

Научно-популярное эссе по теме существенного результата:

Управляемое формирование обменного сдвига в отдельных элементах системы микробиъектов на основе спиновых клапанов

Л.И. Наумова, Р.С. Заборницын, М.А. Миляев, А.А. Гермизина, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов

Введение

Спиновыми клапанами называют многослойные наноструктуры, обладающие гигантским магниторезистивным эффектом и резким изменением электросопротивления при приложении слабого магнитного поля. В состав спинового клапана входят два ферромагнитных слоя ферромагнитного, разделенные слоем меди, причем, один из ферромагнитных слоев соседствует со слоем антиферромагнетика и связан с ним обменным взаимодействием. Этот слой называется **закрепленным**. Второй ферромагнитный слой, называемый **свободным**, перемагничивается в полях близких к $H = 0$. Взаимодействие закрепленного слоя с антиферромагнетиком приводит к формированию однонаправленной анизотропии, которая проявляется в сдвиге петли гистерезиса перемагничивания закрепленного слоя от $H = 0$ на величину поля сдвига (H_{ex}). Направление обменного сдвига характеризуется осью однонаправленной анизотропии (ООА). ООА можно изменить при помощи термомагнитной обработки (ТМО). При магнетронном напылении в магнитном поле, приложенном в плоскости подложки в спиновых клапанах формируется одноосная анизотропия и ось легкого намагничивания (ОЛН).

Для расширения интервала рабочих температур закрепленный слой заменяют синтетическим антиферромагнетиком, который состоит из двух ферромагнитных слоев, разделенных слоем рутения и связанных антиферромагнитным РККУ взаимодействием. В этом случае ферромагнитный слой, соседствующий с антиферромагнетиком, называют закрепленным, другой – референтным (рисунок 1 а, б).

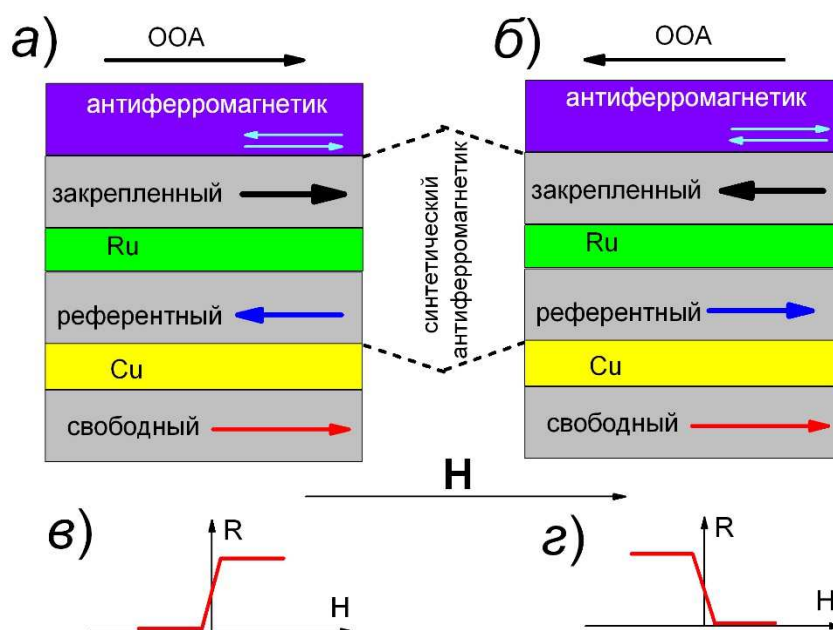


Рисунок 1. Направления магнитных моментов в слоях спинового клапана в поле $H > 0$ после перемагничивания свободного слоя (а, б) и полевые зависимости сопротивления для случаев сонаправленного (а, в) и противоположного (б, г) взаимного расположения ООА и H .

При конструировании электронных устройств, работа которых связана с фиксацией изменений магнитного поля и измерением его величины, магниточувствительные элементы часто соединяют в соответствии с электрической схемой моста Уитстона. Это позволяет существенно уменьшить температурный дрейф и получить выходной сигнал симметричный относительно $H = 0$. 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 U_{out} и напряжением питания, подаваемым на ветви моста (U_{in}) получается, если при изменении магнитного поля в двух плечах моста электросопротивление уменьшается ($dR_{1,3}/dH < 0$), а в двух других – увеличивается ($dR_{2,4}/dH > 0$). Такая схема называется полным мостом Уитстона (рисунок 2).

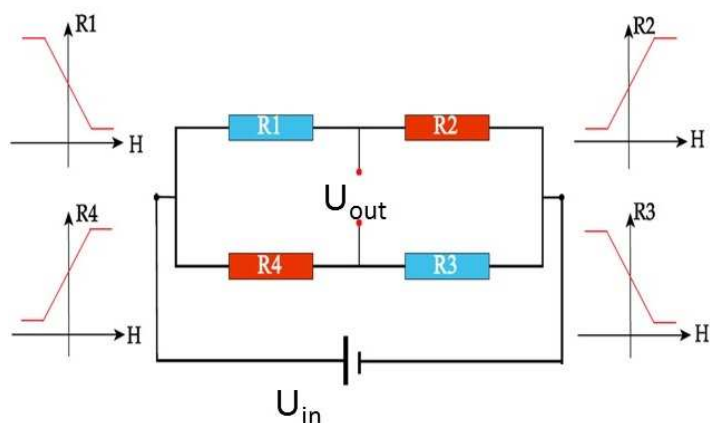


Рисунок 2. Схема моста Уитстона и полевые зависимости электросопротивления плеч моста при реализации максимального соотношения между полезным сигналом U_{out} и напряжением питания U_{in} .

Если при изготовлении микросенсоров магнитного поля в качестве магниточувствительного материала используют спиновый клапан, то для реализации полного моста Уитстона в плечах R_2 и R_4 ООА должна быть сонаправлена приложенному внешнему полю, а в плечах R_1 и R_3 – противонаправлена (рисунок 1в, з). Иными словами, обменный сдвиг в элементах R_1 и R_3 должен быть противоположен обменному сдвигу в R_2 и R_4 . В мосте Уитстона изготовленном из единой пленки спинового клапана, при изменении магнитного поля электросопротивление всех плеч моста изменяется одинаково, так как во всей пленке одинаково взаимное расположение \mathbf{H} и ООА. Существующие на данный момент методики управляемого формирования обменного сдвига в системах микрообъектов на основе спиновых клапанов достаточно трудоемки и подразумевают использование нескольких технологических этапов [1 - 4].

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей перемагничивания и формирования межслойного взаимодействия в спиновых клапанах с синтетическим антиферромагнетиком в условиях сочетания наведенной магнитной анизотропии и анизотропии формы, а также разработка методики эффективного управления обменным сдвигом в элементах системы микрообъектов на основе спиновых клапанов.

Объект исследования: объединенные в соответствии с формой ромба микрополосы шириной от 2 до 30 мкм, изготовленные из пленок спиновых клапанов композиции $Ta/(Ni_{80}Fe_{20})_{60}Cr_{40}/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}/Cu/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}/Ru/Co_{70}Fe_{20}Ni_{10}/Fe_{50}Mn_{50}/Ta$.

Методы исследования: магнитная силовая микроскопия, измерение магнитосопротивления отдельных сенсорных элементов и вольт-эрстедной характеристики моста Уитстона после термомагнитной обработки.

Результаты и обсуждение

Исследования микроструктуры пленок спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком и составным буферным слоем

Для целенаправленного формирования нужной магнитной структуры в элементах системы микрообъектов на основе пленок спиновых клапанов эти наноструктуры должны обладать высоким структурным совершенством и гладкими межслойными границами. Использование буферного слоя Ta(5нм)/[Ni₈₀Fe₂₀]₆₀Cr₄₀(5нм) в сочетании ферромагнитным сплавом Co₇₀Fe₂₀Ni₁₀ позволяет синтезировать спиновые клапаны, обладающие высоким совершенством микроструктуры [5]. На рентгеновской дифрактограмме (рисунок 3), полученной для спинового клапана 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>.

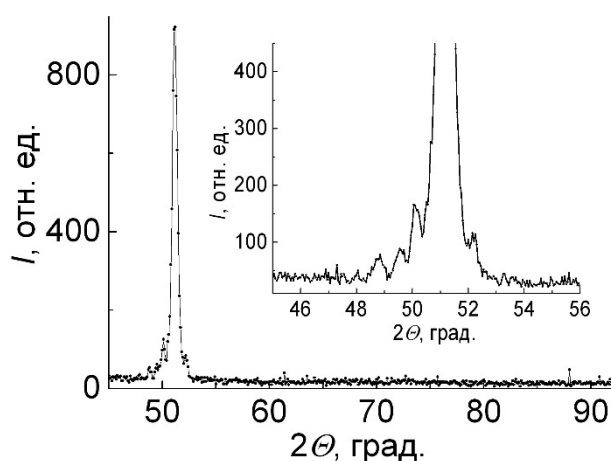


Рисунок 3. Дифрактограмма спинового клапана Ta(5нм)/NiFeCr(5нм)/CoFeNi(3.5нм)/Cu(3.3нм)/CoFeNi(3.5нм)/Ru(0.8нм)/CoFeNi(3нм)/FeMn(10нм)/Ta(5нм). На вставке показаны сателлиты вокруг пика (111).

Важной особенностью всех дифрактограмм являются толщинные осцилляции (сателлиты) вокруг пика (111). Толщина, определенная по периоду данных осцилляций с суммарной номинальной толщиной слоев NiFeCr/CoFeNi/Cu/CoFeNi в составе спинового клапана. В данной части наноструктуры рассогласование параметров кристаллической решетки слоев так мало, что реализовались условия получения сателлитов, соответствующих суммарной общей толщине данных слоев.

На рисунке 4 показаны изображения высокого разрешения, полученные при помощи просвечивающей электронной микроскопии. Наблюдаемые линии муара (рис.4а) обычно появляются, если рассогласование кристаллических решеток соседних слоев наноструктуры мало. Имеются области, в которых видны тонкие прямые параллельные линии прямого разрешения проекций атомных плоскостей на плоскость изображения (рисунок 4б).

Таким образом, пленки спиновых клапанов, обладают совершенной текстурой <111> и малым рассогласованием параметров кристаллической решетки соседних слоев.

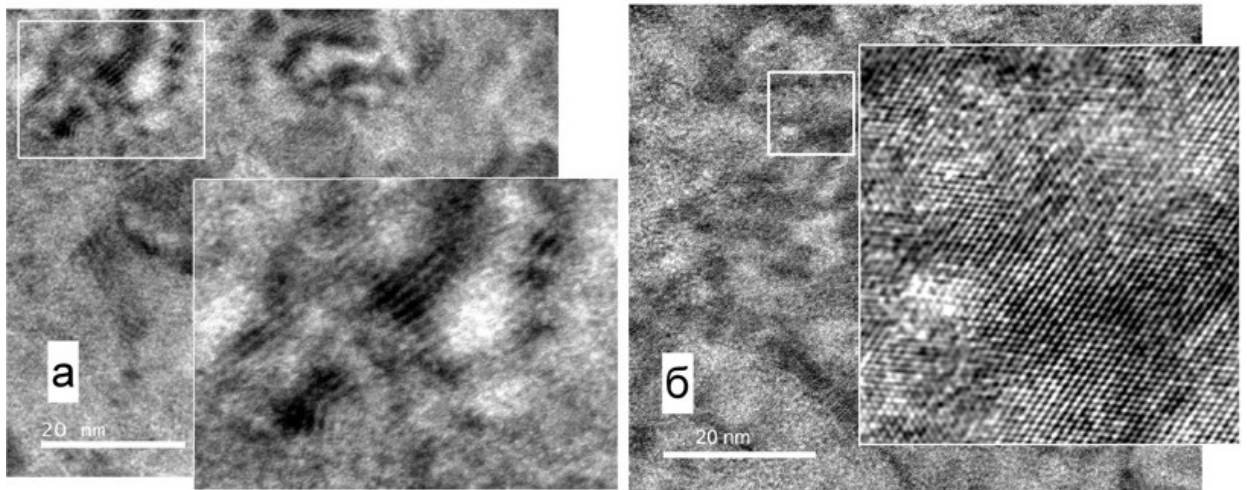


Рисунок 4. Изображения высокого разрешения спинового клапана Ta(5нм)/NiFeCr(5нм)/CoFeNi(3.5нм)/Cu(3.3нм)/CoFeNi(3.5нм)/Ru(0.8нм)/CoFeNi(3нм)/FeMn(10нм)/Ta(5нм). На вставках – выделенные фрагменты в увеличенном масштабе.

Формирование попарно противоположного обменного сдвига в элементах моста Уитстона с использованием одноосной магнитной анизотропии и термомагнитной обработки в спин-флоп состоянии синтетического антиферромагнетика

Для микрообъектов на основе спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком, объединенных в соответствии с формой ромба, найдены режимы термомагнитной обработки для формирования попарно противоположного обменного сдвига и неколлинеарного расположения осей одноосной и однонаправленной анизотропии в отдельных микрообъектах. Разработанная методика состоит из трех термомагнитных обработок, проведенных в поле разной величины, но одинакового направления, а именно: 1) в поле, превышающем поле магнитного насыщения; 2) в поле $H \approx 0$ и 3) в поле спин-флоп перехода синтетического антиферромагнетика. На рисунке 5 показана магнитная структура, которая методики трехэтапной ТМО формируется в пленке спинового клапана. Видны области, соответствующие разным направлениям обменного сдвига.

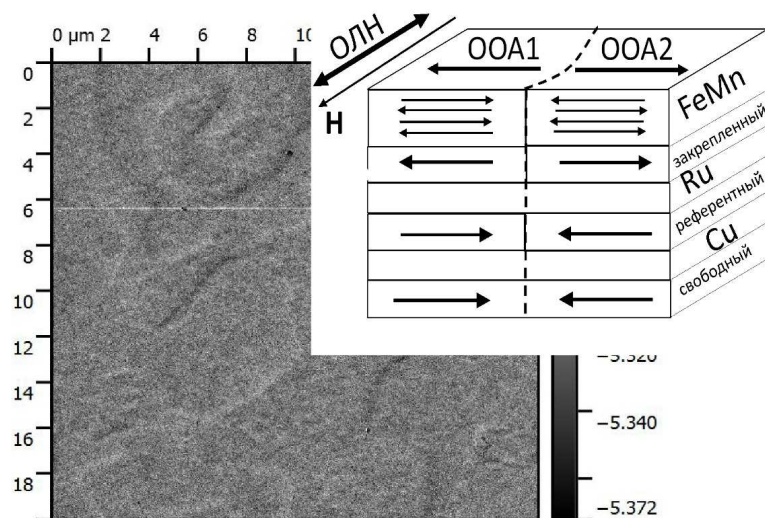


Рисунок 5. Изображение неоднородной магнитной структуры пленки спинового клапана после ТМО в поле спин-флоп состояния синтетического антиферромагнетика. На вставке показаны направления магнитных моментов в слоях наноструктуры для двух разных магнитных фаз

Аналогичная ТМО проведенная в имеющих форму ромба микрообъектах с разным направлением ОЛН в сторонах ромба (микрополосках) приводит к формированию противоположных направлений обменного сдвига и, соответственно ООА в непараллельных сторонах ромба (рисунок 6).

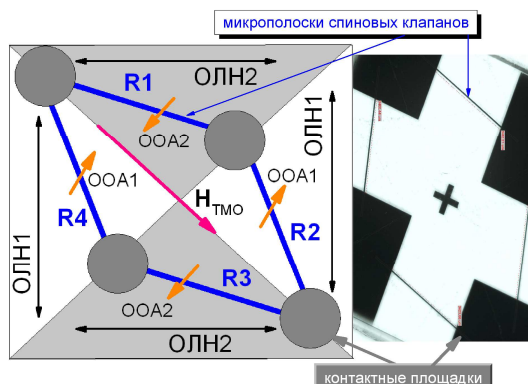


Рисунок 6. Микрополоски R1, R2, R3 и R4 образующие мост Уитстона, контактные площадки, направления осей легкого намагничивания и поля приложенного при ТМО, а также ООА сформированные в результате ТМО Справа – фотография имеющего форму ромба микрообъекта с контактными площадками

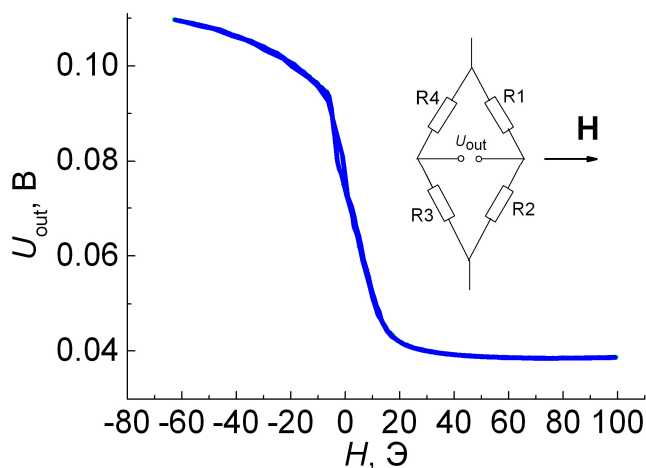


Рисунок 7. Вольт-эрстедная характеристика для мостовой схемы с шириной микрополоски спинного клапана 30 мкм

На основе имеющих форму ромба микрообъектов изготовлены прототипы сенсоров, реализующие схему полного моста Уитстона. Полученные сенсоры обладают высокой чувствительностью (2.5 – 7.7 мВ/В/Э) к изменению поля. Полевая зависимость выходного сигнала (Рисунок 7) обладает малым гистерезисом. Такие характеристики востребованы в аналоговых устройствах [6].

Формирование попарно противоположного обменного сдвига в элементах моста Уитстона с использованием анизотропии формы в качестве управляющего фактора

В слабых магнитных полях при малой ширине микрополосы (1 – 2 мкм) анизотропия формы управляет поворотом магнитных моментов слоев при перемагничивании спинного клапана. Микрообъекты в форме ромба (рисунок 8) были изготовлены из пленок спинных клапанов обладающих нулевым сдвигом низкополевой петли гистерезиса, минимальным количеством дефектов кристаллической структуры, гладкими межслойными границами.

Найдены режимы ТМО позволяющие получить противоположные по знаку величины полей обменного сдвига и близкое к коллинеарному расположение ООА и ОЛН в непараллельных сторонах ромба. ТМО проводили в поле $H_{ТМО}$ приложенном перпендикулярно большой диагонали ромба, и, следовательно, ОЛН. ТМО состояла из двух

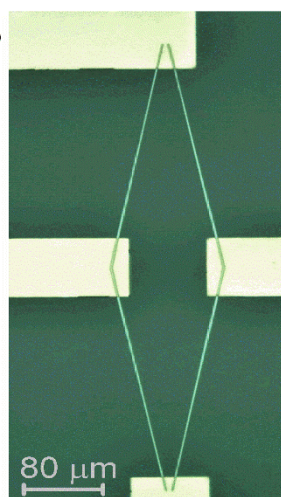


Рисунок 8. Фотография микрообъекта в форме ромба с контактными площадками

микроскопа, после ТМО пленки и микрополосок спинового клапана, которые являются сторонами ромба.

этапов. (I) Нагрев и охлаждение в магнитном поле, превышающем поле насыщения. При этом в микрополосках формируются новые ООА, сонаправленные с приложенным магнитным полем. (II) Нагрев и охлаждение в магнитном поле, как можно более близком к $H = 0$. В таком поле магнитные моменты закрепленного и референтного слоев ориентируются вдоль полосок (сторон ромба), поворачиваясь в одной паре полосок по часовой, а в другой – против часовой стрелки.

На рисунке 9 показаны изображения топографии и магнитной структуры, полученные при помощи многофункционального атомного силового

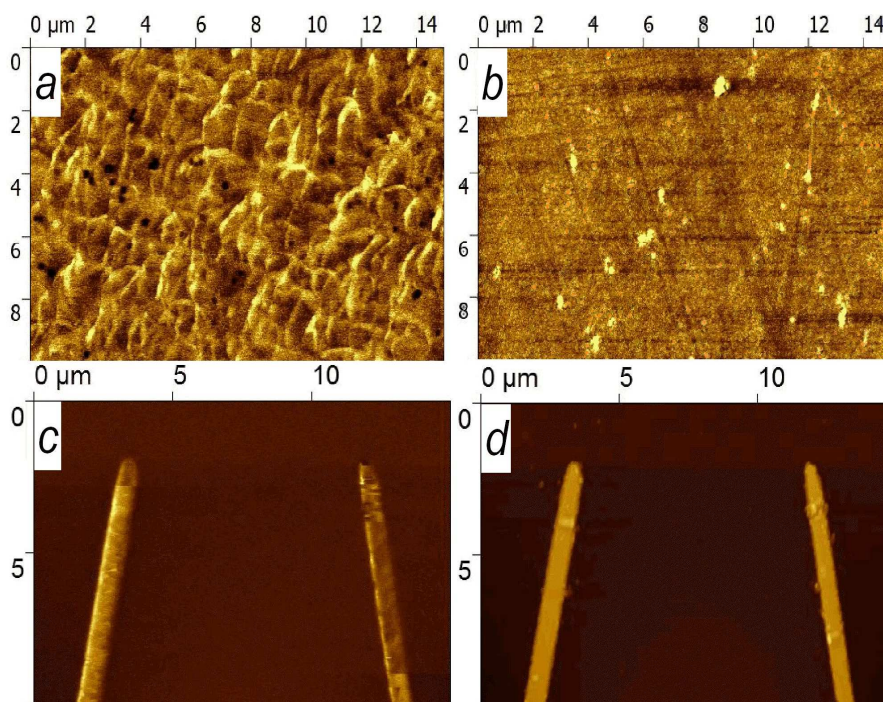


Рисунок 9. Изображения топографии (b, d) и магнитная структуры (a, c) в пленке (a, b) и микрополосках (c, d) спиновых клапанов, полученные после двух этапов ТМО

В пленке спинового клапана магнитная структура неоднородна, а в микрополосках формируется близкое к однодоменному магнитное состояние. Важно, отметить, что магнитный контраст и, следовательно, магнитное состояние в микрополосках разное. Полевые зависимости магнитосопротивления измеренные для непараллельных сторон микрообъекта в форме ромба после ТМО показаны на рисунке 10.

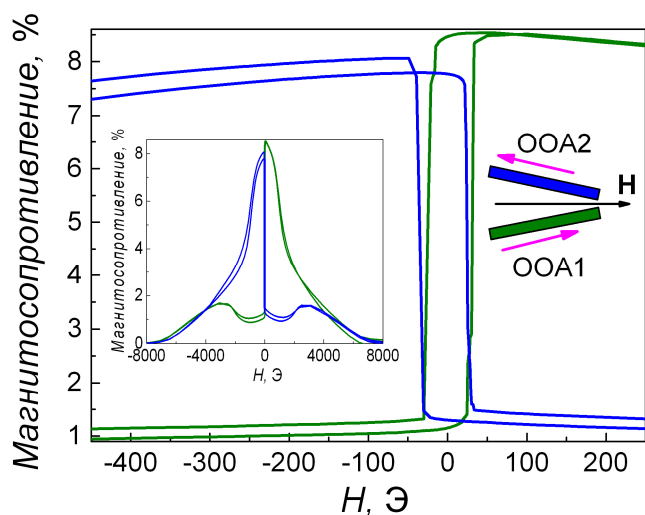


Рисунок 10. Полевые зависимости магнитосопротивления для двух непараллельных сторон имеющего форму ромба микрообъекта на основе спинового клапана. На левой вставке те же зависимости в широком интервале полей. На правой вставке – схема направления ООА в непараллельных сторонах ромба.

Полевая зависимость выходного сигнала (Рисунок 11) полученных сенсоров на основе полного моста Уитстона имеет форму ступени, характеризуется высокой чувствительностью (3 мВ/В/Э) к изменению поля и наличием гистерезиса. Такие характеристики востребованы в устройствах переключения [7].

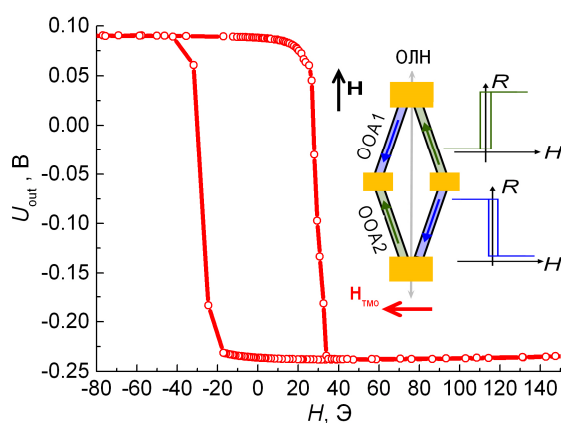


Рисунок 11. Вольт-эрсредная характеристика для мостовой схемы с шириной микрополос 2 мкм. Вставка: схематичное изображение моста Уитстона; полученные после термомагнитной обработки ООА для каждого элемента и соответствующие им зависимости $R(H)$.

Заключение

Исследованы особенности перемагничивания и формирования межслойного взаимодействия в спиновых клапанах с синтетическим антиферромагнетиком в условиях сочетания наведенной магнитной анизотропии и анизотропии формы. Разработана методика единой термомагнитной обработки, при которой однонаправленная анизотропия, формируемая в каждом микрообъекте, задается его формой и направлением оси легкого намагничивания в отдельных магниторезистивных элементах мостовой схемы. Разработаны различные варианты дизайна микрообъектов для сенсоров магнитного поля на основе электрической схемы моста Уитстона. Изготовлены прототипы сенсоров магнитного поля с аналоговой и цифровой формой выходного сигнала, которые реализуют схему полного моста Уитстона.

Список литературы

1. 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).
2. R. Ferreira, E. Paz, P. Freitas, J. Ribeiro, J. Germano, L. Sousa. *IEEE Trans. on Magn.* **48**, 11, 4107 (2012).
3. U. P. Borole, J. Khan, H. C. Barshilia, P. Chowdhury. *Sensors and Actuators: A. Physical* **332** (2021).
4. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso. *Proceedings of the IEEE* **104**, 10, p. 1901 (2016).
5. Л. И. Наумова, М. А. Миляев, Р. С. Заборницын, А. Ю. Павлова, И. К. Максимова, Т. П. Криницина, Т. А. Чернышова, В. В. Проглядо, В. В. Устинов. *ФММ* **120**, 7, 710 (2019).
6. М. А. Миляев, Л. И. Наумова, Р. С. Заборницын, И. К. Максимова, А. Ю. Павлова, В. В. Проглядо, В. В. Устинов. – Текст: непосредственный // *ФММ* **121**, 794–801 (2020).
7. А. А. Гермизина, Л. И. Наумова, М. А. Миляев, Р. С. Заборницын, А. Ю. Павлова, И. К. Максимова, В. В. Проглядо, И. Ю. Каменский, В. В. Устинов. *Физика твёрдого тела.* **65** 1348–1354 (2023).