Физика конденсированного состояния

Condensed state physics

УДК 537.622

МАГНИТНАЯ МИКРОСТРУКТУРА И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В ДИСКЕ КОРБИНО С МАГНИТНЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ

В. И. ГОЛОВЧУК[1)]***, М. Г. ЛУКАШЕВИЧ***[1)]

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*

Приводятся результаты исследования морфологии поверхности, магнитной микроструктуры и влияния доменных стенок на поперечный магниторезистивный эффект в диске Корбино с магнитным упорядочением. Диск Корбино изготовлен из тонкой пленки пермаллоя, полученной на ситалловой подложке методом ионно-лучевого распыления. Показано, что независимо от угла φ между направлением магнитного поля и плоскостью диска магнитосопротивление отрицательно и в зависимости от величины φ в интервале полей $B = 0{,}2–8{,}0$ мТл имеет резкий пик, обусловленный движением доменных стенок только при перемагничивании образца. Положение пика, его амплитуда и полуширина зависят от ориентации магнитное поле – плоскость диска. При взаимно перпендикулярной ориентации поле – плоскость обнаружено изменение знака магнитосопротивления в пике на положительный из-за перестройки доменных стенок блоховского типа, а в области технического насыщения намагниченности – изменение наклона магнитополевой зависимости анизотропного магнитосопротивления, обусловленное дополнительным вкладом положительной лоренцевской компоненты.

Ключевые слова: пермаллой; подложка; пленка; шероховатость; магнитная микроструктура; диск Корбино; магнитосопротивление.

Образец цитирования:
Головчук ВИ, Лукашевич МГ. Магнитная микроструктура и магниторезистивный эффект в диске Корбино с магнитным упорядочением. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2018;3:46–53.

For citation:
Halauchuk VI, Lukashevich MG. Magnetic microstructure and magnetoresistive effect in Corbino's disk with magnetic ordering. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2018; 3:46–53. Russian.

Авторы:
Виктория Ивановна Головчук – студентка физического факультета. Научный руководитель – М. Г. Лукашевич.
Михаил Григорьевич Лукашевич – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.

Authors:
Victoryia I. Halauchuk, student at the faculty of physics.
golovchuk95@mail.ru
Michail G. Lukashevich, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of semiconductors and nanoelectronic, faculty of physics.
lukashevich@bsu.by

MAGNETIC MICROSTRUCTURE AND MAGNETORESISTIVE EFFECT IN CORBINO'S DISK WITH MAGNETIC ORDERING

***V. I. HALAUCHUK*[a], *M. G. LUKASHEVICH*[a]**

[a]*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*
Corresponding author: M. G. Lukashevich (lukashevich@bsu.by)

The atomic- and magnetic-force microscopy results are presented for the transverse magnetoresistive effect in Corbino's disk with magnetic ordering. The disk was prepared on the setall substrate from permalloy film by means of ion-beam sputtering. It is shown that, independently of the magnetic field-disk plane orientation, magnetoresistance is negative and it reveals a sharp peak for a weak magnetic field in the interval B = 0.2–8.0 mT due to the domain wall motion. A position of the peak, its amplitude and half-width depends significantly on the magnetic field orientation with respect to the disk plane. During the out-of-plane magnetic field measurements changing of a sign of magnetoresistance within the peak and also changes in a slope of magnetoresistance due to the Lorentzian positive magnetoresistance contribution were observed.

Key words: permalloy; substrate; film; roughness; magnetic microstructure; Corbino disk; magnetoresistance.

Введение

В последние десятилетия не ослабевает интерес к изучению корреляции магнитных и гальваномагнитных характеристик твердотельных сред с магнитным упорядочением и разными механизмами переноса заряда при проявлении классических и квантовых размерных эффектов. В первую очередь это обусловлено возможностью быстрого и эффективного их применения при разработке гальваномагнитных датчиков широкого спектра применения в миниатюрном исполнении. Экспериментальные исследования в основном фокусируются на изучении этих явлений в тонко- и многослойных структурах, нанопроволоках и ансамблях магнитных наночастиц [1; 2]. Другим направлением исследований является выделение доли вклада рассеяния доменными стенками в величину кинетических коэффициентов и установление влияния вида и размера доменов и их стенок на протекание процессов переноса при намагничивании таких сред [3–11]. Поскольку смещение доменных стенок в магнитном поле приводит к бóльшим изменениям сопротивления, чем вращение намагниченности, можно ожидать использование этого эффекта в приборах спинтроники. В настоящее время в различных средах наблюдалось как уменьшение [3; 4], так и увеличение [4; 5] сопротивления таких сред при наличии доменных стенок [6; 9]. Это может быть связано с трудностями интерпретации изображений магнитной силовой микроскопии при характеризации магнитной микроструктуры, а также со слабым контролем формирования и управления динамикой перестройки доменных стенок или с движением носителей относительно стенки.

Одним из эффективных способов выделения влияния доменных стенок на величину магнитосопротивления (МС) и вид его магнитополевой зависимости может быть изучение МС в диске Корбино с магнитным упорядочением. При этом в случаях параллельной и взаимно перпендикулярной ориентации поле – плоскость диска можно ожидать разной величины как анизотропного [12], так и лоренцевского МС [10; 12], а также эффекта, обусловленного движением доменных стенок и гистерезисных явлений [6–9]. Цель работы – исследование особенностей гистерезиса МС при перемагничивании диска Корбино малой толщины с магнитным упорядочением при разных углах между плоскостью диска и направлением поля.

Методика эксперимента

Тонкие магнитоупорядоченные пленки пермаллоя ($Ni_{0,8}Fe_{0,2}$) были получены методом ионно-лучевого распыления мишени на ситалловую диэлектрическую подложку во внешнем магнитном поле B = 0,01 Тл. Толщина пленок d варьировалась в пределах 80–280 нм. Образцы в виде диска диаметром 5 мм изготавливались методом фотолитографии и травления. Омические контакты в центре диска и по периферической окружности формировались нанесением на поверхность пленки легкоплавкого припоя, к которому припаивались медные проволочки.

Морфология поверхности пленок исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц прибором

Solver P47HT-МДТ. Использовались кантилеверы серии NSG01 с радиусом закругления 10 нм. Величина шероховатости поверхности определялась как среднее арифметическое значение высоты микронеровностей, вычисленной от средней линии профиля (по модулю) в пределах заданной длины по проведенным не менее 5 раз измерениям на одном образце диаметром 5 мм. В качестве зондовых датчиков для исследования магнитной структуры использовались стандартные магнитные датчики для полуконтактных методов измерения (кантилеверы серии MFM0) с резонансной частотой 63 кГц. Толщина покрытия CoCr 40 нм, радиус закругления зонда 40 нм.

Поперечный магниторезистивный эффект измерялся в режиме генератора тока при комнатной температуре и сканировании магнитного поля в двух направлениях при разных углах φ между направлением поля и плоскостью диска в катушке Гельмгольца и электромагните с индукцией до 15 мТл и 1,5 Тл соответственно. Погрешность измерения индукции магнитного поля не превышала 1,5 %, установки угла ±15′, разброс экспериментальных точек измеренного МС в худшем случае не превышал 10 %.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны трехмерные АСМ-изображения поверхности ситалловой подложки (*а*), выращенной на ней пленки пермаллоя толщиной 80 нм (*б*) и двумерное изображение магнитной микроструктуры пленки пермаллоя.

Шероховатость R_a использованных для нанесения пленок ситалловых подложек не превышала 11,40 нм, а шероховатость выращенных на них пленок разных размеров изменялась в интервале 16,70–22,73 нм. На поверхности пленок наблюдались одиночные пики высотой до 120 нм (рис. 1, *б*), число которых на площади 100 мкм^2 не превышало 16. Таким образом, морфология поверхности тонких (до 280 нм) пленок пермаллоя, полученных ионным распылением на ситалловой подложке, в целом повторяет морфологию подложки и средняя шероховатость пленок варьируется в интервале 16,70–22,73 нм.

На двумерном изображении магнитного силового микроскопа этой же пленки отчетливо наблюдается хорошо выраженная квазисферическая доменная структура с антиколлинеарными направлениями

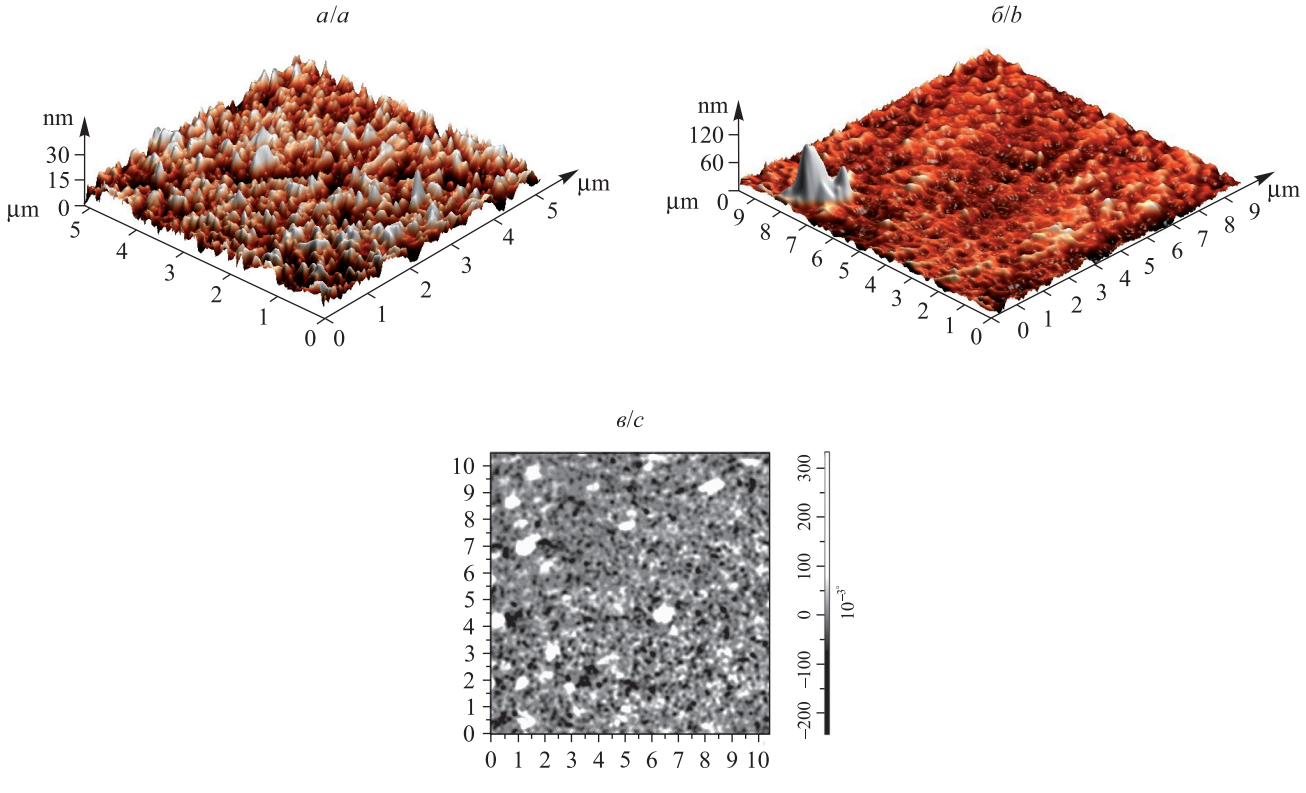

Рис. 1. Трехмерное АСМ-изображение поверхности ситалловой подложки (*а*), выращенной на ней пленки пермаллоя (*б*) и магнитная микроструктура этой же пленки (*в*)

Fig. 1. Three-dimensional AFM image of the surface of the sitall substrate (*a*) and permalloy film grown on it (*b*), the magnetic microstructure of the same film (*c*)

намагниченности перпендикулярно плоскости пленки – темные и светлые области, которые разделены областями с серым фоном, представляющими собой доменные стенки. Оценка размера доменов и стенок показала, что они изменяются от 0,1 до порядка 0,6 мкм. На разных участках пленки можно выделить начало формирования коротких домен полоскового типа с перпендикулярной магнитной анизотропией длиной до 1 мкм, окруженных квазинепрерывным состоянием с противоположной намагниченностью. Отметим, что достаточно большая площадь серого контраста может свидетельствовать о не слишком большой перпендикулярной магнитной анизотропии пленок в исходном магнитном состоянии диска Корбино.

На рис. 2 показаны петли гистерезиса МС пермаллоевого диска Корбино толщиной 120 нм, измеренные при параллельной ($\varphi = 0°$) и перпендикулярной ($\varphi = 90°$) ориентациях поле – плоскость диска. Стрелками указано направление изменения поля. В обоих случаях, как в области слабых полей, меньших поля технического насыщения намагниченности пермаллоя ($B < 0{,}5$ Тл), так и в более сильных, знак эффекта отрицателен. В слабом поле при этих φ величина МС не сильно отличается, в то время как в сильном при $B > 1$ Тл и $\varphi = 90°$ оно почти в 3 раза больше, а в области насыщения намагниченности ($B > 0{,}5$ Тл) магнитополевая зависимость МС близка к линейной только при $\varphi = 0°$, а при $\varphi = 90°$ и $B = 0{,}75$ Тл в МС отчетливо проявляется тенденция к насыщению.

Рассмотрим особенности МС в диске Корбино с магнитным упорядочением на основе феноменологической теории АМС магнитоупорядоченной среды [14], согласно которой в случае параллельной ориентации протекающего тока и намагниченности образца его сопротивление больше и увеличивается в магнитном поле, в то время как при взаимно перпендикулярной ориентации оно меньше и уменьшается в магнитном поле.

Характерной особенностью протекания тока в диске Корбино является его растекание от центрального электрода к периферическому, при котором в магнитном поле выделение продольного МС в «чистом» виде невозможно при любом φ. При этом, когда $\varphi = 0°$, т. е. когда магнитное поле параллельно плоскости диска, только одна компонента протекающего в плоскости диска тока перпендикулярна намагниченности, в то время как при $\varphi = 90°$ все компоненты тока перпендикулярны намагниченности насыщения, что и приводит к значительно большей величине измеряемого при $\varphi = 90°$ отрицательного МС. Изменение наклона магнитополевой зависимости при $B > 0{,}75$ Тл (рис. 2, кривая *2*) обусловлено дополнительным вкладом появляющейся в сильном поле компоненты положительного лоренцевского МС. Величина лоренцевского МС в такой геометрии измерений является наибольшей [13], так как линии тока в магнитном поле приобретают вид логарифмических спиралей, а отсутствие ЭДС Холла не компенсирует действие силы Лоренца на движущиеся электроны.

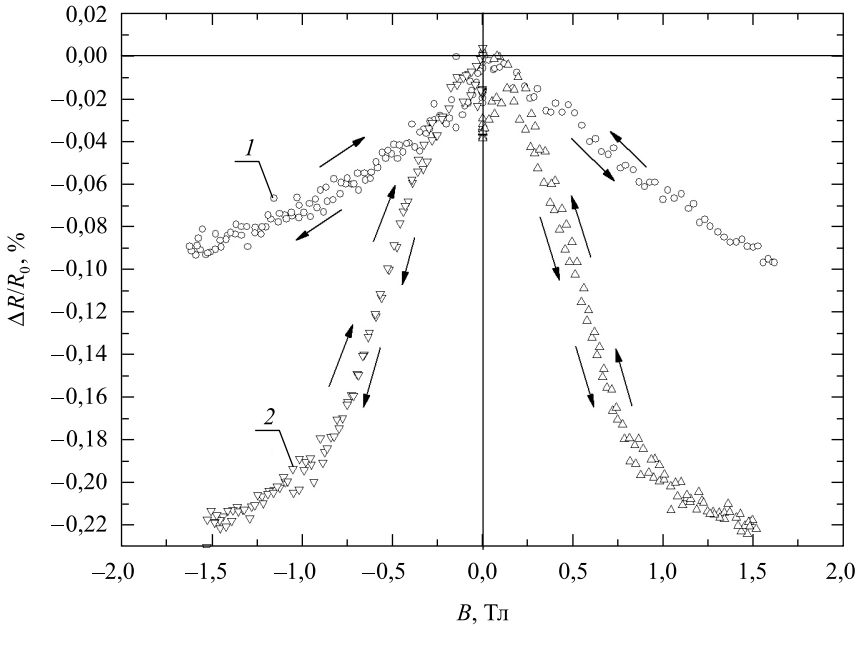

Рис. 2. Гистерезис МС пермаллоевого диска Корбино при параллельной (кривая *1*) и перпендикулярной (кривая *2*) ориентациях поле – плоскость диска

Fig. 2. Hysteresis of the magnetoresistance of the permalloy disk Corbino's with a parallel (curve *1*) and perpendicular (curve *2*) field – disk plane orientations

Отметим также наличие на рис. 2 резкого и узкого пика отрицательного МС в области очень слабых ($B \sim 1$ мТл) полей, достигающего по величине до 0,5 % (показан на рис. 3 при разных значениях φ). Положение пика, его амплитуда и полуширина зависят от величины φ, а при $\varphi = 90°$ наблюдается инверсия знака МС на положительный (см. рис. 3, *в*). При этом в области положительного МС полуширина пика значительно больше, на нем отчетливо проявляется колебательный характер изменения сопротивления образца в этой области магнитного поля, обусловленный перестройкой доменной структуры при перемагничивании. Следует подчеркнуть, что при уменьшении магнитного поля до нуля и повторном его увеличении в том же направлении пик МС не наблюдается. Отмеченные выше факты позволяют утверждать, что наблюдаемое в виде пика резкое изменение сопротивления пермаллоевого диска Корбино вызывается рассеянием электронов движущимися при перемагничивании доменными стенками, обычно проявляющимся в эффекте Баркгаузена.

Положение пика и его полуширина показывают, что наиболее легкая перестройка доменной структуры происходит при малых углах. Это согласуется с величиной размагничивающего фактора, который для аксиальной оси диска вследствие его малой толщины много больше, чем для радиального направления в плоскости диска.

Как и следовало ожидать из-за анизотропии формы, перемагничивание диска в направлении, перпендикулярном его плоскости, происходит в значительно большем поле, а резкая перестройка доменной структуры при этом приводит к изменению знака МС на положительный (см. рис. 3, *в*) и колебательному

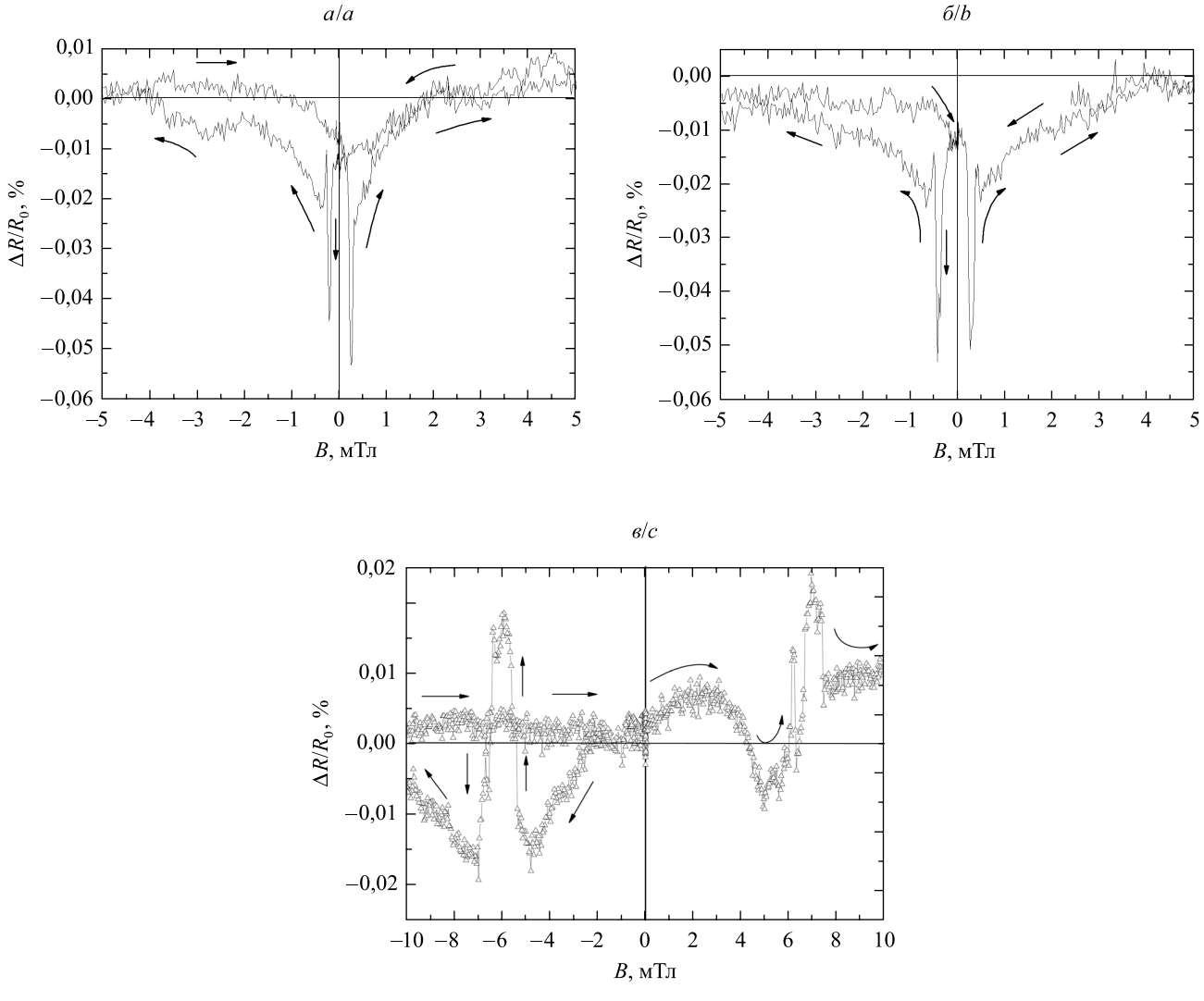

Рис. 3. Петля гистерезиса МС в пермаллоевом диске Корбино при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью диска: *а* – 0°; *б* – 45°; *в* – 90°

Fig. 3. The magnetoresistance hysteresis loop in the permalloy disk of Corbino at different angles between the direction of the magnetic field and the plane of the disk: *a* – 0°; *b* – 45°; *c* – 90°

характеру его величины. Можно отметить, что такое изменение знака магниторезистивного эффекта наблюдалось ранее при низких температурах в бислойных структурах сверхпроводник – ферромагнетик при смене типа магнитной структуры в ферромагнетике [15].

Известно, что в магнитных пленках толщиной меньше 20–30 нм устойчивой является граница Нееля, а при большей – Блоха [16]. Вместе с тем в пленках промежуточной толщины в интервале 30–120 нм часто наблюдается чередование элементов блоховских и неелевских границ, так называемых границ с перевязками. Анализ показывает, что только при наличии стенок Блоха, в которых изменение направления намагниченности в стенке перпендикулярно плоскости намагниченных доменов, при $\varphi = 90°$ возможно состояние, когда это направление параллельно протекающему току, что и приводит к смене знака МС. Более того, такое состояние неустойчиво и проявляется в виде колебаний, так как при дальнейшем увеличении поля намагниченность насыщения ориентируется перпендикулярно плоскости диска, т. е. перпендикулярно протекающему току.

Угловая зависимость положения пика МС в магнитоупорядоченном диске Корбино при увеличении магнитного поля в направлениях, условно обозначенных B_+ и B_-, показана на рис. 4. Можно видеть рост величины магнитного поля положения пика в интервале углов 0–90° при B_+ и его более резкое уменьшение для 90–180°, а также аналогичные противоположные изменения при увеличении магнитного поля в направлении B_-.

Разный вид угловой зависимости положения пика при противоположных направлениях поля обусловлен тем, что проекция намагниченности диска на направление магнитного поля (например, B_- при $0° < \varphi < 90°$ совпадает с направлением поля, т. е. намагниченность большей части доменов направлена так же, как и поле B_-, а при B_+ – антиколлинеарна ему, что и приводит к несколько большей величине поля наблюдения пика при разных направлениях. Поворот диска на угол $\varphi > 90°$, например в поле B_+, приводит к изменению направления проекции намагниченности на противоположное и, следовательно, к более быстрому уменьшению поля наблюдения пика в интервале углов 90–180°.

Угловая зависимость МС в области технического насыщения намагниченности для двух ориентаций поля при $B = 1$ Тл показана на рис. 5. Независимо от направления магнитного поля величины МС при φ, равном 0°, 180° и 360°, а также 90° и 270°, достаточно хорошо совпадают. Это свидетельствует о том, что вклад дополнительной лоренцевской компоненты МС, которая при $\varphi = 90°$ и $\varphi = 270°$ может быть разной из-за неодинаковости рассеяния носителей свободной поверхностью и поверхностью пленки на подложке, незначителен. Это согласуется с длиной свободного пробега электронов в пермаллое, которая для разных направлений спина электрона не превышает 1 нм.

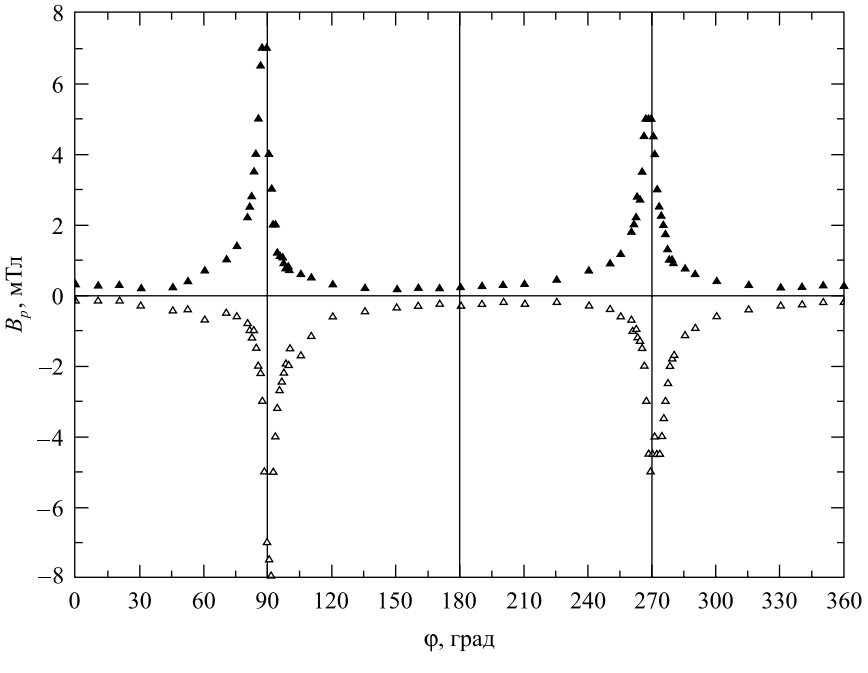

Рис. 4. Угловая зависимость положения пика МС пермаллоевого диска Корбино при увеличении поля в направлении B_+ и B_-

Fig. 4. Angular dependence of the peak position of the MC of the permalloy disk of Corbino with increasing field in the direction B_+ and B_-

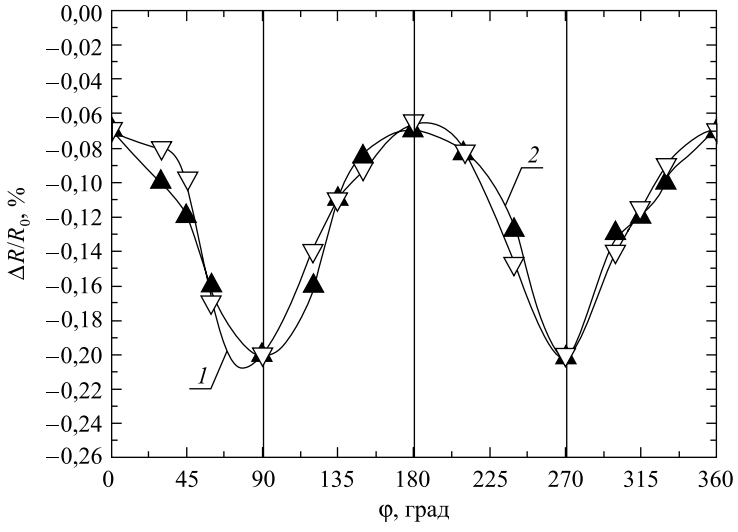

Рис. 5. Угловая зависимость МС пермаллоевого диска Корбино в магнитном поле $B = 1$ Тл при увеличении магнитного поля в направлении B_+ (кривая *1*) и B_- (кривая *2*)

Fig. 5. Angular dependence of the magnetoresistance of the permalloy disk of Corbino in a magnetic field $B = 1$ T with an increase in the magnetic field in the direction B_+ (curve *1*) and B_- (curve *2*)

Величина МС диска Корбино с магнитным упорядочением в области пика может определяться не только величиной анизотропии сопротивления магнитоупорядоченной среды, но и типом и числом пересекаемых носителями при движении от центрального контакта к периферическому доменных стенок, а также зависеть от угла пересечения стенки. Из рис. 4 следует, что в тонкопленочном диске Корбино наиболее легкая перестройка доменной структуры, приводящая к резкому изменению сопротивления образца в магнитном поле, наблюдается при малых углах отклонения поля от плоскости диска.

Заключение

Наличие магнитного упорядочения в диске Корбино из тонкой пленки пермаллоя приводит к отрицательному магниторезистивному эффекту независимо от ориентации направления магнитное поле – плоскость диска и колебанию величины МС в виде резкого пика в интервале полей $B = 0{,}2$–$8{,}0$ мТл только при перемагничивании диска. Установлено, что отрицательное МС, обусловленное анизотропией сопротивления магнитоупорядоченной среды, больше при взаимно перпендикулярной ориентации магнитное поле – плоскость диска, так как в этом случае все компоненты тока в плоскости диска перпендикулярны намагниченности насыщения. В области технического насыщения намагниченности анизотропное МС при $\varphi = 90°$ показывает тенденцию к насыщению из-за дополнительного вклада положительной лоренцевской компоненты. Положение пика МС, обусловленного перестройкой доменной структуры, его полуширина и амплитуда зависят от угла между плоскостью диска и направлением магнитного поля. При взаимно перпендикулярной ориентации магнитное поле – плоскость диска обнаружена инверсия знака магниторезистивного эффекта в пике с отрицательного на положительный, обусловленная перестройкой доменных стенок блоховского типа.

Библиографические ссылки

1. McGuire TR, Potter RI. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys. *IEEE Transactions on Magnetics.* 1975; 11(4):1018–1038. DOI: 10.1109/TMAG.1975.1058782.

2. Battle X, Labarta A. Finite size effects in fine particles: magnetic and transport properties. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2002;35(6):R15–R42. DOI: 10.1088/0022-3727/35/6/201.

3. Lyadov NM, Bazarov VV, Vagizov FG, Faizrakhmanov IA. Structural and magnetic studies of thin Fe57 films formed by ion beam assisted deposition. *Applied Surface Science.* 2016;378:114–119. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.03.193.

4. Ruediger U, Yu J, Zhang S, Kent AD, Parkin SSP. Negative domain wall contribution to the resistivity of microfabricated Fe wires. *Physical Review Letters.* 1998;80(25):5639–5642. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.5639.

5. Ravelosona D, Cebollada A, Briones F, Diaz-Paniagua C, Hidalgo MA, Batallan F. Domain-wall scattering in epitaxial FePd ordered alloy films with perpendicular magnetic anisotropy. *Physical Review B.* 1999;59(6):4322–4326. DOI: 10.1103/PhysRevB.59.4322.

6. Gregg JF, Allen W, Ounadjela K, Viret M, Hehn M, Thompson SM, et al. Giant magnetoresistive effects in a single element magnetic thin film. *Physical Review Letters.* 1996;77(8):1580–1583. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.1580.

7. Rudiger U, Yu J, Thomas L, Parkin SSP, Kent AD. Magnetoresistance, micromagnetism, and domain-wall scattering in epitaxial hep Co films. *Physical Review B.* 1999;59(18):11914–11918. DOI: 10.1103/PhysRevB.59.11914.

8. Sofin RGS, Arora SK, Shvets IV. Positive antiphase boundary domain wall magnetoresistance in Fe_3O_4 (110) heteroepitaxial films. *Physical Review B.* 2011;83(13):134436–1134436-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.83.134436.

9. Xu YB, Vaz CAF, Hirohata A, Leung HT, Yao CC, Bland JAC, et al. Magnetoresistance of a domain wall at a submicron junction. *Physical Review B.* 2000;61(22):14901–14904. DOI: 10.1103/PhysRevB.61.R14901.

10. Ebels U, Radulescu A, Henry Y, Piraux L, Ounadjela K. Spin accumulation and domain wall magnetoresistance in 35 nm Co wires. *Physical Review Letters.* 2000;84(5):983–986. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.983.

11. Corte-León H, Nabaei V, Manzin A, Fletcher J, Krzysteczko P, Schumacher HW, et al. Anisotropic magnetoresistance state space of permalloy nanowires with domain wall pinning geometry. *Scientific Reports.* 2014;4:1–10. DOI: 10.1038/srep06045.

12. Campbel IA, Fert A. Transport Properties of Ferromagnets. In: Wohlfarth EP, editor. *Ferromagnetic Materials*. Amsterdam, New York, Oxford: Noath-Holland Publishing Company; 1982. p. 747–805.

13. Lippman HJ, Kurt F. Der geometrieinflus auf den transversalen magnetischen widerstandseffekt bei rechteckformigen halbleiterplatten. *Zeitschrift für Naturforschung.* 1958;13a(6):462–474.

14. Birss RR. The saturation magnetostriction of polycrystals. *Proceeding of the Royal Society A.* 1960;75:8–16.

15. Русанов АЮ, Голикова ТЕ, Егоров СВ. Изменение знака магниторезистивного эффекта в бислойных структурах сверхпроводник/ферромагнетик при смене типа доменной структуры в ферромагнетике. *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики.* 2008;87(3):204.

16. Казаков ВГ. Тонкие магнитные пленки. *Соросовский образовательный журнал.* 1997;1:107–114.

References

1. McGuire TR, Potter RI. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys. *IEEE Transactions on Magnetics.* 1975; 11(4):1018–1038. DOI: 10.1109/TMAG.1975.1058782.

2. Battle X, Labarta A. Finite size effects in fine particles: magnetic and transport properties. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 2002;35(6):R15–R42. DOI: 10.1088/0022-3727/35/6/201.

3. Lyadov NM, Bazarov VV, Vagizov FG, Faizrakhmanov IA. Structural and magnetic studies of thin Fe57 films formed by ion beam assisted deposition. *Applied Surface Science.* 2016;378:114–119. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.03.193.

4. Ruediger U, Yu J, Zhang S, Kent AD, Parkin SSP. Negative domain wall contribution to the resistivity of microfabricated Fe wires. *Physical Review Letters.* 1998;80(25):5639–5642. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.5639.

5. Ravelosona D, Cebollada A, Briones F, Diaz-Paniagua C, Hidalgo MA, Batallan F. Domain-wall scattering in epitaxial FePd ordered alloy films with perpendicular magnetic anisotropy. *Physical Review B.* 1999;59(6):4322–4326. DOI: 10.1103/PhysRevB.59.4322.

6. Gregg JF, Allen W, Ounadjela K, Viret M, Hehn M, Thompson SM, et al. Giant magnetoresistive effects in a single element magnetic thin film. *Physical Review Letters.* 1996;77(8):1580–1583. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.1580.

7. Rudiger U, Yu J, Thomas L, Parkin SSP, Kent AD. Magnetoresistance, micromagnetism, and domain-wall scattering in epitaxial hep Co films. *Physical Review B.* 1999;59(18):11914–11918. DOI: 10.1103/PhysRevB.59.11914.

8. Sofin RGS, Arora SK, Shvets IV. Positive antiphase boundary domain wall magnetoresistance in Fe_3O_4 (110) heteroepitaxial films. *Physical Review B.* 2011;83(13):134436–1134436-9. DOI: 10.1103/PhysRevB.83.134436.

9. Xu YB, Vaz CAF, Hirohata A, Leung HT, Yao CC, Bland JAC, et al. Magnetoresistance of a domain wall at a submicron junction. *Physical Review B.* 2000;61(22):14901–14904. DOI: 10.1103/PhysRevB.61.R14901.

10. Ebels U, Radulescu A, Henry Y, Piraux L, Ounadjela K. Spin accumulation and domain wall magnetoresistance in 35 nm Co wires. *Physical Review Letters.* 2000;84(5):983–986. DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.983.

11. Corte-León H, Nabaei V, Manzin A, Fletcher J, Krzysteczko P, Schumacher HW, et al. Anisotropic magnetoresistance state space of permalloy nanowires with domain wall pinning geometry. *Scientific Reports.* 2014;4:1–10. DOI: 10.1038/srep06045.

12. Campbel IA, Fert A. Transport Properties of Ferromagnets. In: Wohlfarth EP, editor. *Ferromagnetic Materials*. Amsterdam, New York, Oxford: Noath-Holland Publishing Company; 1982. p. 747–805.

13. Lippman HJ, Kurt F. Der geometrieinflus auf den transversalen magnetischen widerstandseffekt bei rechteckformigen halbleiterplatten. *Zeitschrift für Naturforschung.* 1958;13a(6):462–474.

14. Birss RR. The saturation magnetostriction of polycrystals. *Proceeding of the Royal Society A.* 1960;75:8–16.

15. Rusanov AYu, Golikova TE, Egorov SV. Change in the sign of the magnetoresistive effect in bilayer structures of a superconductor/ferromagnet upon a change in the type of domain structure in a ferromagnet. *JETP Letters.* 2008;87(3):204. Russian.

16. Kazakov VG. Thin magnetic films. *Soros Educational Journal.* 1997;1:107–114. Russian.

Статья поступила в редколлегию 25.05.2018.
Received by editorial board 25.05.2018.