

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ И РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТЫ В МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИИ И ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА ТОНКИХ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЕНОК ПЕРМАЛЛОЯ

А. В. Ющик, Лю Динчэн, М. Г. Лукашевич

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь
e-mail: yuschick111alex@gmail.com*

В тонких магнитоупорядоченных пленках пермаллоя в виде диска Корбино, а также диска и прямоугольного параллелепипеда с токовыми и холловскими контактами изучены магниторезистивный эффект и эффект Холла при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью образца. Величина отрицательного магниторезистивного эффекта не зависит от геометрических размеров образца и величины холловской разности потенциалов, определяемой как наличием магнитного упорядочения, так и внешним магнитным полем. Показано, что в геометрии эффекта Холла петли гистерезиса магнитосопротивления закрыты, а уменьшение угла плоскость образца-магнитное поле приводит к открытию с большей величиной остаточного сопротивления, в то время как петли холловского сопротивления остаются закрытыми.

Ключевые слова: пермаллой; магнитосопротивление; эффект Холла; пленка; диск Корбино; прямоугольный параллелепипед; магнитное упорядочение.

GEOMETRICAL AND DIMENSIONAL EFFECTS IN THE MAGNETORESISTANCE AND HALL EFFECT OF THIN MAGNETICALLY ORDERED PERMALLOY FILMS

A. V. Yushchik, Liu Dingcheng, M. G. Lukashevich

*Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. V. Yushchik (yuschick111alex@gmail.com)*

In thin magnetically ordered permalloy films in the form of a Corbino disc, as well as a disc and a rectangular parallelepiped with current and Hall contacts, the magnetoresistive effect and the Hall effect have been studied at different angles between the direction of the magnetic field and the sample plane. The magnitude of the negative magnetoresistive effect does not depend on the geometrical dimensions of the sample and the magnitude of the Hall potential difference, which is determined both by the presence of magnetic ordering and the external magnetic field. It is shown that in the geometry of the Hall effect the magnetoresistance hysteresis loops are closed, and the decrease of the sample-magnetic field direction angle leads to an opening with a larger magnitude of the residual resistance, while the Hall resistance loops remain closed.

Key words: permalloy; magnetoresistance; Hall effect; film; Corbino disc; rectangular parallelepiped; magnetic ordering.

ВВЕДЕНИЕ

Проявление геометрических и размерных эффектов в гальваномагнитных явлениях твердых тел достаточно полно и всестороннее исследовано в диамагнетиках с положительным знаком и лоренцевским магниторезистивным эффектом, обусловленным действием силы Лоренца на движущиеся носители заряда [1, 2]. В этом случае изменение отношения длины образца к ширине приводит к изменению компенсирующего действия поля Холла, которое линейно зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Значительно меньше исследований этих эффектов для отрицательного [3,4] и положительного при прыжковом механизме переноса магнитосопротивления (МС) [5]. Если в случае лоренцевского МС продольный эффект равен нулю, то в данных случаях он лишь незначительно отличается от поперечного. Решение этой задачи значительно усложняется анизотропией сопротивления магнитоупорядоченной среды, зависимостью знака МС от ориентации протекающего тока и направления намагниченности, нелинейной зависимостью холловского напряжения от магнитного поля, зависимостью размагничивающего фактора образца от его формы и размеров, а также перестройкой доменной структуры при увеличении магнитного поля. Кроме того, если в диамагнитных токопленочных структурах вращение образца в магнитном поле вокруг линий тока приводит лишь к изменению отношения длины образца к его эффективной ширине, то в магнитоупорядоченной пленке в зависимости от типа магнитной анизотропии изменяется величина размагничивающего фактора, угол между протекающим током и направлением намагниченности, а также величина поля насыщения намагниченности. Ранее в [6] изучены магнитная микроструктура и особенности МС пермаллового диска Корбино, обусловленные перестройкой доменной структуры при его перемагничивании. Целью данной работы явилось изучение МС и эффекта Холла в пленках пермаллоя при изменении геометрических размеров образца от диска Корбино до обычного диска с токовыми и холловскими контактами и прямоугольного параллелепипеда и разных углах между плоскостью образца и направлением магнитного поля.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

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 и прямоугольного параллелепипеда с отношением длины к ширине 10:1 изготавливались методом фотолитографии и травления. Диск Корбино изготавливался нанесением точечного омического контакта в центре диска и протяженного по его периферической окружности легкоплавким припоем. На такой же диск и прямоугольный образец наносились по два точечных токовых и холловских контакта к которым припаивались медные проволочки. Для исследуемых пленок характерен металлический механизм переноса электронов и перпендикулярная магнитная анизотропия [6].

Магниторезистивный эффект и эффект Холла измерялись в режиме генератора тока при комнатной температуре и сканировании магнитного поля в двух направлениях до $B = 1,5$ Тл. Измерения проводились при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью образца. Погрешность измерения индукции магнитного поля и установки угла магнитное поле–плоскость образца не превышала 1,5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, *а*, *б* и *в* показаны петли гистерезиса МС пермаллоевой пленки с толщиной $d = 140$ нм в виде диска Корбино (*а*), диска такого же диаметра с точечными токовыми и холловскими контактами (*б*), а также в виде прямоугольного параллелепипеда (*в*) с токовыми и холловскими контактами при комнатной температуре и разных углах φ между направлением магнитного поля и плоскостью образца.

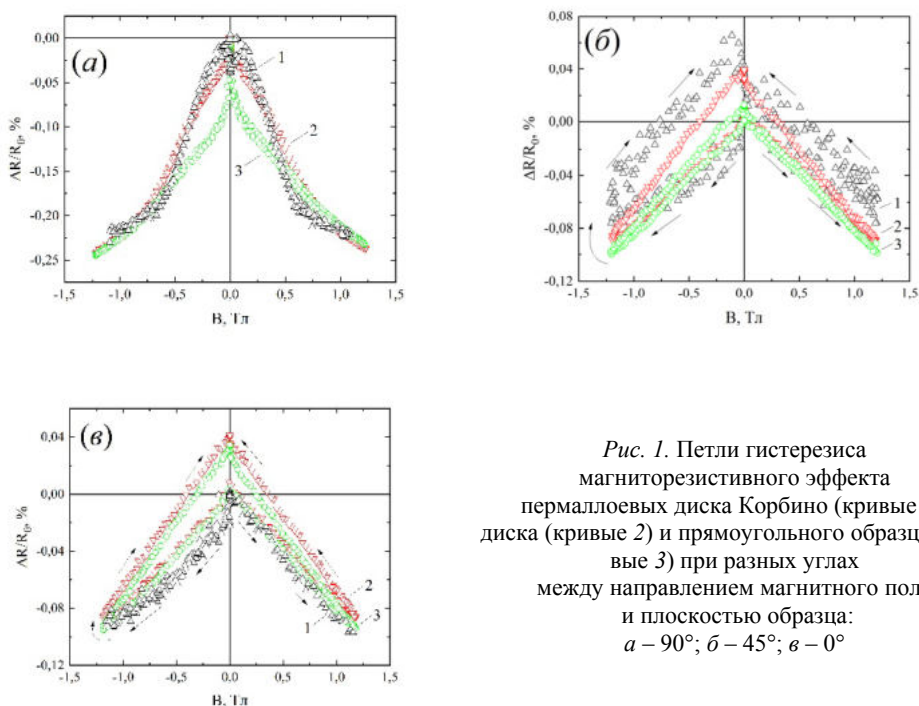


Рис. 1. Петли гистерезиса магниторезистивного эффекта пермалловых диска Корбино (кривые 1), диска (кривые 2) и прямоугольного образца (кривые 3) при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью образца: $a - 90^\circ$; $b - 45^\circ$; $c - 0^\circ$

Можно видеть, что независимо от геометрии образца магниторезистивный эффект отрицателен и наибольшая величина отрицательного МС (ОМС) наблюдается при взаимно перпендикулярной ориентации магнитное поле-плоскость образца. Так как для пленок характерна перпендикулярная магнитная анизотропия, то во всех образцах при $\varphi = 90^\circ$ линии тока перпендикулярны направлению намагниченности и в них до магнитного поля технического насыщения намагниченности доминирует анизотропное ОМС.

При $\varphi = 90^\circ$ в поле $B > 0,75$ Тл наблюдается отклонение магнитолевой зависимости от линейной и уменьшение величины ОМС, в то время как при $\varphi > 45^\circ$ она практически линейна. Уменьшение величины ОМС в поле $B > 0,75$ Тл вызывается достижением насыщения намагниченности и дополнительным вкладом положительной компоненты лоренцевского МС, величина которого в данной геометрии измерений максимальна [1].

Видно также, что в диске Корбино и диске с точечными контактами магнитолевые зависимости практически совпадают. В тоже время в прямоугольном параллеле-

пипеде до поля насыщения намагниченности величина ОМС несколько больше, а в большем поле они также совпадают, что может быть связано с разным размагничивающим фактором диска и прямоугольного пераллепипеда. Уменьшение величины ОМС при уменьшении φ обусловлено переориентацией направлений линий тока в обоих дисках и направления их намагниченности. При измерении МС в геометрии Холла все линии тока в дисках перпендикулярны намагниченности, в то время как при $\varphi = 0^\circ$ перпендикулярной остается значительно меньше, что и приводит к уменьшению отрицательной компоненты анизотропного ОМС. Кроме того, уменьшение магнитного поля насыщения намагниченности приводит к доминированию в области сильных полей линейной по полю маггонной компоненты ОМС [7].

Отметим также, что уменьшение φ приводит к трансформации практически закрытой (рис. 1, *a*) петли гистерезиса МС к открытой (рис. 1, *б, в*). При этом величина сопротивления образца при уменьшении поля от максимальной величины до нуля становится большей, что свидетельствует о существенно большей перестройке доменной структуры при пермагничивании пленки под углом к плоскости, что согласуется с наличием перпендикулярной магнитной анизотропией исследуемых пленок.

На рис. 2, *a – в*) показаны петли гистерезиса холловского сопротивления круглого (кривые 1) и прямоугольного (кривые 2) образцов при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью образца.

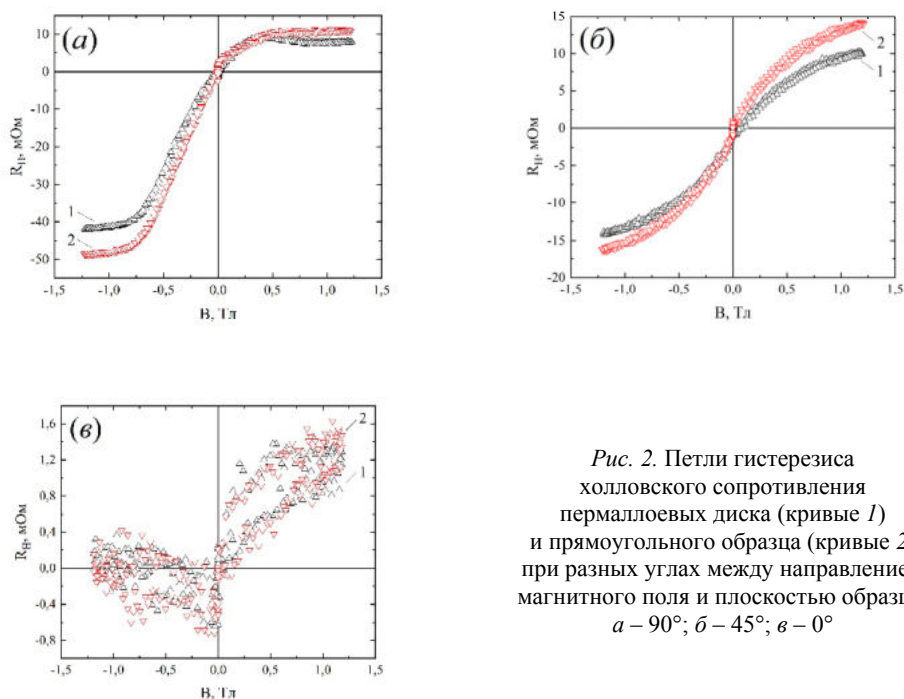


Рис. 2. Петли гистерезиса холловского сопротивления пермалловых диска (кривые 1) и прямоугольного образца (кривые 2) при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью образца: *a* – 90° ; *б* – 45° ; *в* – 0°

Независимо от φ они закрыты, а при $\varphi = 90^\circ$ холловское сопротивление показывает как минимум пятикратную асимметрию из-за анизотропии сопротивления магнитоупорядоченной среды при измерении в направлениях B^+ и B^- , а также доминирование экстраординарного и обычного эффекта Холла в поле до и после насыщения намагнитченности, величина которой при $\varphi = 90^\circ$ около 0,75 Тл и уменьшается до 10 мТл при $\varphi = 0^\circ$. Как и следовало ожидать, уменьшение нормальной составляющей магнитного поля к плоскости холловского образца приводит к уменьшению холловского сопротивления и при $\varphi = 45^\circ$ практически симметричной петле гистерезиса, а также сдвигу изменения наклона магнитополовой зависимости в область слабых полей из-за изменения размагничивающего фактора образца. Отметим, что при измерении холловского сопротивления в геометрии планарного эффекта ($\varphi = 0^\circ$) измеряется не холловская разность потенциалов, а продольный магниторезистивный эффект между холловскими контактами, что вследствие анизотропии сопротивления магнитоупорядоченной среды, приводит к его разной величине при измерении в направлении B^+ и B^- (рис. 2, в) и практически линейной зависимости в направлении B^+ . Асимметрия холловской разности потенциалов при измерении в направлении B^+ и B^- не коррелирует с равной величиной магниторезистивного эффекта в этих направлениях, что может служить дополнительным подтверждением отсутствием влияния эффекта Холла на величину отрицательного магниторезистивного эффекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изменение геометрических размеров тонкопленочного магнитоупорядоченного образца пермаллоя от диска Корбино до диска и прямоугольного параллелепипеда и измерение магнитополовых зависимостей магнитосопротивления и эффекта Холла при разных углах между направлением магнитного поля и плоскостью образца показывают, что как экстраординарный, так и обычный эффект Холла не влияют на величину отрицательного магниторезистивного эффекта. Показано, что в пленках с перпендикулярной магнитной анизотропией петли гистерезиса магниторезистивного эффекта во всех образцах при измерении в геометрии Холла являются закрытыми, а уменьшение угла поле–плоскость образца приводит к открытию петли с большим остаточным сопротивлением, в то время как петли гистерезиса холловского сопротивления остаются закрытыми.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Lippman, H. J. Der geometrieeinflus auf den transversalen magnetischen widerstandseffekt bei rechteckförmigen halbleiterplatten / H. J. Lippman, F. Kurt // *Zs. Naturforsch.* – 1958. – Vol. 13 a, № 6. – P. 462–474.
2. Киреев, П. С. Физика полупроводников / П. С. Киреев. – М.: Высшая школа, 1975. – 583 с.
3. Полянская, Т. А. О влиянии формы образца и контактов на характер поведения отрицательного магнитосопротивления в области слабых магнитных полей / Т. А. Полянская, И. И. Сайдышев // *ФТП.* – 1975. – Т. 3, № 1. – С. 153–158.
4. 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.
5. Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников / Б. И. Шкловский, Ф. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
6. Головчук, В.И. Магнитная микроструктура и магниторезистивный эффект в диске корбино с магнитным упорядочением / В.И. Головчук, М.Г. Лукашевич // *Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика.* – 2018. – № 3. – С. 46–53.
7. Electron-magnon scattering and magnetic resistivity in 3d ferromagnets / B.Raquet [et al.] // *Physical Review B.* – 2002. – Vol.66, №2. – P. 024433.