/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}(t_{FMP})/Fe_{50}Mn_{50}(t_{AFM})/Ta(6\text{ nm})$ изготовлены методом магнетронного напыления при комнатной температуре на подложках из стекла $25 \times 25\text{ mm}$. Во время напыления

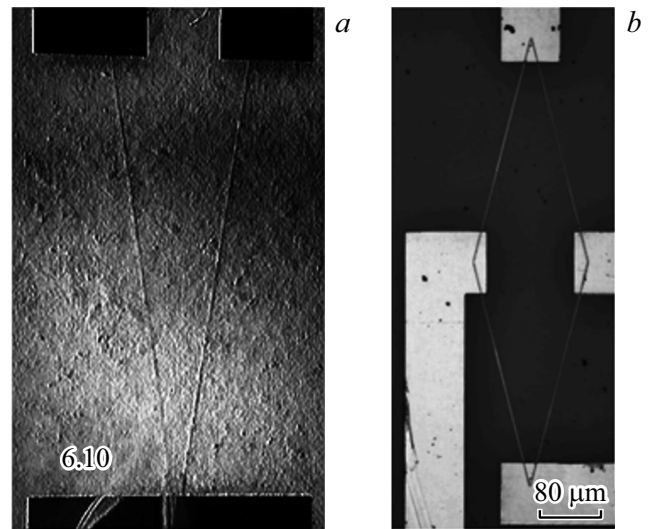


Рис. 1. Фотографии микрообъектов: *a* — образец V-формы. Ширина микрополосок $w = 6\ \mu\text{m}$, угол между микрополоской и EA 10° ; *b* — микрообъект в форме ромба.

магнитное поле напряженностью $H = 80\text{ Oe}$ было приложено в плоскости подложки. Трехслойная структура $Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}/Ru/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}$ является синтетическим антиферромагнетиком.

Толщины слоев указаны в нанометрах. Толщина слоя меди $t_{Cu} = 2, 2.1$ и 2.4 nm , при толщинах свободного FM-слоя $t_{FMF} = 3.5$ и 4 nm , референтного FM-слоя $t_{FMR} = 3.1, 3.5, 4$ и 4.3 nm , закрепленного FM-слоя $t_{FMP} = 3$ и 3.3 nm и AFM-слоя $t_{AFM} = 10$ и 11 nm .

Для изготовления микрообъектов применяли метод безмасочной лазерной литографии с использованием установки DWL 66+ производства Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH. Изготовлены следующие три вида микрообъектов. (1) Микрополоски шириной $w = 1, 4$ и $6\ \mu\text{m}$ длинная сторона которых параллельна EA. (2) Объекты V — формы, представляющие собой две образующие угол микрополоски с медными контактными площадками в вершине угла и на концах микрополосок. Величина угла равна $20, 40$ и 60° , а его биссектриса совпадает с EA (рис. 1, *a*). (3) Микрообъекты, имеющие форму ромба (рис. 1, *b*) с медными контактными дорожками на углах. Сторонами ромба являются микрополоски длиной $315\ \mu\text{m}$ и шириной $2\ \mu\text{m}$. Угол при вершине ромба равен 40° . EA направлена вдоль длинной диагонали ромба. Этот микрообъект предназначен для реализации электрической схемы моста Уитстона. Контактные площадки и дорожки изготавливали при помощи lift-off-процедуры.

Измерения магнитосопротивления и ТМТ проводили в установке, собранной на базе электромагнита фирмы Bruker и температурного контроллера LakeShore 336. Сопротивление измеряли четырехконтактным методом при протекании постоянного тока в плоскости пленки.

Магнитосопротивление определяли, как

$$\Delta R/R_s = (R(H) - R_s)/R_s,$$

где $R(H)$ — сопротивление образца в магнитном поле и R_s — сопротивление в поле насыщения (H_{sat}). В процессе ТМТ отжиг проводили в атмосфере гелия при температуре $T_{ТМТ} = 448$ К, превышающей температуру блокировки T_b , которая для спиновых клапанов с САФ на основе антиферромагнитного сплава FeMn составляет $T_b = 423-433$ К [5].

Для проведения магнитных измерений использовали автоматизированный вибрационный магнитометр.

При измерении зависимости выходного напряжения от приложенного поля моста Уитстона постоянное напряжение $U_{in} = 5$ В подавали на контактные площадки в острых углах ромба. Измеряемый сигнал $U_{out}(H)$ снимали с контактных площадок в тупых углах ромба.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Влияние анизотропии формы на перемагничивание спиновых клапанов

Для выявления влияния размеров и формы образца на перемагничивание спиновых клапанов были измерены полевые зависимости магнитосопротивления для микрополосок различной ширины. На рис. 2, *a* представлены магниторезистивные кривые для микрополосок $w = 6$ и $1 \mu\text{m}$, измеренные в поле, приложенном параллельно $PD \parallel EA$ и длинной стороне микрополоски. При $w = 1 \mu\text{m}$ ширина низкополевой петли, характеризующая гистерезис перемагничивания свободного слоя, больше, чем при $w = 6 \mu\text{m}$. По остальным параметрам полученные магниторезистивные кривые очень близки.

При обсуждении результатов измерений мы будем использовать взаимодействие между слоями в спиновом клапане и изменения его магнитосопротивления для понимания ориентации магнитных моментов свободного, референтного и закрепленного слоев.

Известно, что зависимость сопротивления спинового клапана от угла (ϕ) между магнитными моментами свободного слоя \mathbf{M}_f и референтного слоя \mathbf{M}_r описывается выражением

$$R(\phi) = R_P + (R_{AP} - R_P)(1 - \cos \phi)/2, \quad (1)$$

где R_P и R_{AP} — сопротивления спинового клапана при сонаправленном и противоположном состоянии \mathbf{M}_f и \mathbf{M}_r .

Максимальное магнитосопротивление $(\Delta R/R_s)_{\max}(\parallel)$ (рис. 2, *a*) соответствует $\phi = 180^\circ$ и составляет 10.8 и 11.3% при $w = 1$ и $6 \mu\text{m}$.

На рис. 2, *b* показана полевая зависимость магнитосопротивления полученная в поле, приложенном перпендикулярно PD для микрополоски $w = 6 \mu\text{m}$. Полученные для $w = 4$ и $6 \mu\text{m}$ зависимости $(\Delta R/R_s)(H)$

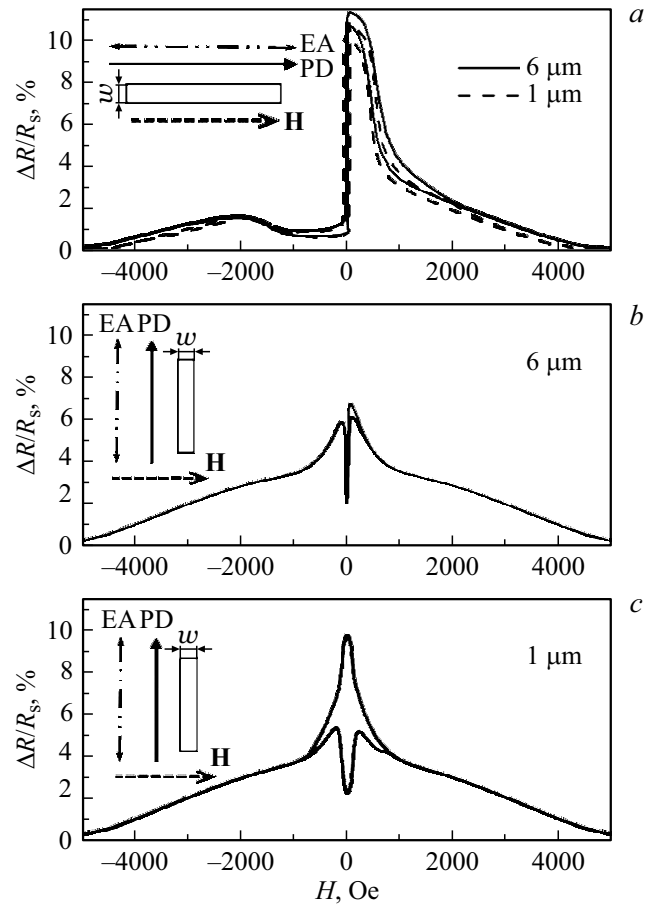


Рис. 2. Полевые зависимости магнитосопротивления для микрополосок спинового клапана Ta(5)/NiFeCr(5)/CoFeNi(4)/Cu(2.1)/CoFeNi(4)/Ru(0.8)/CoFeNi(3)/FeMn(10)/Ta(5) ($w = 6$ и $1 \mu\text{m}$). Вставки: направление EA и PD по отношению к микрополоске и приложенному полю.

типичны для спиновых клапанов при измерении в поле $\mathbf{H} \perp PD$. А именно, максимальное магнитосопротивление $(\Delta R/R_s)_{\max}(\perp) \approx 0.5(\Delta R/R_s)_{\max}(\parallel)$, что соответствует $\phi \approx 90^\circ$ [15].

Для микрополоски шириной $w = 1 \mu\text{m}$ магниторезистивная кривая выглядит совершенно иначе (рис. 2, *c*). В частности, на нисходящей ветви петли гистерезиса магнитосопротивление достигает величины

$$(\Delta R/R_s)_{\max}(\perp) \approx (\Delta R/R_s)_{\max}(\parallel),$$

соответственно $\phi \approx 180^\circ$.

При перемагничивании происходят следующие изменения направления магнитных моментов свободного, референтного и закрепленного слоев спинового клапана. Когда приложенное поле $H \geq H_{sat}$, магнитные моменты \mathbf{M}_f , \mathbf{M}_r и магнитный момент закрепленного слоя \mathbf{M}_p сонаправлены и параллельны полю, а магнитосопротивление минимально. При уменьшении приложенного поля \mathbf{M}_r и \mathbf{M}_p , благодаря обменному взаимодействию через прослойку рутения, разворачиваются антипарал-

тельно друг другу, а затем ориентируются вдоль PD из-за взаимодействия на границе FM/AFM. Это приводит к возрастанию угла φ и магнитосопротивления.

На рис. 3 показана область малых полей для магниторезистивных кривых (рис. 2, *b, c*) полученных для микрополосок ширины $w = 1$ и $6 \mu\text{m}$, а также ориентация \mathbf{M}_f и \mathbf{M}_r .

При $w = 6 \mu\text{m}$ изменение поля соответствующее восходящей или нисходящей петле гистерезиса вызывает поворот момента \mathbf{M}_f по часовой или против часовой стрелки. Для образцов с $w = 1 \mu\text{m}$ аналогичные изменения магнитного поля приводят к принципиально другим изменениям, а именно, \mathbf{M}_f совершает полный оборот в плоскости пленки вокруг нормали к ней. Для реализации такого механизма перемагничивания необходимо, чтобы поворот магнитного момента в одном направлении, например, против часовой стрелки, был энергетически более выгодным. По-видимому, именно такие условия реализуются при наличии малого угла (β) отклонения от параллельной взаимной ориентации PD \parallel EA и длинной стороны микрополоски, как это показано на рис. 3 для случая $w = 1 \mu\text{m}$. Появление этого отклонения очень вероятно при литографическом изготовлении микрообъектов.

В малых полях анизотропия формы влияет на ориентацию магнитных моментов слоев, поэтому \mathbf{M}_f , \mathbf{M}_r и \mathbf{M}_p стремятся выстроиться вдоль микрополоски при ее малой ширине.

На рис. 4 показаны низкополевые части петель магнитного гистерезиса, измеренных в поле, приложенном параллельно и перпендикулярно EA спинового клапана. Величины эффективного поля одноосной анизотропии (H_a) и магнитного момента свободного слоя оценивали так, как показано на рисунке.

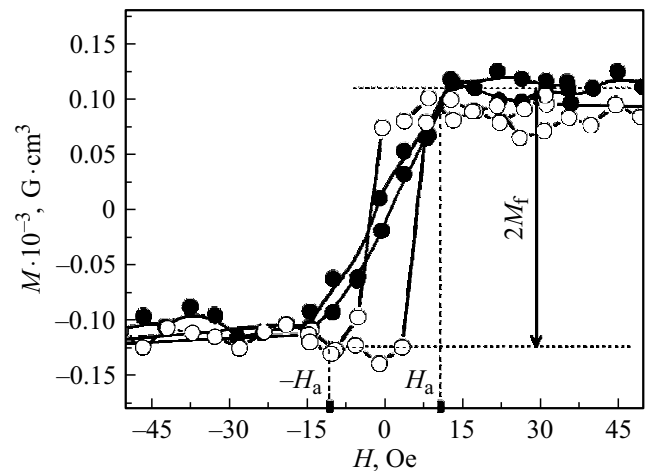


Рис. 4. Петли магнитного гистерезиса спинового клапана Ta(5)/NiFeCr(5)/CoFeNi(4)/Cu(2.1)/CoFeNi(4)/Ru(0.8)/CoFeNi(3)/FeMn(10)/Ta(6), полученные в малых полях при приложении поля вдоль (линия с пустыми символами) и перпендикулярно (линия с заполненными символами) EA.

Эффективное поле анизотропии формы можно оценить, воспользовавшись выражением [16]:

$$H_{sh} = 4\pi M_s t_{FM} / w, \quad (2)$$

где M_s — спонтанная намагниченность, t_{FM} — толщина ферромагнитного слоя, w — ширина микрополоски.

Оценим величину спонтанной намагниченности как $M_s \approx M_f / V_{FMF} \approx 480 \text{ G}$, где V_{FMF} — объем свободного слоя. Тогда при толщине свободного ферромагнитного слоя $t_{FMF} = 4 \text{ nm}$ и ширине полоски $w = 1 \mu\text{m}$, можно оценить величину $H_{sh} = 24.1 \text{ Oe}$, соответственно, при $w = 6 \mu\text{m}$ $H_{sh} = 4 \text{ Oe}$. Эффективное поле одноосной анизотропии для спинового клапана такой композиции $H_a \approx 10 \text{ Oe}$ (рис. 4).

Для микрополосок с шириной $w = 1 \mu\text{m}$ $H_{sh} > H_a$. Тогда при $H \approx 0$ для магнитных моментов закрепленного, референтного и свободного слоев энергетически выгодной будет ориентация вдоль микрополоски, а не вдоль EA.

Таким образом, при малой ширине микрополоски появляется возможность управлять перемагничиванием \mathbf{M}_f и связанных с ним обменными взаимодействиями \mathbf{M}_r и \mathbf{M}_p , меняя величину магнитного поля и угол его отклонения от длинной стороны микрообъекта.

3.2. Формирование неколлинеарных осей однонаправленной анизотропии в отклоненных друг от друга микрополосках при термомагнитной обработке

Следующую серию экспериментов проводили на микрообъектах V-формы с шириной микрополосок $w = 1, 6$ и $8 \mu\text{m}$, отклоненных в разные стороны от EA на углы $10, 20$ и 30° . Выше было показано, что при

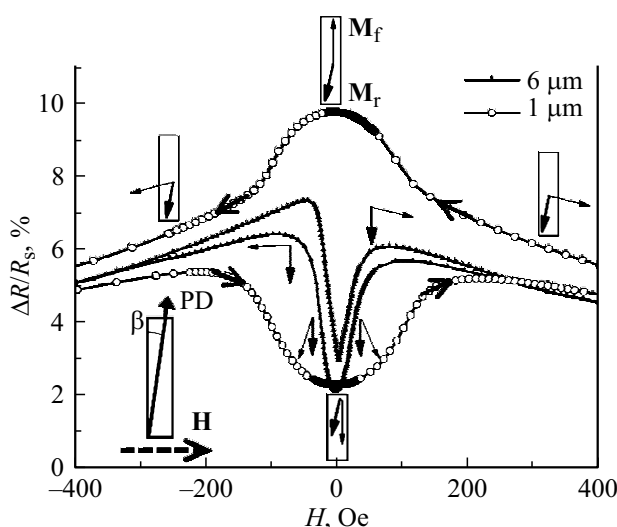


Рис. 3. Область малых полей для магниторезистивных кривых (рис. 2, *b, c*). Стрелками на магниторезистивной кривой указано направление изменения магнитного поля при измерении. Вставки: направление PD и поля по отношению к микрополоске, направление магнитных моментов \mathbf{M}_f и \mathbf{M}_r .

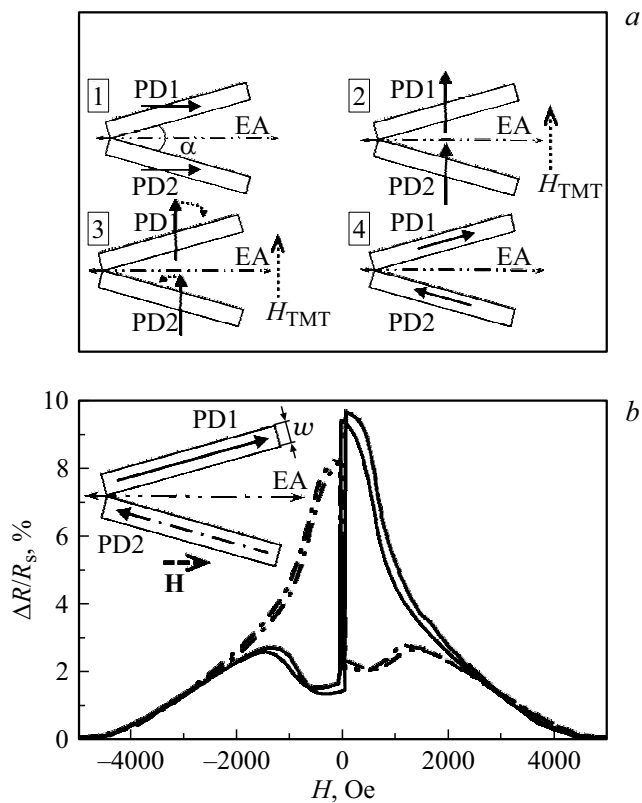


Рис. 5. *a* — этапы ТМТ с обозначенными направлениями EA , поля ТМТ, $PD1$ и $PD2$, *b* — полевые зависимости магнитосопротивления для микрополосок ($w = 1 \mu\text{m}$) спинового клапана $Ta(5)/NiFeCr(5)/CoFeNi(3.5)/Cu(2)/CoFeNi(3.1)/Ru(0.8)/CoFeNi(3.3)/FeMn(11)/Ta(6)$, отклоненных от EA на 10° , снятые после ТМТ. Вставка: направления EA , $PD1$ и $PD2$ и поля, приложенного при измерении магниторезистивных кривых.

$H \approx 0$ анизотропия формы и отклонение микрополосок от приложенного магнитного поля влияют на поворот магнитных моментов слоев спинового клапана при перемагничивании. Можно предположить, что при определенной малой величине приложенного поля направления магнитных моментов M_p в микрополосках будут существенно разными, несмотря на то, что микрообъект V-формы изготовлен из единой пленки и, соответственно, композиция спинового клапана в двух микрополосках одинакова. Если в этом поле произвести ТМТ, то при $T > T_b$ обменное взаимодействие между закрепленным FM и AFM слоем разрушится, а затем при охлаждении в магнитном поле сформируется вновь, задавая новые направления $PD1$ и $PD2$ в микрополосках. Важно, что $PD1$ и $PD2$ будут сонаправлены с M_p в момент ТМТ, т.е. не сонаправлены друг с другом.

Задачей этого этапа исследований было формирование осей однонаправленной анизотропии $PD1$ и $PD2$ в двух микрополосках образца V-формы так, чтобы угол между $PD1$ и $PD2$ был близок к 180° .

ТМТ проводили в магнитном поле H_{TMT} приложенном перпендикулярно биссектрисе угла между микро-

полосками и, следовательно, $H_{TMT} \perp EA$. ТМТ состояла из следующих двух этапов. (I) Нагрев до температуры $T_{TMT} = 445 \text{ K}$, отжиг в течение 10 минут и охлаждение до комнатной температуры в магнитном поле $H_{TMT} \approx 9 \text{ kOe}$, ($H_{TMT} > H_{sat}$). При этом в микрополосках формируются новые PD, сонаправленные с H_{TMT} (рис. 5, *a*, фрагмент 2). (II) Нагрев и охлаждение в магнитном поле, как можно более близком к $H = 0$. В таком поле при $T > T_b$ магнитные моменты M_f , M_r и M_p ориентируются параллельно EA или вдоль микрополоски, в зависимости от соотношения между величинами полей H_a и H_{sh} . Если $H_{sh} > H_a$, то связанные РККУ взаимодействием M_r и M_p в обеих микрополосках выстраиваются вдоль них. Совершая энергетически более выгодный поворот на меньший угол, магнитные моменты в одной микрополоске образца V-формы поворачиваются по часовой, а в другой — против часовой стрелки. Например, если микрополоски отклонены друг от друга на 20° , то угол между M_p в разных микрополосках будет близок к 160° . Дальнейшее охлаждение до комнатной температуры ведет к формированию в микрополосках осей $PD1$ и $PD2$, сонаправленных с M_p (рис. 5, *a*, фрагменты 3 и 4).

На рис. 4, *b* представлены полевые зависимости магнитосопротивления для двух микрополосок образца V-формы, измеренные в поле, приложенном параллельно EA после ТМТ. Характер полученных магниторезистивных кривых свидетельствует о том, что проекция $PD1$ на приложенное магнитное поле положительна, а в проекция $PD2$ — отрицательна. Эффект наблюдается для микрополосок шириной $w = 1, 6$ и $8 \mu\text{m}$. Угол отклонения сформированных $PD1$ и $PD2$ от EA спинового клапана равен углу отклонения микрополоски от EA и для разных образцов составляет $10, 20$ или 30° . Соответственно, для полученных после ТМТ магниторезистивных кривых характерны резкое изменение магнитосопротивления в малых полях и большая ширина низкополевой петли гистерезиса.

Описанную выше процедуру двухэтапной ТМТ применили к образцам V-формы, с разной толщиной слоя меди в спиновом клапане $t_{Cu} = 2$ и 2.4 nm . При изменении t_{Cu} меняются наклон, ширина и сдвиг низкополевой петли гистерезиса магнитосопротивления спинового клапана [3]. Полученные после ТМТ низкополевые части магниторезистивных кривых для разных микрополосок образцов V-формы показаны на рис. 6.

Для образца с толщиной слоя меди 2 nm низкополевые петли гистерезиса имеют меньшее смещение от $H = 0$, меньший наклон и меньшую ширину. В данном случае важно, что петли гистерезиса, полученные от разных микрополосок образца V-формы находятся ближе друг к другу. Соответственно, при $t_{Cu} = 2 \text{ nm}$ магнитные моменты M_f в одной и другой микрополоске при перемагничивании спинового клапана поворачиваются в противоположные стороны в очень близких полях. Именно такой согласованный поворот M_f предпочтитель-

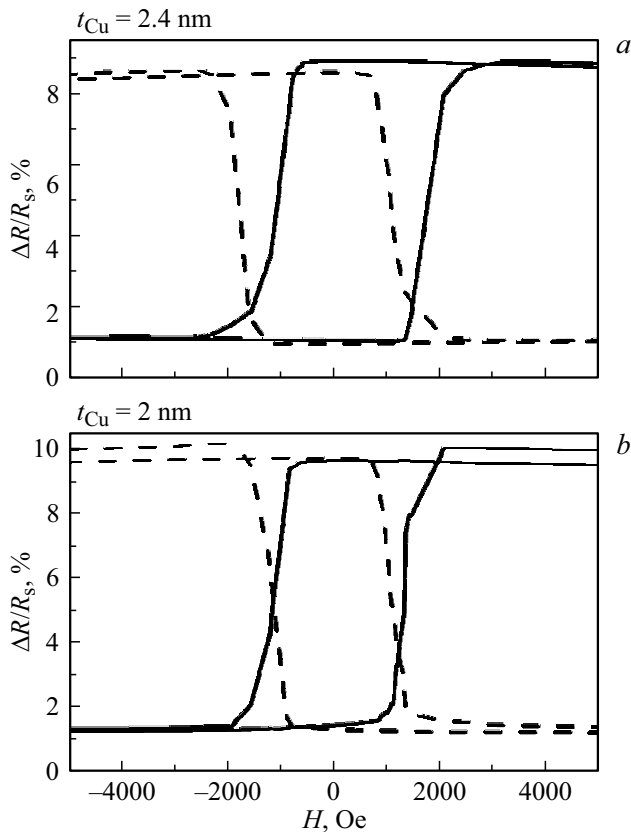


Рис. 6. Полученные после ТМТ низкополевые части магниторезистивных кривых микрополосок образцов V-формы, сформированных из спиновых клапанов с разной толщиной слоя меди 2.4 и 2 nm.

лен при объединении микрополосок спинового клапана в соответствии со схемой полного моста Уитстона.

Таким образом, обе микрополоски образца V-формы были подвергнуты единой двухэтапной ТМТ в фиксированном по направлению магнитном поле и, тем не менее, в микрополосках сформировались новые направления PD1 и PD2, развернутые друг от друга на угол близкий к 180°. Факторами, задающими направления новых PD1 и PD2, являются анизотропия формы и углы отклонения микрополоски от EA и от приложенного при ТМТ магнитного поля.

3.3. Реализация схемы полного моста Уитстона путем единой термомагнитной обработки

Описанный выше режим ТМТ использовали для формирования попарно противоположных направлений PD в элементах моста Уитстона. Микрообъект имеющий форму ромба подобен двум объединенным образцам V-формы. При этом две микрополоски отклонены от EA в одну сторону, а две — в другую. После проведения описанной выше процедуры ТМТ в магнитном поле $H_{ТМТ} \perp EA$, приложенном вдоль короткой диагонали ромба, в образующих стороны ромба микрополосках

спиновых клапанов сформировались новые попарно противоположные PD.

На рис. 7, a представлена зависимость выходного напряжения моста Уитстона с шириной микрополосок 2 μm и углом в вершине ромба 40° от приложенного магнитного поля. Поле при измерении было приложено вдоль длинной диагонали ромба. Напряжение питания $U_{in} = 5 V$. Ширина петли гистерезиса составляет 43 Oe, чувствительность к изменению магнитного поля — 3 mV/V/Oe. Резкая зависимость магнитосопротивления от поля и наличие гистерезиса характерны для спиновых клапанов при малом отклонении PD от EA.

В полном мосте Уитстона, схема которого представлена на рис. 7, b, каждый из четырех элементов имеет сопротивление R, которое в магнитном поле изменяется на величину ΔR. Соотношение между U_{in} и величиной выходного сигнала U_{out} можно оценить как [13]:

$$U_{out} = U_{in} \Delta R / R. \tag{3}$$

В полученном мосте Уитстона отношение $U_{out} / U_{in} = 0.06$ не достигает максимально возможного для используемых спиновых клапанов $(\Delta R / R_s)_{max} = 0.08$. Поле, приложенное при измерении отклонено на 20 градусов от направления PD во всех спин-вентильных

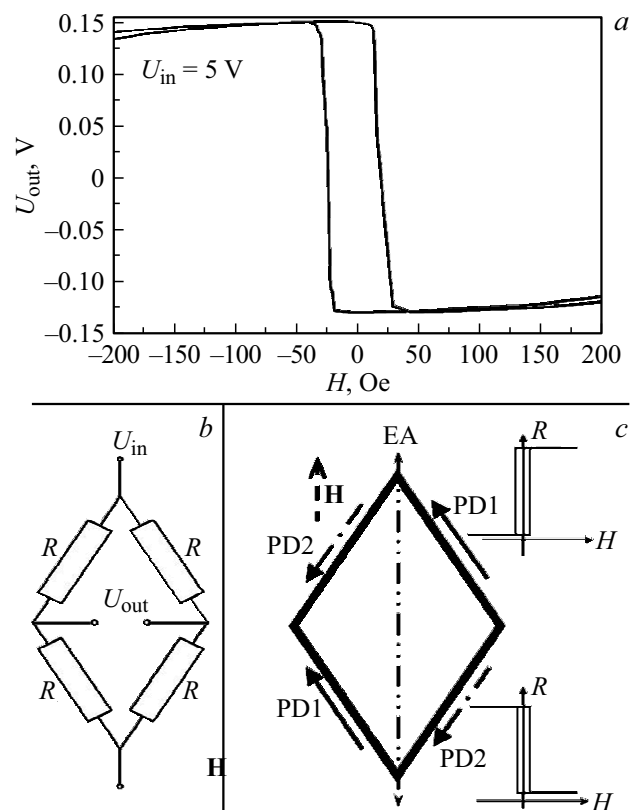


Рис. 7. a — зависимость напряжения U_{out} от магнитного поля, b — электрическая схема моста Уитстона, c — схема моста Уитстона с преимущественным направлением PD спинового клапана в каждом плече и соответствующие полевые зависимости магнитосопротивления.

элементах моста, соответственно, угол φ между M_r и M_f в слабых полях составляет около 160 градусов (рис. 7, с). Используя выражение (1), получаем для магнитосопротивления величину $\Delta R/R_s = 0.07$, которая близка к $U_{out}/U_{in} = 0.06$. Проведенные оценки позволяют предположить, что после описанной выше процедуры ТМТ в спин-вентильных элементах магнитная фаза с нежелательным направлением РД присутствует в очень незначительном количестве.

4. Заключение

Показано, что в слабых магнитных полях при малой ширине микрополоски анизотропия формы может управлять поворотом магнитных моментов слоев при перемагничивании спинового клапана.

Найден режим термомагнитной обработки, формирующей попарно противоположные оси однонаправленной анизотропии в сторонах имеющего форму ромба микрообъекта на основе спинового клапана. Если ось легкого намагничивания совпадает с большей диагональю ромба, а поле при термомагнитной обработке направлено вдоль меньшей диагонали, то в непараллельных сторонах ромба формируются противоположные по знаку поля обменного сдвига.

Сенсор, представляющий собой полный мост Уитстона, изготовлен из единой пленки спинового клапана путем формирования ромба с контактными площадками методом лазерной литографии и последующей термомагнитной обработки в фиксированном по направлению магнитном поле.

Полевая зависимость выходного сигнала сенсора имеет форму ступени, характеризуется высокой чувствительностью к изменению поля и наличием гистерезиса. Такие характеристики востребованы в устройствах переключения.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки (тема „Спин“, № 122021000036-3 и тема „Магнит“, № 122021000034-9). Магнитные наноструктуры и микрообъекты изготовлены в отделе технологий и диагностики наноструктур ЦКП ИФМ УрО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] D. Su, J. Um, J. Moreno, Z. Nemati, K. Srinivasan, J. Chen, M.R.Z. Kouhpanji, D. Shore, K. Wu, J. Kosel, J.F. Modiano, R. Franklin, J.-P. Wang, B. Stadler. *Sensors Actuators A* **350**, 114115 (2023).

- [2] N. Mabarroh, T. Alfansuri, N.A. Wibowo, N.I. Istiqomah, R.M. Tumbelaka, E. Suharyadi. *J. Magn. Magn. Mater.* **560**, 163645 (2022).
- [3] Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Р.С. Заворницын, А.Ю. Павлова, И.К. Максимова, Т.П. Криницина, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов. *ФММ* **120**, 7, 710 (2019).
- [4] R.S. Zavernitsyn, L.I. Naumova, M.A. Milyaev, A.Y. Pavlova, I.K. Maksimova, V.V. Proglyado, V.V. Ustinov. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1389**, 012157 (2019).
- [5] М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.А. Чернышова, Д.В. Благодатков, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. *ФММ* **116**, 11, 1129 (2015).
- [6] Y. Huai, J. Zhang, G.W. Anderson, P. Rana, S. Funada, C.-Y. Hung, M. Zhao, S. Tran. *J. Appl. Phys.* **85**, 8, 5528 (1999).
- [7] G. Antarnusa, A. Esmawan, P.D. Jayanti, S.R. Fitriani, A. Suherman, E.K. Palupi, R. Umam, Ardimas. *J. Magn. Magn. Mater.* **563**, 169903 (2022).
- [8] E. Suharyadi, T. Alfansuri, L.S. Handriani, N.A. Wibowo, H. Sabarman. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* **32**, 23958 (2021).
- [9] S. Yan, Z. Cao, Z. Guo, Z. Zheng, A. Cao, Y. Qi, Q. Leng, W. Zhao. *Sensors* **18**, 6, 1832 (2018).
- [10] M. Carvalho, P. Ribeiro, V. Romão, S. Cardoso. *J. Magn. Magn. Mater.* **536**, 168116 (2021).
- [11] U.P. Borole, J. Khan, H.C. Barshilia, P. Chowdhury. *Sensors Actuators A* **332**, 112103 (2021).
- [12] P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso. *Proc. IEEE* **104**, 10, 1901 (2016).
- [13] М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Р.С. Заворницын, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов. *ФММ* **121**, 8, 794 (2020).
- [14] R. Ferreira, E. Paz, P. Freitas, J. Ribeiro, J. Germano, L. Sousa. *IEEE Trans. Magn.* **48**, 11, 4107 (2012).
- [15] М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Н.А. Кулеш, Е.И. Патраков, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. *ФММ* **117**, 12, 1227 (2016).
- [16] J.A. Osborn. *Phys. Rev.* **67**, 11–12, 351 (1945).

Редактор К.В. Емцев