

11. Афанасьев, А. А. О радиационных силах, действующих на прозрачную наночастицу в поле сфокусированного лазерного пучка / А.А. Афанасьев, Л. С. Гайда, Д. В. Гузатов, А. Н. Рубинов, А. Ч. Свистун // Квантовая электроника. - 2015. - Т.45. - № 10. - С.604-607.
12. Афанасьев, А. А. Транспортировка сферической прозрачной наночастицы радиационными силами в поле гауссова пучка лазерного излучения / А.А. Афанасьев, Л.С. Гайда, Д.В. Гузатов, Д.В. Новицкий, Е.В. Матук. // Оптика и спектроскопия. - 2016. - Т.120. - № 1. - с.53–57.
13. Ахманов, С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – Москва: Наука, 2004. – 654 с.
14. Skelton, S.E. Evanescent wave optical trapping and transport of micro- and nanoparticles on tapered optical fibers / S.E. Skelton [et. al.] // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2012. – Vol.113. – P.2512-2520.
15. Yang, C. Guided transport of nanoparticles by plasmonic nanowires / C. Yang [et.al.] // Nanoscale. – 2016. – Vol.8. – P.19195–19199.
16. Brambilla, G. Optical manipulation of microsphere along a sub wavelength wire / G. Brambilla [et.al] // Optics Letters. – 2015. – Vol.32. – P.3041-3043.
17. Yang, A. Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides / A.Yang [et.al] // Nature. – 2009. – Vol.457. – P.71-75.
18. Ahluwalia, B.S. Waveguide trapping of hollow glass sphere / B.S. Ahluwalia, P. Lovhagen, O.G. Helleso // Optics Letters. – 2011. – Vol.36. – P.3347-3349.
19. Kien, F.L. Atom trap and waveguide using a two-color evanescent light field around a subwavelength-diameter optical fiber/ F.L. Kien, V.I. Balykin, K. Hakuta // Phys. Review. – 2004. – Vol. 70. – P.06343-1–9.
20. Xiao, J.J. Bipolar optical forces on dielectric and metallic nanoparticles by evanescent wave/ J.J. Xiao [et.al] // Opt. Letters. – 2010. – Vol.35. – P.962-964.

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ ДИСКА КОРБИНО С МАГНИТНЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ

В. И. Головчук, М. Г. Лукашевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: Lukashevich@bsu.by*

В температурном интервале $T=300\text{--}2\text{К}$ изучены петли гистерезиса поперечного магниторезистивного эффекта в диске Корбино с магнитным упорядочением при параллельной ($\varphi = 0^\circ$) и перпендикулярной ($\varphi=90^\circ$) ориентациях направления магнитного поля с индукцией до $B = \pm 1\text{Тл}$ и плоскостью диска. Показано, что на магнитополовых зависимостях магнитосопротивления (МС) наблюдаются резкие пики отрицательного МС (ОМС), обусловленные перестройкой доменной структуры при перемагничивании образца, положение которых определяется углом между направлением магнитного поля и плоскостью диска, а также температурой.

Ключевые слова: пермаллой; магнитосопротивление; подложка; пленка; диск Корбино; магнитное упорядочение.

PECULIARITY OF THE LOW TEMPERATURE MAGNETORESISTIVE EFFECT IN A CORBINO'S DISK WITH MAGNETIC ORDERING

V. I. Golovchuk, M. G. Lukashevich

Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

Corresponding author: M. G. Lukashevich (Lukashevich@bsu.by)

In the temperature range $T=300-2K$, the transverse magnetoresistive effect hysteresis loops in the Corbino disk with magnetic ordering were studied at parallel ($\varphi=0^\circ$) and perpendicular ($\varphi=90^\circ$) orientations of the magnetic field direction with induction up to $B = \pm 1T$ and a plane disk. It is shown that the magnetic field dependences of the magnetoresistance (MR) exhibit sharp peaks in the negative MR (NMR) caused by the rearrangement of the domain structure upon magnetization reversal of the sample, the position of which is determined by the angle between the direction of the magnetic field and the plane of the disk, as well as by the temperature.

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

ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследований гальваномагнитных явлений как в диамагнитных, так и в магнитоупорядоченных средах при разных механизмах переноса носителей заряда фокусируется на их изучении в тонко- и многослойных структурах, нанопроволоках и ансамблях магнитных наночастиц в изолирующей или проводящей матрицах и нахождении корреляции между электрическими, магнитными и гальваномагнитными характеристиками [1, 2]. При этом большое внимание уделяется установлению влияния доменных стенок на знак и величину гальваномагнитных коэффициентов, а также на протекание электронных процессов при перемагничивании [3–11]. Надо отметить, что в различных средах с магнитным упорядочением наблюдалось как уменьшение, так и увеличение сопротивления в магнитном поле из-за наличия доменных стенок [6, 9]. Эффективным способом выделения влияния доменных стенок на знак, величину и вид магнитолевой зависимости магниторезистивного эффекта может быть его изучение в тонкопленочном диске Корбино с магнитным упорядочением при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью диска, так как из-за проявления геометрических и размерных эффектов следует ожидать как значительных изменений величины эффекта, так и вклада разных его компонент. Так в случае предельных ориентаций диска в магнитном поле ($\varphi=0^\circ$ и $\varphi=90^\circ$) при низкой температуре можно ожидать разной величины как анизотропного [12] так и лоренцевского МС [13], а также эффекта, обусловленного движением доменных стенок и наблюдения при этом гистерезисных явлений, процессов тренировки [2, 6–9], или процессов слабой локализации [14].

Целью данной работы явилось изучение особенностей гистерезиса МС при низких температурах в случае перемагничивания диска Корбино с магнитным упорядочением при параллельной и взаимно перпендикулярной ориентациях направление магнитного поля – плоскость диска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пленки пермаллоя ($\text{Ni}_{0,8}\text{Fe}_{0,2}$) с магнитным упорядочением были получены методом ионно–лучевого распыления мишени на ситалловую диэлектрическую подложку во внешнем магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл. Толщина пленок варьировались в пределах $d = (80\text{--}280)$ нм. Образцы в виде диска диаметром 5 мм изготавливались методом фотолитографии и травления. Омические контакты в центре диска и по его периферической окружности формировались нанесением на поверхность пленки легкоплавкого припоя, к которому припаивались медные проволочки.

Поперечный магнитоиндуктивный эффект измерялся в режиме генератора тока в температурном интервале 2–300 К при сканировании магнитного поля двух направлениях до $B = \pm 1$ Тл. Измерения проводились при параллельной ($\varphi=0^\circ$) и взаимно перпендикулярной ($\varphi=90^\circ$) ориентациях направления магнитного поля – плоскость диска. Погрешность измерения индукции магнитного поля не превышала 1,5 %, а установки угла поле – плоскость диска $\pm 0,5^\circ$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 и 2 (а), (б) и (в) можно видеть, как изменяется знак, вид магнитополевой зависимости и величина поперечного МС пермаллового диска Корбино толщиной $d=120$ нм при понижении температуры в случае измерения петли гистерезиса при параллельной ($\varphi=0^\circ$, рис. 1) и взаимно перпендикулярной ($\varphi=90^\circ$, рис. 2) ориентациях магнитное поле–плоскость диска.

При $\varphi=0^\circ$ магнитополевая зависимость МС и знак эффекта претерпевают существенные изменения с понижением температуры, в то время как при $\varphi=90^\circ$ такого сильного изменения не наблюдается. Так знак эффекта при $\varphi=0^\circ$ с понижением температуры изменяется с положительного на отрицательный только при $T=300\text{К}$, в то время как при $\varphi=90^\circ$ такое изменение наблюдается при любых температурах. При этом независимо от угла понижение температуры приводит к доминированию положительного МС (ПМС) при $\varphi=0^\circ$ в сильном поле, а при $\varphi=90^\circ$ в слабом.

Отметим также, что в слабом поле при разных температурах величина МС не сильно отличается, в то время как в сильном при $\varphi=90^\circ$, $B=1\text{Тл}$ и $T=300\text{ К}$ оно более чем в три раза превышает его величину при $\varphi=0^\circ$ в то время как при $T=2\text{К}$ эффект противоположен по знаку но имеет близкие величины.

Можно видеть также, что характерная для ферромагнетика линейная зависимость МС от поля [15] наблюдается только при $\varphi=0^\circ$ (рис.1, а, б), а при $\varphi=90^\circ$ она не линейна и при $B > 0,75$ Тл на ней отчетливо проявляется тенденция к насыщению (рис. 2), которая может быть обусловлена дополнительным вкладом лоренцевской компоненты ПМС. В такой геометрии измерений положительная компонента ПМС является наибольшей [13], так как линии тока диска Корбино в магнитном поле имеют вид логарифмических спиралей, а отсутствие поля Холла не компенсирует действие силы Лоренца на движущиеся электроны. Таким образом, общий вид магнитополевых зависимостей поперечного МС при разных температурах свидетельствует, что измеряемый эффект представляет собой аддитивное сложение положительной и отрицательной компонент, которые могут иметь разную природу и отличаться не только знаком и величиной, но и функциональной зависимостью от магнитного поля.

Независимо от угла поле-плоскость диска понижение температуры измерений приводит к увеличению величины магнитного поля, при которой положительное МС достигает максимальной величины, что отражает увеличение магнитного поля насыщения намагниченности диска, до которого в магнитоупорядоченной среде доминирует анизотропное АМС.

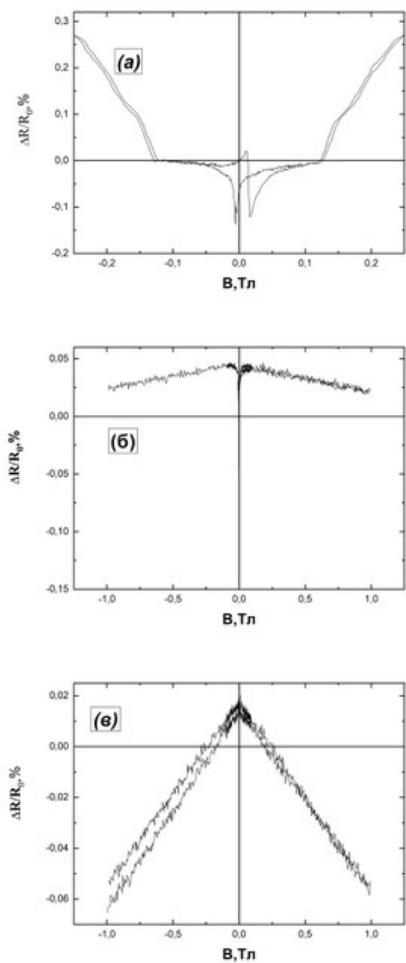


Рисунок 1. – Петли гистерезиса магниторезистивного эффекта пермаллового диска Корбино толщиной d = 120нм при φ=0°, измеренные при разных температурах: (а) – 300К, (б) – 100К, (в) – 2К

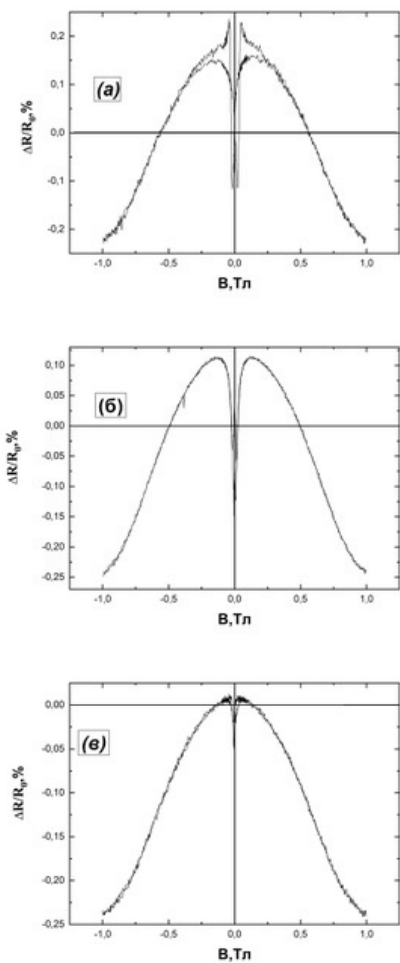


Рисунок 2. – Петли гистерезиса магниторезистивного эффекта пермаллового диска Корбино толщиной d = 120нм при φ=90°, измеренные при разных температурах: (а) – 300К, (б) – 100К, (в) – 2К

Согласно феноменологической теории АМС магнитоупорядоченной среды [16] в случае параллельной ориентации протекающего тока и намагниченности образца его сопротивление увеличивается в магнитном поле (ПМС), в то время как при взаимно перпендикулярной ориентации – оно уменьшается (ОМС). 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 независимо его ориентации диска в магнитном поле.

При этом в тонкопленочном диске Корбино с направлением намагниченности близким к плоскости диска должна доминировать положительная компонента МС. При достижении поля технического насыщения намагниченности уменьшение сопротивления в магнитном поле может вызываться уменьшением рассеяния на спиновом беспорядке, которое при понижении температуры уменьшается, что наблюдается на рис. 1. В то же время при $\varphi=90^\circ$ и достижении насыщения намагниченности линии тока в диске перпендикулярны намагниченности, что приводит к доминированию ОМС. В такой геометрии измерений ПМС может отражать начальный поворот намагниченности в плоскости пленки и на заключительной стадии намагничивания увеличение нормальной составляющей намагниченности.

Как видно из положения пика и его полуширины (рис. 3 и 4) легкая перестройка доменной структуры происходит при $\varphi=0^\circ$, что согласуется с измеренными петлями гистерезиса намагниченности и величиной размагничивающего фактора диска, который для аксиальной оси диска вследствие его малой толщины много больше, чем для радиального направления в плоскости диска.

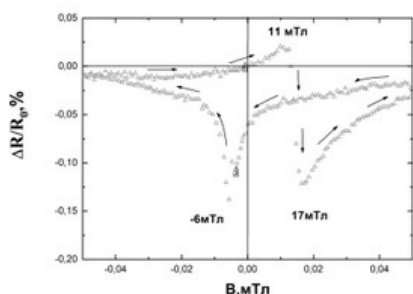


Рисунок 3. – Петля гистерезиса МС пермаллового диска Корбино в слабом магнитном поле при $\varphi=0^\circ$ и $T=2\text{K}$

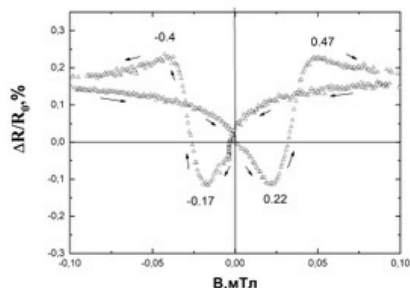


Рисунок 4. – Петля гистерезиса МС пермаллового диска Корбино в слабом магнитном поле при $\varphi=90^\circ$ и $T=2\text{K}$

Как и следовало ожидать из-за анизотропии формы, перемагничивание диска в направлении перпендикулярном его плоскости, а следовательно, и пик ОМС наблюдаются в значительно большем поле. Однако при низких температурах изменения знака МС в пике на положительный, и колебательного характера его величины, что было характерно для измерений при комнатной температуре [17] и низкотемпературных измерений в бислойных структурах сверхпроводник-ферромагнетик при смене типа магнитной структуры в ферромагнетике [18] не наблюдалось.

В заключение отметим, что знак и величина МС диска Корбино с магнитным упорядочением в области пика может определяется не только величиной анизотропии сопротивления магнитоупорядоченной среды, но числом, типом и размером пересекаемых носителями доменных стенок, а также зависеть от изменяющегося в магнитном поле угла под которым носитель пересекает доменную стенку. Так в магнитных пленках толщиной меньше 20–30 нм устойчивой является граница Нееля, а при больших – Блоха [19]. В пленках промежуточной толщины в интервале

30–120 нм часто наблюдается чередование элементов блоховских и неелевских границ, так называемых границ с перевязками. Однако перечисленные выше вопросы находятся в стадии интенсивных как теоретических, так и экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в тонкопленочном пермалловом диске Корбино с магнитным упорядочением в температурном интервале $T=300\text{--}2\text{ К}$ наблюдаются резкие пики отрицательного магнитосопротивления, обусловленные перестройкой доменной структуры при перемагничивании образца, положение которых определяется углом между направлением магнитного поля и плоскостью диска, а также температурой. Установлено, что изменение температуры в интервале $T=300\text{--}2\text{ К}$ приводит к изменению положения пика от 0,2 мТл до 6 мТл при параллельной и от 8–22 мТл в случае взаимно перпендикулярной ориентации магнитное поле-плоскость диска. Изменение ориентации магнитного поля от параллельной плоскости диска до перпендикулярной при $T=2\text{ К}$ приводит к изменению положения пика в интервале от $B_{\text{п}}=6\text{--}22\text{ мТл}$. Независимо от температуры отрицательное магнитосопротивление, 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, а в области технического насыщения намагниченности при $\varphi=90^\circ$ оно показывает тенденцию к насыщению из-за дополнительного вклада положительной лоренцевской компоненты и уменьшения рассеяния на спиновом беспорядке при понижении температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. McGuire, T. R. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys / T. R. McGuire, R. I. Potter // *IEEE Trans. on Magnetics*.– 1975.– Vol. 11.– № 4.– P.1018–1034
2. Battle, X. Finite – size effects in fine particles: magnetic and transport properties / X. Battle, A. Labarta // *J. Phys. D: Appl. Phys.*– 2002.– Vol. 35.– P.15–42.
3. Structural and magnetic studies of thin Fe^{57} films formed by ion beam assisted deposition / Lyadov N.M, Bazarov V.V, Vagizov F.G. // *Structural and magnetic studies of thin Fe^{57} films formed by ion beam assisted deposition*//*Applied Surface Science*. –2016.–Vol.378, Is.– P.114–119.
4. Negative domain wall contribution to the resistivity of microfabricated Fe wires / U. Ruediger, J.Yu., S. Sung, A.D. Kent S.S.P. Parkin // *Physical Review Letters*.–1998.–Vol.80.–P. 5639–5642.
5. D.Ravelosona, Domain-wall scattering in epitaxial FePd ordered alloy films with perpendicular magnetic anisotropy / D.Ravelosona, A. Cebollada, F. Briones [et. al] // *Physical Review*.–1999. Vol.59.– P.4322–4326.
6. Giant magnetoresistive effects in a single element magnetic thin film / J.F. Gregg [et. al] // *Physical Review Letters*.– 1996. –Vol.77. –№8.–P.1580–1583.
7. Rudiger U. Magnetoresistance, micromagnetism, and domain-wall scattering in epitaxial hep Co films/ Rudiger U, Yu J, Thomas L. // *Phys. Rev.*–1999.–Vol. 59.–№18.–P.11914–11918.
8. Positive antiphase boundary domain wall magnetoresistance in Fe_3O_4 (110) heteroepitaxial films. / R.G.S. Sofin [et al.] // *Physical Review*. –2011.–Vol.83.– №13.–P.134436–1134439.
9. Magnetoresistance of a domain wall at a submicron junction / Y. B. Xu[et al.]// *Physical Review*.– 2000.–Vol.61.–P.14901–14904.
10. Spin accumulation and domain wall magnetoresistance in 35 nm Co wires. / U Ebels [et al.] // *Physical review letters*. – 2000.–Vol.84.–№ 5.–P.983.
11. H. Corte-Leon, Anisotropic magnetoresistance state space of permalloy nanowires with domain wall pinning geometry/ H. Corte-Leon, V. Nabaei // *Scientific Reports*.–2014.–Vol.4.–P.1–10.

12. I.A. Campbell, A.Fert. Transport Properties of Ferromagnets» in Ferromagnetic Materials. Amsterdam, New York, Oxford.— 1982.—P.747–805.
13. Lippman, H. J. Der geometrieinflus auf den transversalen magnetischen widerstandseffekt bei rechteckformigen halbleiterplatten / H. J. Lippman, F. Kurt // Zs. Naturforsch.—1958.— Vol.13a.— № 6.— P.462–474.
14. Bergman, G. Weak Localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B.—1984.—Vol.107.—№1.— P.1–58.
15. Electron-magnon scattering and magnetic resistivity in 3d ferromagnets / B.Raquet [et al.] // Physical Review B.— 2002.— Vol.66.— №2.—P.024433.
16. Birss, R. R. The saturation magnetostriction of polycrystals / R.R. Birss // Pros. Roy. Sos.—1960.— Vol.75.—P.8–16.
17. Магнитная микроструктура и магниторезистивный эффект в диске корбино с магнитным упорядочением / В. И. Головчук, М.Г. Лукашевич // Журн. Белорус.гос. ун-та. Физика.— 2018.— № 2.—С.47–56.
18. Русанов, А.Ю. Изменение знака магниторезистивного эффекта в бислойных структурах сверхпроводник/ферромагнетик при смене типа доменной структуры в ферромагнетике / А. Ю. Русанов, Т. Е. Голикова, С. В. Егоров // Письма в ЖЭТФ.— 2008.—Т.87.— №3.—С. 204.
19. Казаков, В.Г. Тонкие магнитные пленки / В.Г. Казаков // Соросовский образовательный журнал.—1997.— №1.—С.107–114.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ИОНОВ НА ПОДЛОЖКУ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ НАНОПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЯХ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСКОРЯЮЩИХ ПОТЕНЦИАЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**В. К. Гончаров, А. А. Горбачевич, Е. И. Козлова, Л. С. Лобановский,
Д. П. Прокопеня, М. В. Пузырёв, Н. И. Шульган**

*Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко" Белорусского государственного университета, ул. Курчатова 7,
220108 Минск, Республика Беларусь, e-mail: puzyrev@bsu.by*

Экспериментально получены ионные потоки в лазерно-плазменном источнике для осаждения нанопокровов на различных подложках. Показано, что поток ионов зависит от интенсивности воздействующего лазерного излучения и приложенного электрического поля. Экспериментально показано, что влияние вторичного фотоэффекта от лазерного излучения и эрозионного факела незначительно.

Ключевые слова: лазерная плазма; лазерное излучение; ионные потоки; нанотехнологии.

THE FORMATION OF THE ION FLUX TO THE SUBSTRATE FOR APPLICATION OF NANO-COATING AT DIFFERENT INTENSITIES OF LASER RADIATION AND THE ACCELERATION POTENTIALS OF THE ELECTRIC FIELD

**V. K. Goncharov, A. A. Harbatsevich, E. I. Kozlova, L. S. Lobanovsky,
D. P. Prakapenia, M. V. Puzyrev, N. I. Shulhan**

*A.N.Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,
7 Kurchatov St., 220045, Minsk, Belarus
Corresponding author: M. V. Puzyrev (puzyrev@bsu.by)*