

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.621.2:537.623

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЕНСОРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ СПИНОВЫХ КЛАПАНОВ С АНТИФЕРРОМАГНИТНЫМ МЕЖСЛОЙНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

© 2019 г. Л. И. Наумова^{a, b, *}, М. А. Миляев^{a, b}, Р. С. Заборницын^a, А. Ю. Павлова^a,
И. К. Максимова^a, Т. П. Криницина^a, Т. А. Чернышова^{a, b}, В. В. Проглядо^a, В. В. Устинов^{a, b}

^aИнститут физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

^bУральский Федеральный Университет, ИЕНУМ, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

*e-mail: naumova@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 15.01.2019 г.

После доработки 30.01.2019 г.

Принята к публикации 07.02.2019 г.

Спиновые клапаны композиции Ta/(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀/Co₇₀Fe₂₀Ni₁₀/Cu/Co₇₀Fe₂₀Ni₁₀/Ru/Co₇₀Fe₂₀Ni₁₀/Fe₅₀Mn₅₀/Ta были изготовлены методом магнетронного напыления. Обнаружено, что смещение низкополевой петли гистерезиса от $H = 0$ осциллирует при изменении толщины слоя меди. Структурные исследования показали высокое совершенство микроструктуры слоев. Синтезированы пленки спиновых клапанов с толщиной слоя меди, соответствующей второму антиферромагнитному максимуму взаимодействия РККИ, обладающие нулевым сдвигом низкополевой петли и высоким магниторезистивным эффектом. На основе этих пленок изготовлены сенсорные элементы в форме меандров с практически безгистерезисной полевой зависимостью магнитосопротивления и магниторезистивной чувствительностью 0.5%/Э.

Ключевые слова: спиновый клапан, межслойное взаимодействие, сенсорный элемент, меандр, спин-флоп состояние, магниторезистивная чувствительность

DOI: 10.1134/S0015323019070076

ВВЕДЕНИЕ

Наноструктуры типа спиновый клапан широко используются в качестве магниточувствительных материалов для сенсоров магнитного поля [1–3]. Спиновый клапан [4] представляет собой многослойную наноструктуру, в которой два ферромагнитных слоя разделены немагнитным, причем намагниченность одного из ферромагнитных слоев (пиннигованного) закреплена обменным взаимодействием с соседним слоем антиферромагнитного сплава. В результате этого обменного взаимодействия формируется однонаправленная анизотропия и выделенное направление: ось однонаправленной анизотропии (ОА). Второй ферромагнитный слой называется свободным и перемагничивается в очень слабых полях.

Для использования в качестве магниточувствительного материала в аналоговых устройствах предпочтительны спиновые клапаны, у которых ширина петли гистерезиса перемагничивания свободного слоя (H_c) мала.

Обычно для ослабления гистерезиса в спиновых клапанах формируют взаимно перпендикулярное расположение оси легкого намагничива-

ния (ОЛН) и оси однонаправленной анизотропии. Для изменения направления ОА используют кратковременный отжиг и последующее охлаждение в магнитном поле, приложенном перпендикулярно ОЛН. Отжиг проводят при температуре, превышающей температуру блокировки (T_b). Эта температура близка к температуре Нееля антиферромагнетика. При $T > T_b$ в спиновом клапане исчезает однонаправленная анизотропия, так как энергия теплового движения достаточно велика для разрушения магнитного порядка в антиферромагнетике и обменного взаимодействия на границе ферромагнетик/антиферромагнетик. При последующем охлаждении в магнитном поле ОА формируется вновь. Для спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком (САФ) [5, 6], в которых пиннигованный слой заменен обменно-связанной структурой ферромагнетик/Ru/ферромагнетик, существует и другой способ изменения взаимного расположения ОА и ОЛН [7–9]. При определенной величине приложенного магнитного поля (H_{sf}) САФ переходит в спин-флоп состояние. При отжиге и последующем охлаждении в поле, близком по величине к H_{sf} и

приложенном вдоль ОЛН, формируется скрещенное взаимное расположение ООА и ОЛН.

В [10] уменьшение величины H_c было получено при использовании составного свободного слоя $Ni_{80}Fe_{20}/Co_{90}Fe_{10}$.

Для использования спиновых клапанов в сенсорах важно, чтобы сдвиг низкополевой петли гистерезиса (H_j) от $H = 0$ был мал. Это необходимо для того, чтобы полевая зависимость магнитосопротивления сенсорного элемента пересекала линию, соответствующую $H = 0$. Такой сенсор чувствителен к очень слабым и переменным магнитным полям. Управление сдвигом можно применять для улучшения линейности передаточной характеристики и стабильности сенсора.

При изготовлении микрообъектов сдвиг низкополевой петли гистерезиса можно существенно снизить, уменьшая ширину микрополоски, однако при этом снижается и магниторезистивная чувствительность [11, 12]. Наиболее распространенными методиками управления сдвигом передаточной характеристики являются использование постоянных магнитов или катушек, напыление дополнительного жесткого магнитного слоя [13, 14]. При этом размеры сенсорного элемента увеличиваются.

Для спинового клапана величина сдвига низкополевой петли гистерезиса H_j определяется характерным полем взаимодействия разделенных прослойкой меди ферромагнитных слоев. Взаимодействие между этими слоями является результатом конкуренции дипольного ферромагнитного, зависящего от шероховатости интерфейсов, и РККИ обменного, периодически изменяющегося с толщиной слоя меди [15]. Обычно шероховатость межслойных границ такова, что доминирует дипольное ферромагнитное взаимодействие. Его энергия экспоненциально уменьшается с увеличением толщины слоя меди t_{Cu} . Как правило, для уменьшения величины H_j при изготовлении пленок спиновых клапанов увеличивают толщину t_{Cu} , что сопровождается неизбежным снижением магнитосопротивления.

Если шероховатость межслойных границ мала настолько, что осциллирующее обменное взаимодействие превалирует над дипольным ферромагнитным, то зависимость сдвига H_j от толщины слоя меди имеет осциллирующий характер. В этом случае возможно сочетание малого сдвига низкополевой петли гистерезиса и большой величины магнитосопротивления. Данное исследование направлено на реализацию именно такой возможности.

В настоящей работе для спиновых клапанов на основе ферромагнитного сплава $Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}$ с использованием буферного слоя $Ta/(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}$ проведено исследование микроструктуры и особен-

ностей межслойного взаимодействия. Осцилляции межслойного взаимодействия далее используются для управления сдвигом низкополевой петли гистерезиса и создания высокочувствительных сенсорных элементов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Спиновые клапаны композиции $Ta(50)/(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}(50)/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}(35)/Cu(t_{Cu})/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}(35)/Ru(8)/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}(30)/Fe_{50}Mn_{50}(100)/Ta(50)$ были изготовлены методом магнетронного напыления. Здесь и далее толщины слоев указаны в круглых скобках в ангстремах. Толщину t_{Cu} варьировали от 11 до 33 Å. В качестве материала ферромагнитных слоев использован сплав $Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}$. По результатам магнитных измерений пленок толщиной 80 нм, для данного сплава намагниченность на 13% выше, а коэрцитивная сила в 4.5 раза меньше, чем для $Co_{90}Fe_{10}$, часто используемого в спиновых клапанах. В работе [16] показано, что спиновые клапаны на основе близкого по составу трехкомпонентного сплава обладают слабым гистерезисом и минимальной магнитострикцией. Использование буферного слоя $Ta/(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}$ способствует формированию текстуры (111) в последующих слоях наноструктуры [17, 18] и уменьшению размеров кристаллитов поликристаллической пленки [19]. Последнее желательно для уменьшения шероховатости межслойных границ и уменьшения дипольного ферромагнитного межслойного взаимодействия.

Измерения магнитосопротивления были выполнены на образцах размера 2×8 мм и на объектах микронных размеров, имеющих форму меандра. Микрообъекты изготавливали из пленки спинового клапана при помощи электронно-лучевой литографии с использованием растрового электронного микроскопа Inspect F (FEI). Ионное травление проводили на установке PlasmaPro NGP80 RIE (Oxford Instruments). Ширина полос меандров варьировалась и составляла 20, 30 и 40 мкм. ОЛН была параллельна полосам меандра. Контактные площадки размерами 1×1 мм из слоя меди толщиной 240 нм были сформированы при помощи оптической литографии на установке MJB4 (SUSS MicroTec) и процедуры "lift-off".

Магниторезистивные измерения и термомагнитную обработку в атмосфере гелия проводили в установке, собранной на базе электромагнита фирмы Bruker и температурного контроллера LakeShore 336. Магнитосопротивление определяли как $\Delta R/R_s = [(R(H) - R_s)/R_s] \times 100\%$, где $R(H)$ – сопротивление образца в магнитном поле, R_s – сопротивление в поле насыщения. Магниторезистивную чувствительность $S = \Delta(\Delta R/R_s)/\Delta H$ определяли по наклону линейного участка кривой $\Delta R/R_s(H)$.

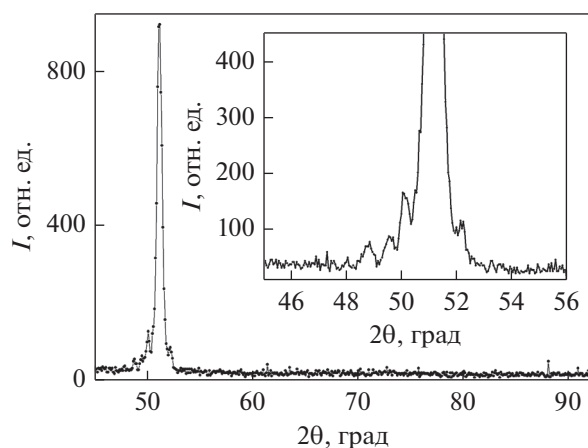


Рис. 1. Дифрактограмма спинового клапана Ta(50)/NiFeCr(50)/CoFeNi(35)/Cu(33)/CoFeNi(35)/Ru(8)/CoFeNi(30)/FeMn(100)/Ta(50). На вставке показаны сателлиты вокруг пика (111).

Исследования микроструктуры проводили методами рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-3М в излучении $\text{CoK}\alpha_1$, атомной силовой микроскопии на многофункциональном сканирующем зондовом микроскопе СОЛВЕР НЕКСТ и методом просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе Теснаі G-30.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование микроструктуры. На рис. 1 показана дифрактограмма, полученная для спинового клапана с толщиной слоя меди 32 Å. Единственный структурный пик соответствует семейству плоскостей (111) гранецентрированной кубической (ГЦК) решетки. Данный пик является общим для FeMn, NiFeCr, Cu и CoFeNi из-за близости параметров ГЦК-структур этих материалов. Отсутствие остальных пиков является признаком текстуры (111). Ширина кривой качания (ω -скан) вокруг пика (111) составляет 4.4 град.

Подобные результаты рентгеновской дифракции были получены для спиновых клапанов с другими толщинами слоя меди. Важной особенностью всех дифрактограмм являются толщинные осцилляции (сателлиты) вокруг пика (111). Толщина, определенная по периоду данных осцилляций, совпадает с точностью 1 Å с суммарной номинальной толщиной слоев NiFeCr(50)/CoFeNi(35)/Cu(t_{Cu})/CoFeNi(35) в составе спинового клапана. По-видимому, в данной части наноструктуры совершенство межслойных границ так велико, а рассогласование параметров кристаллической решетки слоев так мало, что реализовались условия получения сателлитов, соот-

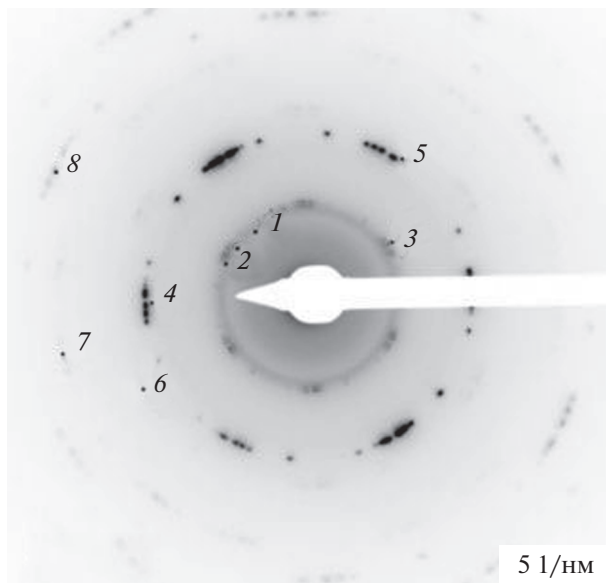


Рис. 2. Электронограмма спинового клапана Ta(50)/NiFeCr(50)/CoFeNi(35)/Cu(33)/CoFeNi(35)/Ru(8)/CoFeNi(30)/FeMn(100)/Ta(50). Цифрами обозначены дебаевские кольца от семейств плоскостей: 1 – (100) Ta; 2 – (111) FeMn; 3 – (111) NiFeCr, Cu и CoFeNi; 4 – (220) FeMn, 5 – (220) NiFeCr, Cu и CoFeNi; 6 – (311) NiFeCr, Cu и CoFeNi; 7 – (331) NiFeCr, Cu и CoFeNi; 8 – (420) NiFeCr, Cu и CoFeNi.

ветствующих суммарной общей толщине данных слоев.

На рис. 2 показаны электронограммы, полученные для спинового клапана с $t_{\text{Cu}} = 32$ Å. Для NiFeCr, Cu, CoFeNi и FeMn кольцо (111) является слабым, а (220) – ярким. Такое распределение интенсивностей дебаевских колец характерно для аксиальной текстуры (111), ось которой перпендикулярна плоскости пленки. Точечные рефлексы в дебаевских кольцах распределены не равномерно, а сосредоточены в определенных узких угловых диапазонах. Эта особенность проявляется на половине полученных электронограмм и является следствием того, что угол разворота между решетками соседних кристаллитов в плоскости пленки мал. На рис. 3 показаны соответствующие электронограмме изображения высокого разрешения. Видны линии муара (рис. 3а), которые появляются в многослойных структурах, если рассогласование кристаллических решеток слоев мало. На многих изображениях имеются области, в которых видны тонкие прямые параллельные линии прямого разрешения проекций атомных плоскостей на плоскости изображения (рис. 3б). Расстояние между проекциями атомных плоскостей составляет $d = 2.1$ Å, что соответствует расстоянию между атомными плоскостями (111) NiFeCr, Cu и CoFeNi.

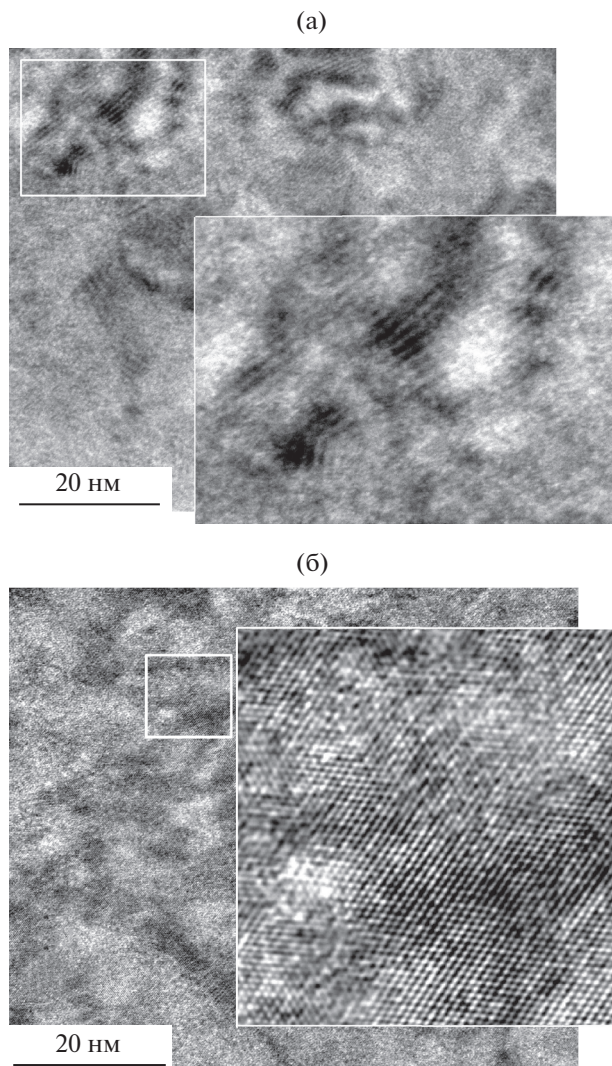


Рис. 3. Изображения высокого разрешения спиновое клапана Ta(50)/NiFeCr(50)/CoFeNi(35)/Cu(33)/CoFeNi(35)/Ru(8)/CoFeNi(30)/FeMn(100)/Ta(50). На вставках – выделенные фрагменты в увеличенном масштабе.

Характерное изображение поверхности пленок, полученное при помощи зондовой микроскопии, показано на рис. 4. Средний размер зерна составляет 230–250 Å. Шероховатость поверхности сравнительно мала [20, 21] и характеризуется среднеквадратичным отклонением $rms = 3–5 \text{ \AA}$.

Таким образом, исследуемые спиновые клапаны обладают совершенной текстурой <111>, малой шероховатостью поверхности и малым рассогласованием параметров кристаллической решетки соседних слоев. Причем последнее характерно именно для той части структуры, в которой происходит спин-зависимое рассеяние электронов.

Магниторезистивные свойства. Полевые зависимости магнитосопротивления были измерены в поле, приложенном параллельно ООА || ОЛН.

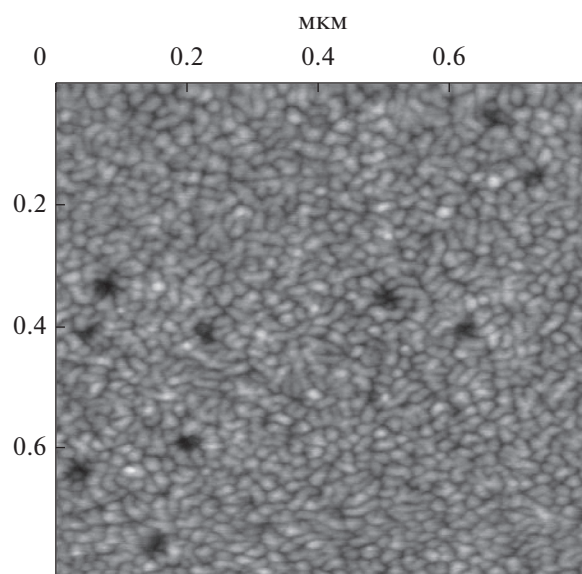


Рис. 4. Изображение структуры поверхности спиновое клапана Ta(50)/NiFeCr(50)/CoFeNi(35)/Cu(33)/CoFeNi(35)/Ru(8)/CoFeNi(30)/FeMn(100)/Ta(50), полученное при помощи сканирующего зондового микроскопа.

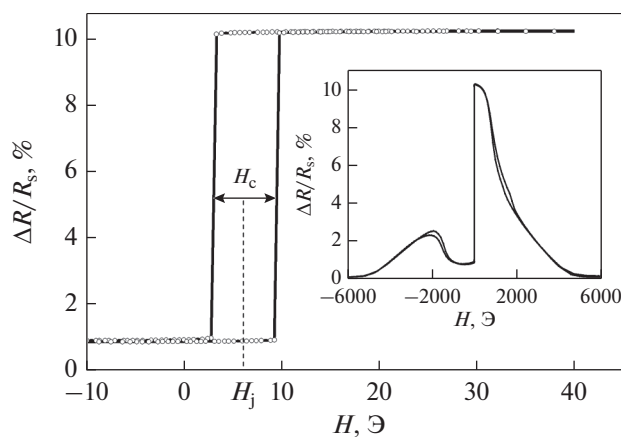


Рис. 5. Низкополевая часть магниторезистивной кривой спиновое клапана со слоем меди толщиной 33 Å. (H_c) и (H_j) – ширина сдвиг низкополевой петли гистерезиса. На вставке – полевая зависимость магнитосопротивления в широком интервале полей.

На рис. 5 показана характерная форма полевой зависимости магнитосопротивления в малых и больших полях и обозначены ширина и сдвиг низкополевой петли гистерезиса. При уменьшении толщины слоя меди в спиновом клапане происходят закономерные изменения ширины и сдвига низкополевой петли гистерезиса, а также максимальной величины магнитосопротивления. Полученные зависимости этих величин от t_{Cu} показаны на рис. 6. Осциллирующий характер зависимости $H_j(t_{Cu})$ указывает на то, что осциллирующее обменное взаимодействие доминирует над

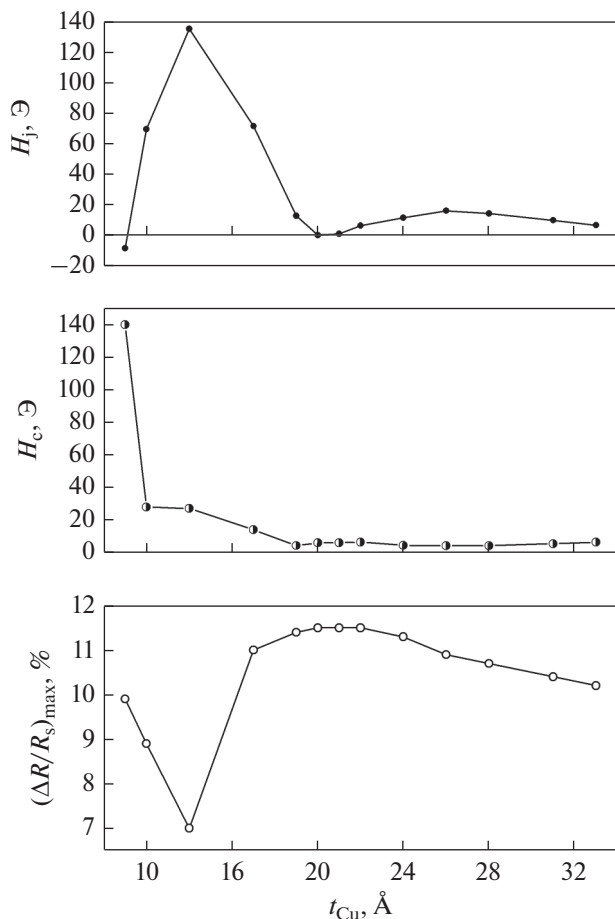


Рис. 6. Зависимости максимального магнито-сопротивления, ширины и сдвига низкополевого петли (нижний, средний и верхний графики, соответственно) от толщины t_{Cu} для спиновых клапанов Ta(50)/NiFeCr(50)/CoFeNi(35)/Cu(t_{Cu})/CoFeNi(35)/Ru(8)/CoFeNi(30)/FeMn(100)/Ta(50).

ферромагнитным дипольным. При $t_{Cu} \approx 20 \text{ \AA}$ реализуется второй антиферромагнитный максимум обменного взаимодействия. Отметим, что в интервале толщин слоя меди от 19.7 до 22 \AA наблюдается слабый гистерезис ($H_c = 5.9 \text{ \text{Э}}$) и большая величина магнитосопротивления ($(\Delta R/R_s)_{max} = 11.5\%$).

На рис. 7 показано, как изменяется форма и сдвиг низкополевого петли гистерезиса при изменении толщины слоя меди в спиновом клапане. При уменьшении t_{Cu} сдвиг низкополевого петли гистерезиса от $H = 0$ попеременно увеличивается и уменьшается. При $t_{Cu} = 20 \text{ \AA}$ получено сочетание минимального сдвига и максимального магнитосопротивления, а также высокая магниторезистивная чувствительность $S = 18\%/ \text{Э}$. Именно такая пленка спинового клапана была выбрана для изготовления сенсорных элементов.

Сенсорные элементы и их функциональные параметры. Были изготовлены меандры с шириной полос 20, 30 и 40 мкм. Для ослабления гистерези-

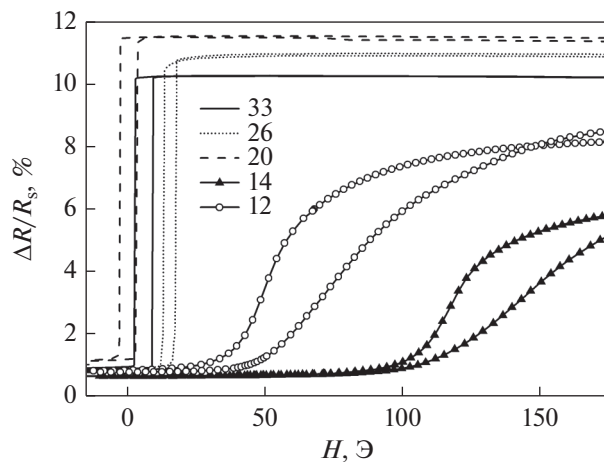


Рис. 7. Низкополевы части магниторезистивных кривых спиновых клапанов Ta(50)/NiFeCr(50)/CoFeNi(35)/Cu(t_{Cu})/CoFeNi(35)/Ru(8)/CoFeNi(30)/FeMn(100)/Ta(50). Цифры в центре рисунка обозначают толщину слоя меди в ангстремах.

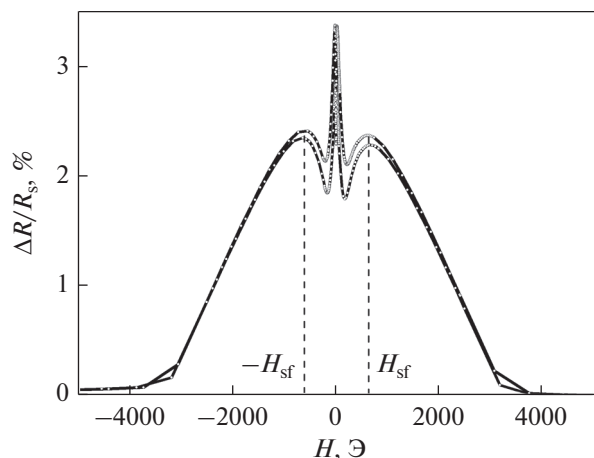


Рис. 8. Магниторезистивная кривая, измеренная при температуре 180°C , для меандра с шириной полос 30 мкм.

са во всех микрообъектах путем термомагнитной обработки было сформировано неколлинеарное взаимное расположение ООА и ОЛН. Термомагнитная обработка включала в себя отжиг в течение 10 мин при температуре 180°C и последующее охлаждение в поле H_{sf} , соответствующем спин-фlop состоянию САФ, приложенном параллельно ОЛН. Этот способ термомагнитной обработки подробно описан в [9, 22, 23]. Для определения величины H_{sf} магниторезистивную кривую измерили при температуре 180°C , превышающей температуру блокировки, при которой разрушается обменное взаимодействие на границе CoFeNi/FeMn. На рис. 8 показана магниторезистивная кривая, обозначены поля H_{sf} . Минимальная ширина низкополевого петли гистерезиса была получена после термомагнитной обработки в поле $H_{ann} = -1 \text{ кЭ}$,

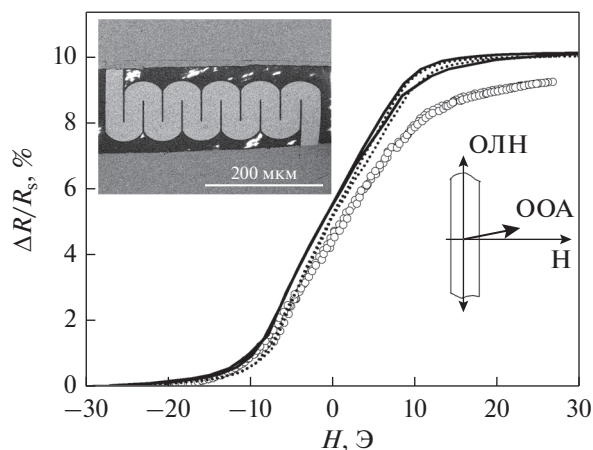


Рис. 9. Полевые зависимости магнито-сопротивления меандров с шириной полос 20, 30 и 40 мкм (светлые символы, сплошная и пунктирная линии, соответственно). На вставке слева — изображение меандра с шириной полос 30 мкм, полученное при помощи сканирующего электронного микроскопа; справа — взаимное расположение полосы меандра, ООА, ОЛН и поля при измерении.

приложенном вдоль полосы меандра. Величина $H_{\text{анн}}$ больше, чем H_{sf} , поэтому формируемая при термомагнитной обработке новая ООА отклонена от нормали к ОЛН на угол 10–15 град [9]. Безгистерезисная зависимость магнитосопротивления получается при измерении в поле, приложенном перпендикулярно полосе меандра.

На рис. 9 показаны полученные после термомагнитной обработки низкополевые части магниторезистивных кривых и взаимное расположение осей анизотропии, полосы меандра и приложенного при измерении магнитного поля. Для сенсорных элементов с шириной полос 20, 30 и 40 мкм чувствительность составила 0.36, 0.46 и 0.51%/Э, соответственно. Отметим, что нечетная рабочая характеристика и высокая чувствительность получены без каких-либо дополнительных приспособлений (например, магнитных концентраторов, или постоянных магнитов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовленные спиновые клапаны на основе сплава $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}$ с использованием буферного слоя $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ обладают гладкими межслойными границами и высокоупорядоченной микроструктурой, а именно, совершенной текстурой $\langle 111 \rangle$ и малоугловыми границами между соседними кристаллитами поликристаллической пленки.

В полученных спиновых клапанах взаимодействие между разделенными слоем меди ферромагнитными слоями осуществляется преимущественно за счет РККИ осциллирующего обмен-

ного взаимодействия. Для спиновых клапанов с толщиной слоя меди, соответствующей второму антиферромагнитному максимуму, получено сочетание большой величины магнитосопротивления, слабого гистерезиса и нулевого сдвига низкополевой петли.

Полученные сенсорные элементы обладают перспективными для применения характеристиками: магнитосопротивлением свыше 10%, чувствительностью к магнитному полю до 0.5%/Э и нечетной характеристикой в интервале слабого магнитного поля от -10 до $+10$ Э.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме “Спин” АААА-А18-118020290104-2 и при поддержке РФФИ (грант 19-02-00057).

Исследования наноструктуры выполнены в ЦКП “Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов” ИФМ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cardoso S., Leitao D.C., Dias T.M., Valadeiro J., Silva M.D., Chicharo A., Silverio V., Gaspar J., Freitas P.P.* Challenges and trends in magnetic sensor integration with microfluidics for biomedical applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017. V. 50. P. 213001(21pp).
2. *Valadeiro J., Silva M., Cardoso S., Martins M., Gaspar J., Freitas P.P., Sebastiao A.M.* Microneedles with integrated magnetoresistive sensors: A precision tool in biomedical instrumentation // *In Proceedings of the 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Glassboro, NJ, USA, 13–15 March 2017.*
3. *Hui-Min Shen, Liang Hu and Xin Fu.* Integrated Giant Magnetoresistance Technology for Approachable Weak Biomagnetic Signal Detections // *Sensors.* 2018. V. 50. № 18. P. 148 (22 pp).
4. *Dieny B., Speriosu V.S., Parkin S.S.P., Gurney B.A., Wilhoit D.R., Maui D.* Giant magnetoresistance in soft ferromagnetic multilayers // *Phys. Rev. B.* 1991. V. 43. № 1. P. 1297–1300.
5. *Huai Y., Zhang J., Anderson G.W., Rana P., Funada S., Hung C.Y., Zhao M., Tran S.* Spin-valve heads with synthetic antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/FeMn // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 85. Apr. P. 5528–5530.
6. *Li Y.F., Yu R.H., Dimitrov D.V., Xiao J.Q.* Memory effect and temperature behavior in spin valves with and without antiferromagnet subsystems // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 80. P. 5692–5695.
7. *Tong H.C., Qian C., Miloslavsky L., Funada S., Shi X., Liu F., Dey S.* The spin flop of synthetic antiferromagnetic films // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 87. P. 5055–5057.
8. *Beach R.S., McCord J., Webb P., Mauri D.* Orthogonal pinning of two ferromagnetic layers in a synthetic spin valve // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80. P. 4576–4578.
9. *Milyaev M., Naumova L., Chernyshova T., Proglyado V., Kamensky I., Ustinov V.* Spin-Flop in Synthetic Antiferromagnet and An hysteretic Magnetic Reversal in FeMn -Based Spin Valves // *IEEE Trans. Magn.* 2016. V. 52. P. 2301104.

10. Kanai H., Yamada K., Aoshima K., Ohtsuka Y., Kane J., Kanamine M., Toda J., Mizoshita Y. Spin-valve read heads with NiFe/Co90Fe10 layers for 5 Gbit/in² density recording // IEEE Trans. on Magn. 1996. V. 32. P. 3368–3373.
11. Coelho P., Leitao D.C., Antunes J., Cardoso S., Freitas P.P. Spin valve devices with synthetic-ferrimagnet free-layer displaying enhanced sensitivity for nanometric sensors // IEEE Trans. On Magn. 2014. V. 50. № 11. P. 4401604(1–4).
12. Чернышова Т.А., Миляев М.А., Наумова Л.И., Проглядю В.В., Банникова Н.С., Максимова И.К., Петров И.А., Устинов В.В. Магниторезистивная чувствительность и одноосная анизотропия микрополосок спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком // ФММ. 2017. Т. 118. № 5. С. 439–445.
13. Tumanski S. Thin Film Magnetoresistive Sensors. IOP Publishing Ltd. 2001.
14. Silva V., Leitao C., Valadeiro J., Amaral J., Freitas P., Cardoso S. Linearization strategies for high sensitivity magnetoresistive sensors // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2015. V. 72. P. 10601.
15. Kools J.C.S. Exchange-Biased Spin-Valves for Magnetic Storage // IEEE Trans. on Magn. 1996. V. 32. № 4. P. 3165–3184.
16. Fukuzawa H., Iwasaki H., Koi K., Sahashi M. Soft magnetic characteristics of an ultrathin CoFeNi free layer in spin-valve films // J. Magnetism and Magnetic Mater. 2006. V. 298. P. 65–71.
17. Sugita Y., Kawawake Y., Satomi M. and Sakakima H. Thermal stability of PtMn based synthetic spin valves using thin oxide layer // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. № 11. P. 6919–6921.
18. Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Патраков Е.И., Проглядю В.В., Каменский И.Ю., Рябухина М.В., Устинов В.В. Гигантское магнитосопротивление и гистерезисные явления в сверхрешетках CoFe/Cu с высокосовершенной кристаллической текстурой // ФММ. 2018. Т. 119. № 11. С. 1132–1137.
19. Банникова Н.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Криницина Т.П., Патраков Е.И., Проглядю В.В., Чернышова Т.А., Устинов В.В. Сверхрешетки NiFeCo/Cu с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом // Физика твердого тела. 2016. V. 58. № 10. P. 1940–1946.
20. Öksüzoglu R.M., Sarac U., Yildirim M., Çinar H. Characterization of Microstructural and Morphological Properties in As-deposited Ta/NiFe/IrMn/CoFe/Ta Multilayer System // J. Mater. Sci. Technol. 2014. V. 30. №4. P. 359–364.
21. Svalov A.V., Sorokin A.N., Savin P.A., García-Arribas A., Fernández A., Vas'kovskiy V.O., Kurlyandskaya G.V. Co/Cu/Co Pseudo Spin-Valve System Prepared by Magnetron Sputtering with Different Argon Pressure // Key Engineering Materials. 2015. V. 644. P. 211–214.
22. Миляев М.А., Наумова Л.И., Чернышова Т.А., Проглядю В.В., Кулеш Н.А., Патраков Е.И., Каменский И.Ю., Устинов В.В. Спин-флоп состояния в синтетическом антиферромагнетике и изменения однонаправленной анизотропии в спиновых клапанах на основе FeMn // ФММ. 2016. Т. 117. № 12. С. 1227–1233.
23. Chernyshova T., Naumova L., Pavlova A., Maksimova I., Milyaev M., Proglyado V., Patrakov E., Ustinov V. An hysteretic magnetic reversal of meander-shaped spin valve with synthetic antiferromagnet // Sensors and Actuators A. 2019. V. 285. P. 73–79.