ОСОБЕННОСТИ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗА, ПОЛУЧЕННЫХ НА КВАРЦЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ МЕТОДОМ ИОННО-АССИСТИРОВАННОГО ОСАЖДЕНИЯ

М.Г. Лукашевич[1)], Ю.А. Бумай[2)], Лю Динчен[1)], А.В. Ющик[1)], Н.М. Лядов[3)], И.А. Файзрахманов[3)], Р.И. Хайбуллин[3)]
[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, Lukashevich@bsu.by*
[2)]*Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости 65, Минск 220013, Беларусь, yuabumai@bntu.by*
[3)]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Сибирский тракт 10/7, Казань 420029, Россия, rik@kfti.knc.ru*

Представлены результаты измерения и интерполяции температурных зависимостей сопротивления в интервале 300 – 77 К, магнитополевых зависимостей магнитосопротивления (МС) и эффекта Холла при разных углах (φ = 0º - 90º) между направлением магнитного поля и плоскостью пленки в нанокристаллических пленках железа, полученных на кварцевых подложках методом ионно-ассистированного осаждения. Увеличение сопротивления при понижении температуры описывается экспоненциальной зависимостью с показателем p = ½, характерным для межкластерного туннелирования электронов в гранулированных металлах. МС пленок отрицательно и имеет близкие величины продольного и поперечного эффектов. В исходных пленках МС при φ = 90º больше чем при φ = 0º, в то время как в отожженных пленках наоборот. Это свидетельствует о перпендикулярной магнитной анизотропии в исходных пленках и ее отсутствии в отожженных. При T = 300 К МС имеет близкую к линейной зависимость, характерную для магнонного МС. Доминирование туннелирования при T = 77 К приводит к уменьшению величины МС и появлению пиков МС в области магнитных полей B ≈ 0,5 Тл. Холловское сопротивление имеет два наклона, обусловленные экстраординарным (B < 1 Тл) и классическим (B > 1 Тл) эффектом Холла, в то время как планарный эффект Холла в этих полях резко уменьшается, отражая доминирование магниторезистивного эффекта.

Ключевые слова: пленка; подложка; железо; электронный транспорт; туннелирование; магнитосопротивление; эффект Холла.

PECULIARITIES OF GALVANOMAGNETIC EFFECTS IN THIN IRON FILMS FORMED ON QUARTZ SUBSTRATES BY THE ION-ASSISTED DEPOSITION

M.G. Lukashevich[1)], Yu. A. Bumai[2)], L. Dingcheng[1)], A.V. Yuschik[1)], N.M. Lyadov[3)], I.A. Fayzrakhmanov[3)], R.I. Khaibullin[3)]
[1)]*Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, Lukashevich@bsu.by*
[2)]*Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, Belarus, yuabumai@bntu.by*
[3)]*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of RAS, 10/7 Sibirsky Tract, 420029 Kazan, Russia, rik@kfti.knc.ru*

The results of measurement and interpolation of temperature dependences of resistance in the range of 300 - 77 K, magnetic field dependences of magnetoresistance (MR) and the Hall effect at different angles (φ = 0º - 90º) between the direction of the magnetic field and the film plane in nanocrystalline iron films obtained on quartz substrates by ion-assisted deposition. The increase in resistance with decreasing temperature is described by an exponential dependence with the exponent p = ½, which is characteristic of intercluster tunneling of electrons in granular metals. The MS of the films is negative and has similar values of the longitudinal and transverse effects. In the original films, the MR at φ = 90º is greater than at φ = 0º, while in the annealed films it is vice versa. This indicates a perpendicular magnetic anisotropy in the original films and its absence in the annealed ones. At T = 300 K, MR has a dependence close to

linear, which is characteristic of magnon MR. The dominance of tunneling at T = 77 K leads to a decrease in the MR value and the appearance of MR peaks in the region of magnetic fields B ≈ 0.5 T. The Hall resistance has two slopes due to the extraordinary (B < 1 T) and classical (B > 1 T) Hall effect, while the planar Hall effect sharply decreases in these fields, reflecting the dominance of the magnetoresistive effect.

Keywords: film; substrate; iron; electronic transport; tunneling; magnetoresistance; Hall effect.

Введение

Тонкие пленки и многослойные структуры с магнитным упорядочением, в которых можно реализовать процессы спин-зависимые процессы рассеяния, сильной или слабой локализации носителей заряда, являются базовыми элементами спинтроники. Для их получения наиболее широко используются такие материалы как железо, кобальт и никель. Ранее в температурном диапазоне 300 - 2 К изучены механизмы проводимости и МС в пленках железа, синтезированных ионно-ассистированным осаждением на кремниевых подложках [1]. В данной работе представлены результаты измерения температурной зависимости сопротивления, МС и эффекта Холла в пленках на кварцевых подложках.

Материалы и методы исследования

Тонкие (80 нм) нанокристаллические пленки железа были получены методом ионно-ассистированного осаждения на кварцевых подложках. Технология получения, структурные и магнитные характеристики пленок представлены в [2]. Омические контакты к пленкам изготавливались путем ультразвуковой пайки медных проволочек индиевым припоем. Температурная зависимость сопротивления измерялась в температурном интервале T = 300 - 77 К. Гальваномагнитные явления при разных углах между плоскостью пленки и направлением магнитного поля измерялись в режиме стабилизации тока.

Результаты и их обсуждение

Синтезированные пленки представляют собой наноструктурированный материал, в котором нанокристаллиты α-железа с диаметром порядка ~10 нм, разделены неупорядоченными прослойками аморфной и оксидной фаз железа. В таких средах можно ожидать туннельного или прыжкового переноса электронов, для которых характерно экспоненциальное увеличение сопротивления при понижении температуры [3-5]. Температурная зависимость сопротивления исходной и отожженной пленок показана на рис. 1. В отличие от пленок, синтезированных на кремниевых подложках [2], в исследуемых при T < 200 К наблюдается экспоненциальное увеличение сопротивления $R \sim \exp((T_0/T)^p)$ с коэффициентом p = 1/2. Такая зависимость характерна для гранулированных металлов и обусловлена межгранульным [3, 4] туннелированием электронов.

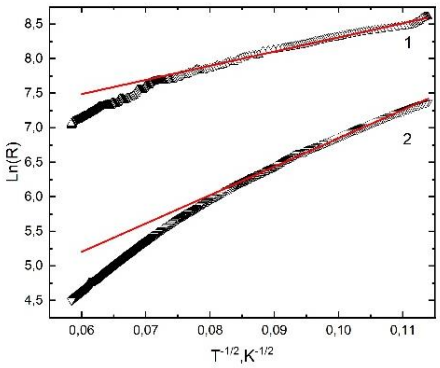

Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления исходной (1) и отожженной (2) пленки железа (точки) и их интерполяция экспоненциальной зависимостью с p = 1/2 (линия)

Несмотря на разупорядоченность пленок в них наблюдается характерный для магнонного МС отрицательный эффект с близкой к линейной зависимости от поля. При этом величины поперечного и продольного эффектов близки, что характерно для туннельного транспорта. Петли гистерезиса поперечного при φ = 0º и φ = 90º, а также продольного (φ = 0º) МС для исходной и отожженной пленок при T = 77 К показаны на рис. 2 и 3 соответственно. Отжиг пленок, приводящий к улучшению струк-

турного совершенства, приводит к увеличению МС, а также изменению вида зависимости. В исходных пленках (рис. 2) поперечное МС при φ = 90º больше чем при φ = 0º.

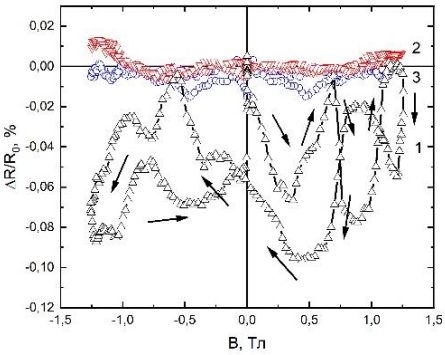

Рис. 2. Поперечное (1 и 2) при разных углах между плоскостью пленки и направлением магнитного поля и продольное (3) МС исходной пленки при T = 77 K. φº: 1 - 90; 2 - 0; 3 - 0

В то же время в отожженных пленках (рис. 3) МС больше при φ = 0º. Такое изменение величины поперечного МС при отжиге свидетельствует о наличии перпендикулярной магнитной анизотропии в исходных пленках и анизотропию в плоскости при отжиге.

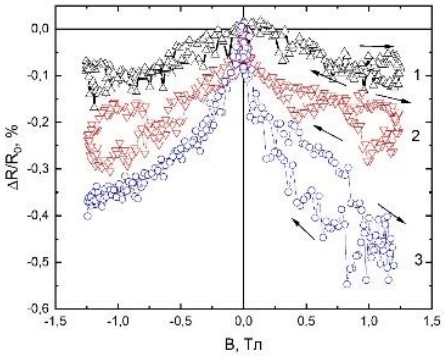

Рис. 3. Поперечное (1 и 2) при разных углах между плоскостью пленки и направлением магнитного поля и продольное (3) МС отожженной пленок при T = 77 K. φº: 1 - 90; 2 - 0; 3 – 0

Действительно, МС в отрицательно в случае взаимно перпендикулярной ориентации намагниченности пленки и протекающего тока. Переход при отжиге к анизотропии в плоскости приводит к доминированию взаимно перпендикулярной ориентации направлений намагниченности и тока образца при φ = 0º.

На магнитополевых зависимостях холловского сопротивления наблюдается два наклона, характерные для доминирования экстраординарного при B < 1 Тл и обычного эффектов Холла в более сильных полях, свидетельствующих о насыщении намагниченности. При измерении планарного холловского сопротивления наблюдается его резкое уменьшение, обусловленное измерением магниторезистивного эффекта.

Заключение

Пленки железа, синтезированные на кварцевых подложках методом ионно-стимулированного осаждения, находятся на диэлектрической стороне перехода диэлектрик-метал. В исходных пленках МС отрицательно и больше при взаимно перпендикулярной ориентации магнитное поле-плоскость пленки, в то время как в отожженных наоборот. Это свидетельствует о перпендикулярной магнитной анизотропии в исходных пленках и анизотропии в плоскости в отожженных. В магнитном поле B ≈ 0.5 Тл при T = 77 K обнаружены резкие пики МС, которые обусловлены перестройкой доменной структуры. МС и эффект Холла подтверждают магнитное упорядочение в пленках.

Библиографические ссылки

1.Головчук В.И., Бумай Ю.А., Лукашевич М.Г., Лядов Н.М., Файзрахманов И.А., Хайбуллин Р.И. Корреляция электрических, гальваномагнитных и магнитных характеристик нанокристаллических пленок железа, полученных методом ионно-ассистированного осаждения. *Физика твердого тела* 2021; 63(12): 2096-2105.
2. Lyadov N.M., Vagizov F.G., Vakhitov I.R., Gumarov A.I., Ibragimov Sh.Z., Kuzina D.M. et al. *Vacuum 2019;* 168: 108860.
3. Abeles B., Sheng P., Coutts M., Arie Y. Structural and electrical properties of granular metal films. *Adv. Phys.* 1975; 24: 407-461.
4. Sheng P., Abeles B, Arie Y. Hopping conduction in granular metals. *Phys. Rev. Lett.* 1973; 33(21): 44-47.