

**МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТРУКТУР  
NiFe/Cu(Ag)/Co**

**В.Б. Лобода, Ю.А. Шкурдода, В.А. Кравченко**  
Сумский государственный педагогический университет  
им. А.С.Макаренко  
ул. Роменская, 87, г. Сумы, 40002  
E-mail: [loboda@sspu.sumy.ua](mailto:loboda@sspu.sumy.ua)

*В работе представлены результаты исследования магниторезистивного эффекта, зависимости магнитосопротивления от температуры и толщины немагнитной прослойки для неотожженных и отожженных при разных температурах трехслойных несимметрических систем NiFe/Cu(Ag)/Co.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Изменение взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев, разделенных проводящей немагнитной прослойкой, под воздействием внешнего магнитного поля может приводить к значительному изменению электросопротивления слоистой структуры. Данный эффект получил название гигантского магнитосопротивления (ГМС) [1]. В настоящее время разработаны и внедрены в практику устройства, работающие на его основе, например, считывающие головки в магнитных записывающих системах или датчики положения и/или скорости [2]. Многослойные структуры, в которых наблюдается ГМС, условно могут быть разделены на две группы: сверхрешетки типа Fe/Cr, где магнитные слои антиферромагнитно упорядочены через немагнитную прослойку, и так называемые спин-вентильные структуры, в которых послойное перемагничивание обусловлено разной коэрцитивной силой слоев или наличием в одном из слоев однонаправленной анизотропии (магнитного смещения). Для формирования однонаправленной анизотропии применяются дополнительные («закрепляющие») слои из антиферромагнитных или магнитотвердых материалов.

Исследования структуры, магниторезистивного эффекта, процессов перемагничивания и доменной структуры таких систем представляется важной задачей. Исходя из этого, большое число теоретических и экспериментальных работ посвящено исследованию спин-вентильных структур на основе многослойных пленок [3]. Несмотря на это, ряд фундаментальных вопросов до сих пор остаются до конца не выясненными. Так, существует необходимость в проведении экспериментальных исследований влияния отжига на магниторезистивные свойства и процессы перемагничивания трехслойных структур с разным сочетанием параметров верхнего и нижнего магнитных слоев.

Учитывая вышеизложенное, целью настоящей работы является исследование магниторезистивного эффекта, зависимости магнитосопротивления (МС) от температуры и толщины немагнитной прослойки, неотожженных и отожженных при разных температурах трехслойных пленок NiFe/Cu(Ag)/Co.

**1 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ**

Трехслойные пленки NiFe/Cu(Ag)/Co с толщинами слоев  $d_{\text{NiFe,Co}} = 10\text{-}50$  нм и  $d_{\text{Cu(Ag)}} = 1\text{-}20$  нм были получены в вакуумной установке ВУП-5М (давление остаточной атмосферы  $10^{-4}$  Па) методом электронно-лучевого (NiFe, Co) и резистивного (Cu, Ag) испарения. В качестве магнито жесткого и магнитомягкого слоев использовались

соответственно слои Co и NiFe. Исходным материалом для напыления слоев NiFe был массивный сплав пермаллой 50Н. Пленки осаждались на стеклянные подложки (измерение электросопротивления и МС). Толщина слоев контролировалась по времени напыления при известной скорости конденсации. Для определения скорости конденсации была получена серия однослойных пленок NiFe, Co, Cu и Ag, толщина которых измерялась при помощи микроинтерферрометра МИИ-4 с компьютерной системой регистрации интерференционной картины [4]. Для параллельной ориентации осей легкого намагничивания в ферромагнитных слоях пленки осаждались во внешнем магнитном поле с напряженностью  $H = 8$  кА/м (100 Ое).

Исследования магниторезистивного эффекта и получение зависимости МС от температуры производились в специально изготовленной установке в условиях сверхвысокого безмасляного вакуума ( $10^{-7}$  Па) [4]. В этой установке проводился и отжиг образцов при температурах 400, 550 и 700 К. Время отжига составляло 30 мин.

## 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех исследуемых неотожженных пленок NiFe/Cu/Co с  $d_{Cu} < 2$  нм и NiFe/Ag/Co с  $d_{Ag} < 3$  нм наблюдается анизотропное магнитосопротивление (АМС), а магниторезистивные петли гистерезиса для данных систем подобны соответствующим петлям для однослойных пленок ферромагнитных металлов и сплавов. АМС при малых толщинах прослоек можно объяснить наличием в них разрывов, так как при таких толщинах пленки Cu и Ag являются островковыми. Вследствие этого прямая связь магнитных слоев будет достаточно сильной. Такое взаимодействие препятствует разделению перемангничиванию слоев, а следовательно не приводит к возникновению ГМС. Величина продольного и поперечного МС при этом не превышает 0,1%. При отжиге данных образцов величина МС возрастает и для пленок, отожженных при температуре 700 К, составляет 0,2-0,3% для продольного и 0,3-0,5% для поперечного МС.

Для неотожженных образцов с  $d_{Cu} = 2-10$  нм и  $d_{Ag} = 3-10$  нм наблюдается только уменьшение электросопротивления (рис. 1а) при внесении образцов в магнитное поле независимо от его направления (изотропность МС). Этот факт является характерным признаком ГМС [5].

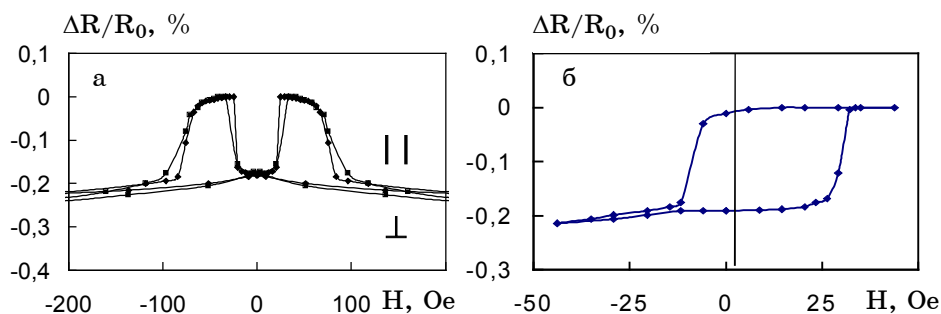


Рисунок 1 – Полная (а) и частная (б) магниторезистивные петли гистерезиса для трехслойных пленочных структур NiFe(30 нм)/Cu(5 нм)/Co(30 нм). (Температура измерения  $T = 290$  К)

В большинстве работ ГМС многослойных пленок связывают с образованием антиферромагнитно упорядоченных областей в ферромагнитных слоях [6]. Величина МС для этих пленок составляет

0,2-0,4%. Но для пленок с  $d_{Ag} = 3-5$  нм величина МС остается меньше 0,1%.

Следует отметить, что для неотожженных систем NiFe/Cu(Ag)/Co с  $d_{Cu(Ag)} = 4-6$  нм наблюдается горизонтальный участок на магниторезистивной петле (рис. 1а). Этот факт свидетельствует о раздельном перемагничивании слоев. Изменение сопротивления структуры происходит при изменении взаимной ориентации намагниченности магнитомягкого и магнито жесткого слоев, т.е. реализуется ГМС [7]. Резкие изменения МС, наблюдающиеся на магниторезистивной петле, соответствуют перемагничиванию магнитомягкого и магнито жесткого слоев, которые происходят в полях 20 и 80 Ое соответственно. На рис. 1б представлена частная магниторезистивная петля, измеренная в полях, меньших поля перемагничивания магнито жесткого слоя (измеренная в диапазоне полей -50 до +50 Ое). Она несколько смещена по оси относительно значения  $H=0$ , что является следствием взаимодействия магнито жесткого и магнитомягкого слоев через немагнитную прослойку. Аналогичные смещения наблюдали авторы [8] для спин-вентельных магниторезистивных структур на основе многослойных пленок Co/Tb.

Отжиг этих образцов при  $T = 400$  К приводит к изменению формы магниторезистивной петли и незначительному уменьшению  $\Delta R/R_0$ . Как видно из рис. 2, для пленок, отожженных при  $T = 400$  К, на магниторезистивной петле горизонтальный участок не наблюдается. По видимому такой отжиг приводит к увеличению связи магнитных слоев через немагнитную прослойку (увеличение микроотверстий в прослойке меди). Отжиг при  $T = 550$  К приводит к появлению АМС в этих образцах. По нашему мнению, вследствие рекристаллизационных процессов (роста кристаллитов [9]), диффузии атомов при относительной малости толщины прослоек происходит нарушение их непрерывности.

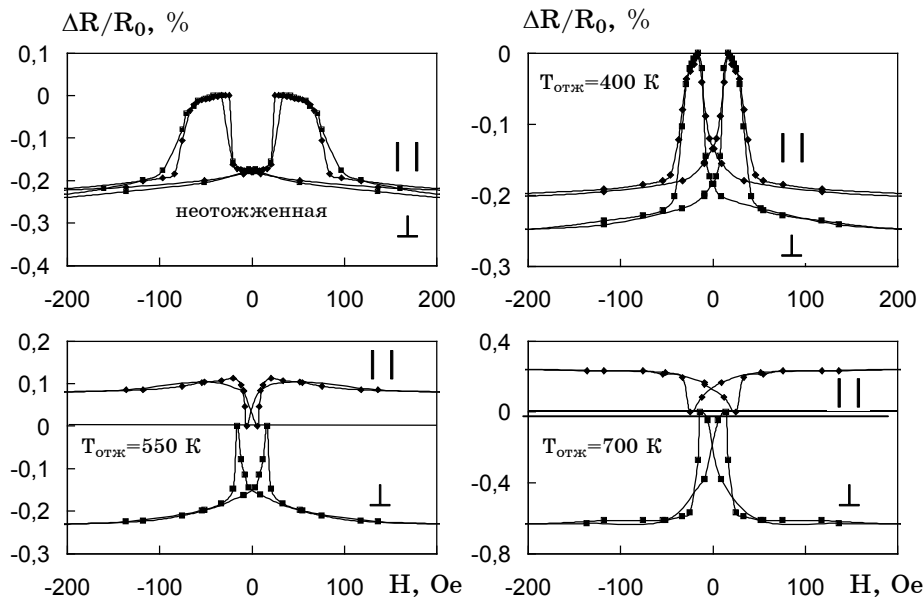


Рисунок 2 – Зависимость продольного (//) и поперечного (⊥) МС от напряженности магнитного поля для неотожженных и отожженных при разных температурах трехслойных пленок NiFe(30 нм)/Cu(5 нм)/Co(30 нм). (Температура измерения  $T = 290$  К)

Для неотожженных NiFe/Cu(Ag)/Co образцов с  $d_{Cu(Ag)} = 6-10$  нм наблюдаются типичные магниторезистивные петли, характерные для

симметрических трехслойных систем (отсутствует горизонтальный участок на петле).

Таким образом, увеличение толщины немагнитной прослойки приводит к снижению разницы в полях перемагничивания магнитомягкого и магнито жесткого слоев вследствие изменения эффективности взаимодействия магнитных слоев. В результате не обеспечивается строгое антипараллельное расположение намагниченностей в этих слоях при перемагничивании магнитомягкого слоя и, как следствие, изменяется форма магниторезистивной петли. Острый пик указывает на отсутствие четко выраженного антипараллельного расположения намагниченностей соседних слоев.

Отжиг пленок с относительно толстыми немагнитными прослойками ( $d_{Cu(Ag)} = 6-10$  нм) при 400 К не приводит к существенным изменениям вида петель магниторезистивного эффекта как для пленок с медной прослойкой, так и с серебряной. Но после отжига при 550 К для пленок NiFe/Cu/Co наблюдается существенный рост продольного МС (до 1% при комнатной температуре (рис.3)). Для пленок NiFe/Ag/Co, отожженных при 550 К, наблюдается переход к АМС. Можно предположить, что взаимная диффузия атомов кобальта и меди протекает слабее, чем атомов кобальта и серебра. Это и приводит к тому, что переход к АМС для пленок с серебряной прослойкой происходит при более низкой температуре отжига.

На рис.3 приведены зависимости  $(\Delta R/R_0)_{max} = f(T_{отж})$  для продольного и поперечного МС трехслойных пленок NiFe/Cu/Co с разными толщинами немагнитных слоев.

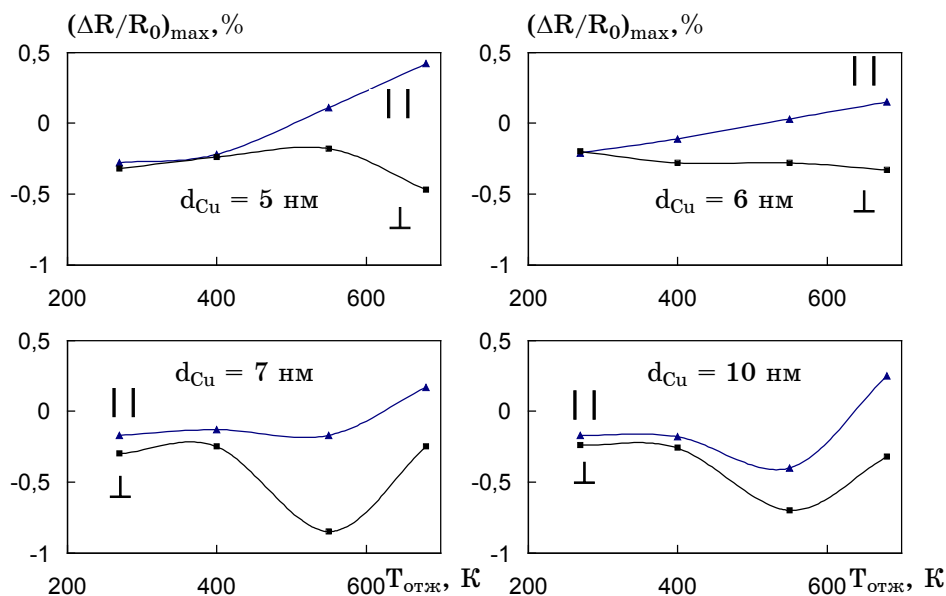


Рисунок 3 – Зависимость  $(\Delta R/R_0)_{max}$  от температуры отжига  $T_{отж}$  для трехслойных структур NiFe/Cu/Co/Π с разными толщинами немагнитной прослойки

Для образцов с  $d_{Cu}=2-5$  нм наблюдается только уменьшение МС после отжига при температурах 400 и 550 К. По-видимому, в этих неотожженных пленках ферромагнитные слои связаны как магнитостатическим взаимодействием, возникающим из-за шероховатостей на границе раздела, так и относительно сильным

антиферромагнитным взаимодействием. По нашему мнению, даже низкотемпературный отжиг ( $T_{отж} = 400 \text{ К}$ ) приводит к ослаблению антиферромагнитного взаимодействия между магнитными слоями. Отжиг при температуре  $550 \text{ К}$  приводит к появлению АМС. Появление АМС обусловлено увеличением размеров зерна, что приводит к образованию структурно-несплошной прослойки и возникновению прямой обменной связи между магнитными слоями.

Для пленок с  $d_{Cu}=7-10 \text{ нм}$  отжиг при  $400 \text{ К}$  не приводит к существенному изменению величины МС. Увеличение ГМС после отжига при  $550 \text{ К}$ , возможно, связано с образованием более гладкой границы раздела (уменьшение амплитуды шероховатостей) и уменьшением величины флуктуаций толщины медной прослойки. Это приводит к изменению параметров обменного взаимодействия между слоями и, как следствие, увеличению ГМС. Как отмечают авторы [10], в данной ситуации не исключено, что, помимо указанных выше причин, на поведение величины МС пленок также оказывает влияние механизм рассеяния электронов в магнитных слоях, связанный с шероховатостями межзеренных границ. Так, с ростом температуры отжига увеличивается глубина диффузии промежуточного слоя меди в объеме слоев кобальта, что ведет к возрастанию роли спин-зависимого рассеяния на границах зерен в эффекте ГМС пленок. Идущий одновременно с процессом диффузии отжиг избыточных вакансий в объеме слоев кобальта также является причиной небольшого роста ГМС, поскольку увеличивается поток спин-поляризованных электронов, движущихся к границе раздела между слоями.

При дальнейшем возрастании температуры отжига наблюдается существенное уменьшение величины ГМС и переход к АМС.

Для всех исследуемых пленок с серебряными прослойками зависимости  $(\Delta R/R_0)_{max} = f(T_{отж})$  для продольного и поперечного МС подобны соответствующим зависимостям для пленок NiFe/Cu/Co с  $d_{Cu}=2-5 \text{ нм}$ .

На рис. 4 показаны зависимости величины продольного и поперечного МС от толщины прослойки Cu для неотожженных и отожженных при температуре  $550 \text{ К}$  трехслойных структур.

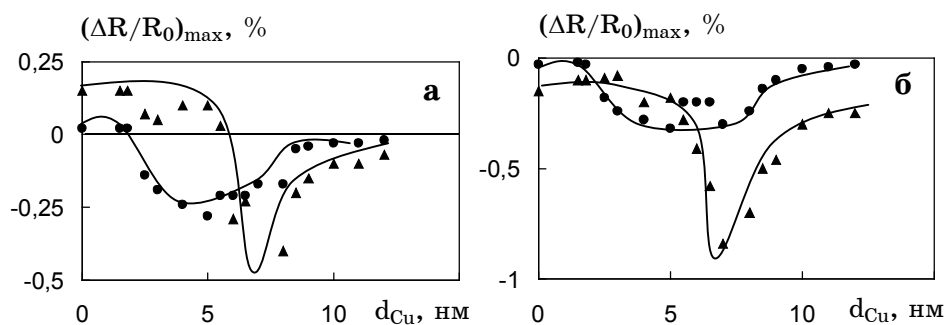


Рисунок 4 – Зависимость продольного (а) и поперечного (б) МС от толщины медной прослойки для неотожженных (●●●) и отожженных при  $T_{отж} = 550 \text{ К}$  (▲▲▲) трехслойных структур NiFe/Cu/Co/Π

Как видим, наибольший магниторезистивный эффект (до 1%) был получен для отожженных при температуре  $550 \text{ К}$  пленок NiFe/Cu/Co с  $d_{Cu}=7 \text{ нм}$ . При малых величинах  $d_{Cu}$  ГМС отсутствует и появляется только с ростом  $d_{Cu}$ . Дальнейшее увеличение толщины немагнитных прослоек снижает  $(\Delta R/R_0)_{max}$  из-за шунтирующего эффекта прослоек, а

также из-за увеличения рассеяния электронов в объеме прослоек. Для неотожженных пленок с серебряной прослойкой зависимости  $(\Delta R/R_0)_{\max}(d_{Ag})$  подобны соответствующим зависимостям для неотожженных пленок NiFe/Cu/Co. Для всех исследованных пленок NiFe/Ag/Co, отожженных при 550 К, наблюдается только АМС, а его величина слабо зависит от  $d_{Ag}$  и составляет 0,1-0,2% для продольного и 0,2-0,3% для поперечного МС.

На рис. 5 и рис. 6 представлены результаты исследования величины продольного и поперечного МС от температуры для неотожженных и отожженных при  $T_{отж} = 550$  К и  $T_{отж} = 700$  К трехслойных пленок NiFe/Cu(Ag)/Co.

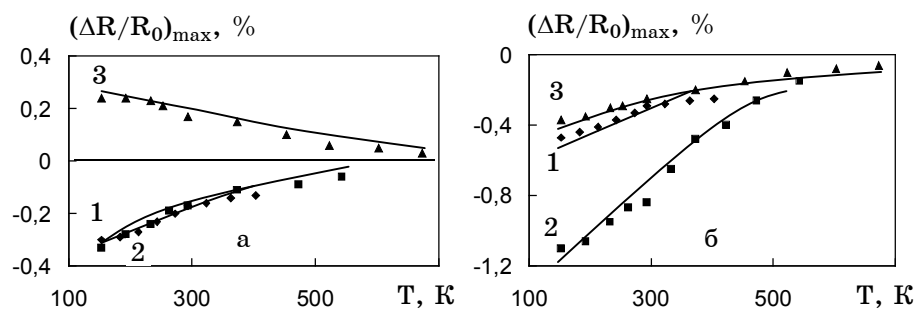


Рисунок 5 – Зависимость продольного (а) и поперечного (б) МС от температуры для трехслойной пленочной структуры NiFe(40 нм)/Cu(7 нм)/Co(40 нм)/Pi (1 - неотожженная; 2 -  $T_{отж} = 550$  К; 3 -  $T_{отж} = 700$  К)

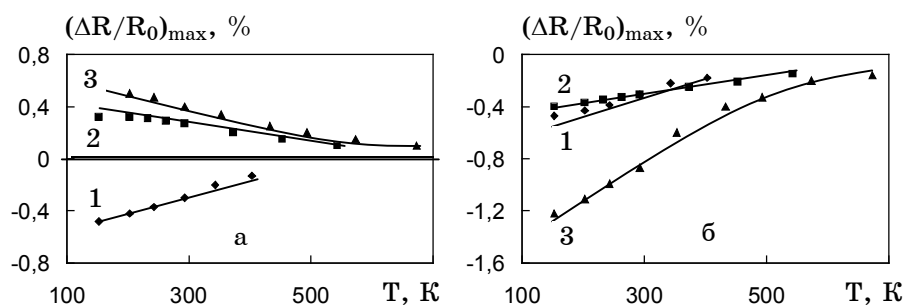


Рисунок 6 – Зависимость продольного (а) и поперечного (б) МС от температуры для трехслойной пленочной структуры NiFe(35 нм)/Ag(10 нм)/Co(35 нм)/Pi (1 - неотожженная; 2 -  $T_{отж} = 550$  К; 3 -  $T_{отж} = 700$  К)

Для всех исследуемых как неотожженных, так и отожженных при разных температурах образцов наблюдается увеличение величины МС при понижении температуры во всем температурном интервале. Полученные зависимости для пленок с ГМС объясняются уменьшением амплитуды эффекта, связанного с рассеянием электронов на фононах (особенно в немагнитной прослойке), что приводит к уменьшению роли процессов спин-зависящего рассеяния, главным образом ответственных за ГМС, а также препятствует прохождению электронов из одного ферромагнитного слоя в другой [11]. Зависимости для пленок с АМС подобны зависимостям для однослойных пленок NiFe и отожженных трехслойных пленок NiFe/Cu(Ag)/NiFe. Аномальные температурные зависимости (наличие максимума кривой  $(\Delta R/R_0)_{\max}(T)$  при температуре ниже комнатной), наблюдаемые для многослойных систем [12-14], для данной системы нами не были обнаружены.

## ВЫВОДЫ

1. Определено влияние толщины прослойки на вид петель магниторезистивного эффекта и его величину. Наибольший магниторезистивный эффект величиной 1% при комнатной температуре был получен в случае отожженной при 550 К структуры NiFe(30нм)/Cu(7нм)/Co(30нм).

2. Показано, что влияние температуры отжига на характер МС и его величину существенно зависит от вида и толщины немагнитной прослойки. Установлены температуры отжига, при которых наблюдается переход ГМС в АМС для пленок с разными прослойками.

3. Полученные температурные зависимости магнитосопротивления показывают, что абсолютная величина МС возрастает с понижением температуры во всем температурном интервале.

## SUMMARY

### MAGNETORESISTANCE OF THREE-LAYERED NiFe/Cu(Ag)/Co STRUCTURES

V.B. Loboda, Yu.A. Shkurdoda, V.A. Kravchenko

Sumy State Pedagogical University, Romens'ka str., 87, Sumy, 40002

*The results of research of magnetoresistive effect, dependence of magnetoresistance on a temperature and nonmagnetic layer thickness for freshly condensed and annealed at different temperatures three-layered unsymmetric NiFe/Cu(Ag)/Co systems are presented in work.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Schuller I.K., Kim S., Leighton C. Magnetic superlattices and multilayers // J. Magn. and Magn. Mater. - 1999. - V. 200, № 1-3. - P. 581-582.
- Пул Ч.П., Оуэнс Ф.Дж. Нанотехнологии. – Москва: Техносфера, 2006. - 336с.
- Звездин К.А. Особенности перемагничивания трехслойных наноструктур // ФТТ. - 2000. - Т. 42, Вып.1. - С. 116 - 120.
- Лобода В.Б., Пирогова С.Н., Шкурдода Ю.А. Электропроводность тонких пленок Ni и сплавов Ni-Cu в слабых магнитных полях в интервале температур 100-700К // Вісник СумДУ. - 2003. - №10(56). - С. 89 - 99.
- Иноуэ И., Иго Х, Асао И., Огури А., Маекава С. Теория электронной структуры и магнитотранспортных свойств в многослойных магнитных пленках // ФММ. - 1996. - Т.79, Вып.7. - С. 54 - 64.
- De Vries J.J., Schudelaro A.A., Jungblut R., De Jonge W.J.M. // J. Mag. and Mag. Mater. - 1996. - V. 156. - P. 257 - 258.
- Kond L., Pan Q., Cui B et all. Magnetotransport and domain structures in nanoscale NiFe/Cu/Co spin valve // J. Appl. Phys. – 1999. - V. 85, № 8. - P. 5492 - 5494.
- Славов А.В., Савин П.А., Курляндская Г.В. и др. Спин-вентильные магниторезистивные структуры на основе многослойных пленок Co/Tb // ЖТФ. - 2002. - Т.72, Вып.8. - С. 54 - 57.
- Лобода В.Б., Шкурдода Ю.А., Пирогова С.Н. Структура и гальваномагнитные свойства трехслойных пленок Co/Cu/Co // Вісник СумДУ. – 2004. - №8(67). - С. 107-115.
- Свиркова Н.Н. Влияние рассеяния электронов на межзеренных границах магнитных слоев на магниторезистивное отношение поликристаллического сэндвича при поперечном переносе заряда //ЖТФ. - 2004. - Т.74, Вып.3. - С. 14 - 19.
- Alphen E.A.M., Heijden P.A.A., Jonge W.J.M. Structural and magnetic properties of Co/Ag multilayers // J. Appl. Phys. - 1994. - V.76, № 10. - P. 6607 - 6609.
- Лобода В.Б., Шкурдода Ю.А., Пирогова С.Н. Магнитосопротивление трехслойных пленок Co/Cu/Co в температурном интервале 150-700К // Вісник СумДУ. - 2004. - №10(69). - С. 212-218.
- Ким П.Д., Халяпин Д.Л., Турпанов И.А. и др. Аномальная температурная зависимость магнитосопротивления в мультислоях Co/Cu // ФТТ. - 2000. - Т.42, Вып.9. - С. 1641 - 1643.
- Kubota H., Sato R., Miyazaki T. Anomalous temperature dependence of thin giant magnetoresistance in Ni/Cu, Ni<sub>95</sub>Co<sub>5</sub>/Cu and Ni<sub>95</sub>Fe<sub>5</sub>/Cu multilayer films // J. Magn. Mater. – 1997. – V.167. – Is.1-2. – P. 12-20.

**В.Б. Лобода**, кандидат физ.-мат. наук, СумГПУ им. А.С.Макаренко, г. Сумы;

**Ю.А. Шкурдода**, младший научный сотрудник, СумГПУ им. А.С.Макаренко;

**В.А. Кравченко**, преподаватель, СумГПУ им. А.С.Макаренко

*Поступила в редакцию 6 ноября 2007 г.*