

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗА С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ИОННО-СТИМУЛИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ

В.И. Головчук¹⁾, Ю.А. Бумай²⁾, М.Г. Лукашевич¹⁾,
Н.М. Лядов³⁾, И.А. Файзрахманов³⁾, Р.И. Хайбуллин³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, Lukashevich@bsu.by

²⁾Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости 65, 220013 Минск, Беларусь, yuabumai@bntu.by

³⁾Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный
центр РАН, Сибирский тракт 10/7, 420029 Казань, Россия, rik@kfti.knc.ru

Представлены результаты измерений температурной зависимости сопротивления, гистерезиса поперечного и продольного магнитосопротивления (МС) при параллельной ($\varphi = 0^\circ$) и перпендикулярной ($\varphi = 90^\circ$) ориентациях направление магнитного поля-плоскость пленки в тонких ($d = 80$ нм) пленках нанокристаллического железа с доминированием перпендикулярной магнитной анизотропии в температурном интервале 300-2К и магнитном поле до 8 Тл. Обнаружена сильная зависимость знака, величины и вида магнитополевой зависимости МС от температуры (механизма электронного транспорта), угла между направлением магнитного поля и плоскостью пленки, магнитной анизотропии пленки.

Ключевые слова: пленка; железо; магнитосопротивление; намагниченность; магнитная анизотропия.

ELECTRICAL AND GALVANOMAGNETIC CHARACTERISTICS OF NANOCRYSTALLINE IRON FILMS WITH PERPENDICULAR MAGNETIC ANISOTROPY FORMED BY ION-STIMULATED DEPOSITION

V.I. Halauchuk¹⁾, Y.F. Bumai²⁾, M.G. Lukashevich¹⁾,
Nikolay Lyadov³⁾, Ildar Faizrahmanov³⁾, Rustam Khaibullin³⁾

¹⁾Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, Lukashevich@bsu.by

²⁾Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, Belarus,

³⁾Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, 10/7 Sibirsky Trakt, 420029 Kazan, Russia, rik@kfti.knc.ru

Measurements of the resistance temperature dependence, transverse and longitudinal magnetoresistance (MR) hysteresis loops at parallel ($\varphi = 0$) and perpendicular ($\varphi = 90^\circ$) orientations of the magnetic field direction - film plane in thin ($d = 80$ nm) films of nanocrystalline iron films have been carried out in the temperature range of 300- 2K and field up to 8T. The films were obtained by ion beam assisted deposition on a silicon substrate. A strong dependence of the sign, magnitude and type of the magnetic field dependence of the MR on temperature (electron transport mechanism), the angle between the direction of the magnetic field and the plane of the film, and the magnetic anisotropy of the film was found.

Keywords: film; iron; magnetoresistance; magnetization; magnetic anisotropy.

Введение

Широкое применение в магнитоэлектронике и спинтронике тонких пленок и

многослойных структур с магнитным упорядочением вызывает большой интерес к поиску корреляции между магнитной мик-

роструктурой, их электрическими и гальваномангнитными характеристиками [1]. В магнитных наноструктурированных системах спин-зависимое рассеяние или туннелирование может играть ключевую роль в зависимости изменения сопротивления от внешнего магнитного поля (магнитосопротивление (МС)), направления намагниченности отдельных кристаллитов и температуры. В таких системах наряду с классическими эффектами анизотропного [2] или обычного (лоренцевского) [3] МС (АМС) и (ЛМС) соответственно может доминировать рассеяние на доменных стенках или магнетонное рассеяние [4, 5]. Надо отметить, что до настоящего времени нет устоявшихся представлений не только о влиянии типа доменных стенок на транспортные характеристики, но и о дополнительном вкладе смещения доменных стенок при перемагничивании на знак и величину МС. Отмеченные выше механизмы рассеяния являются спин-зависимыми и могут рассматриваться как перспективные для практического применения при разработке приборных структур со спиновой зависимостью электронных процессов переноса [1, 6].

Целью работы являлось установление влияния механизма электронного транспорта и геометрии измерений на гальваномангнитные характеристики нанокристаллических пленок железа с перпендикулярной магнитной анизотропией поскольку магнитная микроструктура образца, например, из-за рассеяния поляризованных электронов на доменных стенках, при их перестройке может оказывать существенное влияние на его гальваномангнитные характеристики.

Методика эксперимента

В работах [7, 8] были детально изучены структура, фазовый состав и магнитные характеристики тонких пленок железа, сформированных методом ионно-стимулированного осаждения. В данной работе этим же методом осаждения были получены тонкие ($d=80\text{нм}$) нанокристаллические

пленки α -фазы железа на кремневой подложке с перпендикулярной магнитной анизотропией. Омические контакты изготавливались путем ультразвуковой пайки медных проволочек. Петли гистерезиса поперечного и продольного МС измерялись на линейном участке вольтамперной характеристики в интервале температур $T = 2 - 300\text{ К}$ при повышении температуры и сканировании магнитного поля до 8 Тл в двух направлениях без размагничивания образца перед каждым измерением. Поперечный магниторезистивный эффект измерялся при значениях угла между направлением вектора магнитного поля и плоскостью образца ($\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$), а продольный при $\varphi=0^\circ$.

Результаты и их обсуждение

Как отмечалось выше, синтезированные пленки представляют собой наноструктурированный материал, в котором нанокристаллиты α -железа с диаметром $\sim 10\text{ нм}$, разделены неупорядоченными прослойками его оксидов. В таких пленках при изменении температуры следует ожидать доминирования разных механизмов электронного транспорта. Температурная зависимость сопротивления показана на рис. 1.

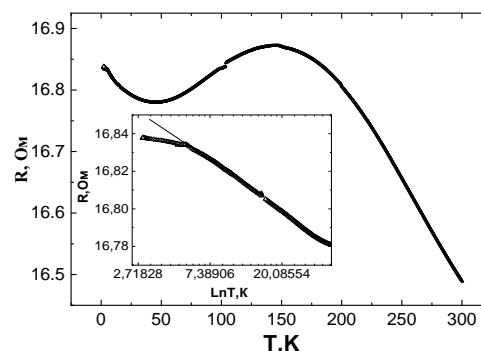


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления пленки. На вставке показана зависимость в интервале $T=35 - 2\text{ К}$ в логарифмическом масштабе
Fig. 1. Temperature dependence of film resistance. The inset shows the dependence in the interval $T = 35 - 2\text{ К}$ on a logarithmic scale.

Как видно, увеличение сопротивления до температуры максимума $T_{\text{max}} \approx 150\text{ К}$ не определяется активационными процес-

сами, а определяется доминированием перколяционного процесса переноса электронов по аморфным прослойкам с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. При $T < T_{\max}$ доминируют процессы перколяции электронов по включениям железа, т.е. чисто диффузионный механизм проводимости.

Увеличение сопротивления пленок при $T \leq 35\text{K}$ может вызываться процессами слабой электронной локализации [9], туннелированием между металлическими кристаллитами [10] или отражать наличие магнитного фазового перехода. Проведенный анализ показал, что в интервале температур $T = 35 - 5\text{K}$ сопротивление исходных пленок хорошо интерполируется логарифмической зависимостью, характерной для тонких слабо разупорядоченных пленок (вставка на рис. 1), т.е. определяется процессами слабой локализации или электрон-электронного взаимодействия [9]. Отклонение от логарифмической зависимости при самых низких температурах $T < 5\text{K}$ может быть связано с влиянием спин-орбитального взаимодействия на процессы электронного транспорта.

Отметим, что в пленках железа, содержащих нанометровые островки железа [11], наблюдаемое увеличение сопротивления при низких температурах было связано с появлением неоднородной намагниченности пленки при понижении температуры из-за замораживания направления спинов на границах островков и, как следствие, усиления спин-зависимого рассеяния.

На рис. 2 - 4 показаны петли гистерезиса поперечного (рис. 2, 3) и продольного (рис. 4) МС, измеренные при параллельной ($\varphi=0^\circ$; рис. 2) и перпендикулярной ($\varphi=90^\circ$; рис. 3) ориентациях направления магнитного поля-плоскость пленки и разных температурах.

Можно видеть, что петли гистерезиса поперечного МС при $\varphi = 0^\circ$ и продольного эффектов (рис. 2 и 4), т.е. когда магнитное поле параллельно плоскости пленки, независимо от направления и величины магнитного поля, достаточно хорошо корре-

лируют по знаку, величине и виду магнитополевой зависимости. Такая корреляция подтверждает доминирование перколяционного механизма переноса электронов при $T > T_{\max}$, когда соотношение путей протекания тока перпендикулярно и параллельно магнитному полю приблизительно одинаково и МС линейно зависит от поля [12, 13].

Изменение ориентации магнитного поля от $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = 90^\circ$ (рис. 2 и 3) приводит к кардинальным изменениям как знака, так величины и вида магнитополевой зависимости поперечного МС, в то время как понижение температуры до $T = 2\text{K}$ лишь незначительно изменяет величину эффекта, за исключением $\varphi = 90^\circ$ (рис. 3в), когда при $T=2\text{K}$ наблюдается смена знака МС с отрицательного на положительный. Проанализируем основные закономерности изменения МС на основе феноменологической теории анизотропии сопротивления магнитоупорядоченной среды с учетом температурного изменения механизма проводимости. Характерной величиной магнитного поля, определяющей влияние внешнего поля на сопротивление такой среды, является поле насыщения намагниченности, которое при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ равны 0.2 и 1.25 Тл соответственно [7, 8]. Исходя из этих величин можно заключить, что в сильном поле линейное положительное МС обусловлено влиянием поля на процессы перколяции электронов по металлическим включениям железа и его оксидов.

Отсутствие квадратичной зависимости МС в слабом поле свидетельствует о доминировании отрицательного анизотропного МС, когда направление тока перпендикулярно намагниченности [2, 14]. Петля гистерезиса МС в слабом поле не характерна для обычного гигантского эффекта, а отражает магнитную неоднородность пленок, т.е. характерна для инверсного гигантского магниторезистивного эффекта (ГМС) [15, 16]. Можно отметить, что в области низких температур в режиме слабой локализации $T < 35\text{K}$ гистерезисных явле-

ний в МС не наблюдалось и эффект определялся только влиянием поля на интер-

ферационные процессы в слабо разупорядоченном проводнике.

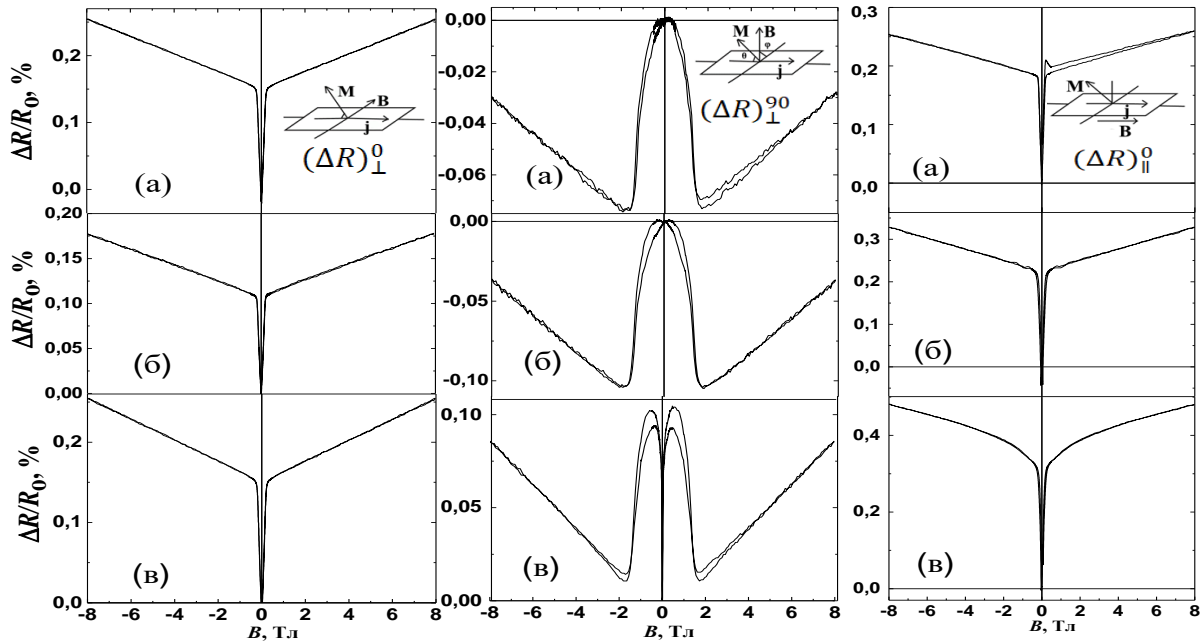


Рис. 2, 3, 4. Петли гистерезиса поперечного магнитосопротивления пленки железа при $\varphi = 0^\circ$ (рис. 2), $\varphi = 90^\circ$ (рис. 3) и продольного (рис. 4), измеренные при разных температурах: (а) -300 К; (б) - 100 К; (в) -2 К
Fig. 2, 3, 4. Hysteresis loops of the transverse magnetoresistance of the iron film at $\varphi = 0^\circ$ (Fig. 2), $\varphi = 90^\circ$ (Fig. 3) and longitudinal (Fig. 4), measured at different temperatures: (a) -300K; (b) - 100K; (c) -2K

Заключение

В нанокристаллических пленках железа с перпендикулярной магнитной анизотропией, полученных методом ионно-стимулированного осаждения на кремниевых подложках, в температурном интервале доминирования перколяционного механизма проводимости до поля насыщения намагниченности наблюдается смена знака поперечного и продольного МС при $\varphi = 0^\circ$ с положительного на отрицательный при изменении направления магнитного поля от параллельного плоскости пленки до перпендикулярного, обусловленная ориентацией намагниченности перпендикулярно протекающему току. В слабом поле в поперечном и продольном эффектах при $\varphi = 0^\circ$ обнаружен инверсный гигантский магниторезистивный эффект, из-за магнитной неоднородности пленок.

Показано, что в режиме слабой локализации в области слабых магнитных полей гистерезисных явлений в МС не наблюда-

ется, а в сильном поле доминирует положительная компонента МС, из-за влияния поля на процессы перколяции электронов.

Благодарности

Синтез образцов и статические магнитные измерения проводилось в рамках Государственного задания КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН № АААА-А18-118041760011-2.

Библиографические ссылки

1. Zutic I. Spintronics: Fundamentals and application. *Rev. Mod. Phys.* 2004; 76(2): 323-386.
2. Campbel I.A., Fert A. Transport Properties of Ferromagnets in Ferromagnetic Materials. Amsterdam, New York, Oxford. 1982. p. 747-805.
3. Beer A.G. Galvanomagnetic effects in semiconductors. *Solid state physic* (Suppl. 4); ed. F. Zeitz, D. Turnbull. N.Y., London, 1963. 418 p.
4. Ruediger U., Yu J., Zhang S., Kent A.D., Parkin S.S.P. Negative domain wall contribution to the resistivity of microfabricated Fe wires. *Physical Review Letters* 1998; 80(25): 5639-5642.
5. Raquet B., et al. Electron-magnon scattering and magnetic resistivity in 3d ferromagnets. *Physical Review B* 2002; 66(2): 024433.

6. Battle X., Labarta A. Finite – size effects in fine particles: magnetic and transport properties. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002; 35: R15-R42.
7. Lyadov N.M., Bazarov V.V., Vagizov F.G., Vakhitov I.R., Dulov E.N., Kashapov R.N. et al. Structural and magnetic studies of thin Fe⁵⁷ films formed by ion beam assisted deposition. *Applied Surface Science* 2016; 378: 114-119.
8. Lyadov N.M. Deposition rate effect on microstructure and perpendicular magnetic anisotropy of iron films prepared by ion-beam-assisted deposition. *Vacuum* 2019; 168: 108860.
9. Bergman G. Weak localization in thin films. *Phys. Rev. B.* 1984; 107(1): 1-58.
10. Abeles B., Sheng P., Coutts M., Arie Y. Structural and electrical properties of granular metal films. *Adv. Phys.* 1975; 24: 407-461.
11. Sefrioui Z. Correlation between magnetic and transport properties in nanocrystalline Fe thin films: A grain-boundary magnetic disorder effect. *Physical Review* 2001; 64: 224431-224431-4.
12. Шик А.Я., Дахно А.Н., Емельяненко О.В., Лагунова Т.С. Магнитосопротивление в неоднородных кристаллах n-InP. *ФТП* 1980; 14(6): 1110-1114.
13. Шик А.Я. Магнитосопротивление неоднородных полупроводников. *ФТП* 1975; 9(5): 872-875.
14. Birss R. The saturation magnetostriction of polycrystals. *Pros. Roy. Sos.* 1960; 75: 8-16.
15. Baibich M.N. et. al. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 1988; 61(21): 2472-2475.
16. Berkowitz A.E. et. al. Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu – Co alloys. *Phys. Rev. Lett.* 1992; 68(25): 3745-3748.
3. Beer A. G. Galvanomagnetic effects in semiconductors. *Solid state physic* (Suppl. 4); ed. F. Zeitz, D. Turnbull. N.Y., London, 1963. 418 p.
4. Ruediger U., Yu J., Zhang S., Kent A.D., Parkin S.S.P. Negative domain wall contribution to the resistivity of microfabricated Fe wires. *Physical Review Letters* 1998; 80(25): 5639-5642.
5. Raquet B., et al. Electron-magnon scattering and magnetic resistivity in 3d ferromagnets. *Physical Review B* 2002; 66(2): 024433.
6. Battle X., Labarta A. Finite – size effects in fine particles: magnetic and transport properties. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2002; 35: R15-R42.
7. Lyadov N.M., Bazarov V.V., Vagizov F.G., Vakhitov I.R., Dulov E.N., Kashapov R.N. et al. Structural and magnetic studies of thin Fe⁵⁷ films formed by ion beam assisted deposition. *Applied Surface Science* 2016; 378: 114-119.
8. Lyadov N.M. Deposition rate effect on microstructure and perpendicular magnetic anisotropy of iron films prepared by ion-beam-assisted deposition. *Vacuum* 2019; 168: 108860.
9. Bergman G. Weak localization in thin films. *Phys. Rev. B.* 1984; 107(1): 1-58.
10. Abeles B., Sheng P., Coutts M., Arie Y. Structural and electrical properties of granular metal films. *Adv. Phys.* 1975; 24: 407-461.
11. Sefrioui Z. Correlation between magnetic and transport properties in nanocrystalline Fe thin films: A grain-boundary magnetic disorder effect. *Physical Review* 2001; 64: 224431-224431-4.
12. Shik A.Ya., Dakhno A.N., Emelianenko O.V., Lagunova T.S., Shik A. Ya. Magnetoresistance in inhomogeneous n-InP crystals. *FTP* 1980; 14(6): 1110-1114.
13. Shik A. Ya. Magnetoresistance of inhomogeneous semiconductors. *FTP* 1975; 9(5): 872-875.
14. Birss R. The saturation magnetostriction of polycrystals. *Pros. Roy. Sos.* 1960; 75: 8-16.
15. Baibich M.N. et. al. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 1988; 61(21): 2472-2475.
16. Berkowitz A.E. et. al. Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu – Co alloys. *Phys. Rev. Lett.* 1992; 68(25): 3745-3748.

References

1. Zutic I. Spintronics: Fundamentals and application. *Rev. Mod. Phys.* 2004; 76(2): 323-386.
2. Campbel I.A., Fert A. Transport Properties of Ferromagnets in Ferromagnetic Materials. Amsterdam, New York, Oxford. 1982. p. 747-805.