



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-5-13>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 537.9, 537.633.9

## КОРРЕЛЯЦИЯ СОСТАВА, АСПЕКТНОГО СООТНОШЕНИЯ И МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МИКРО- И НАНОПРОВОЛОК ТИПА «ФЕРРОМАГНЕТИК/ДИАМАГНЕТИК»

В.М. ФЕДОСЮК

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 26 января 2021*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования коэффициента гигантского магнитосопротивления (ГМС) в многослойных микро- и нанопроволоках, состоящих из последовательно расположенных ферромагнитных (Co, CoNi и NiFe) и диамагнитных (Cu) слоев. Образцы были получены методом электрохимического осаждения в поры матриц. В качестве матриц был использован оксид алюминия. Для установления влияния аспектного соотношения были использованы матрицы двух типов: с диаметром пор 8 мкм и 170–200 нм и варьируемой толщиной от 10 до 60 мкм. Исследования коэффициента ГМС были выполнены путем измерения вольт-амперных характеристик во внешних магнитных полях до 130 мТл. При использовании матриц I-типа (диаметр пор 8 мкм) отмечен положительный коэффициент ГМС (увеличение электросопротивления во внешнем магнитном поле), в то время как при использовании матриц II-типа (диаметр пор 170–200 нм) отмечен отрицательный коэффициент ГМС (уменьшение электросопротивления во внешнем магнитном поле). Это обусловлено усилением взаимодействий спин-поляризованных электронов в магнитных слоях через слой меди посредством РККИ-обмена при увеличении аспектного соотношения. Отмечено значительное влияние состава ферромагнитного слоя (Co, CoNi и NiFe) на величину коэффициента ГМС. Максимальное значение отрицательного коэффициента ГМС (до –27,5 %) было отмечено для системы нанопроволок на основе CoNi. Использование многослойных микро- и нанопроволок, электролитически осажденных в матрицы из оксида алюминия с возможностью контролирования коэффициентов ГМС открывает перспективны использования данных объектов в качестве чувствительных элементов (датчиков) постоянного магнитного поля, а также устройств хранения магнитной информации с вертикальным принципом.

**Ключевые слова:** микро- и нанопроволоки, многослойные структуры, матрицы, электрохимическое осаждение, магнитосопротивление.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Федосюк В.М. Корреляция состава, аспектного соотношения и магнитосопротивления многослойных микро- и нанопроволок типа «ферромагнетик/диамагнетик». Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 5-13.

## CORRELATION OF COMPOSITION, ASPECT RATIO AND MAGNETIC RESISTANCE OF MULTILAYER MICRO- AND NANOWIRES OF THE “FERROMAGNETIC/DIAMAGNETIC” TYPE

VALERY M. FEDOSYUK

*Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 26 January 2021*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** The results of study of the giant magnetoresistance coefficient (GMR) in multilayer micro- and nanowires based on successively alternating ferromagnetic (Co, CoNi and NiFe) and diamagnetic (Cu) layers are presented in the paper. The samples were obtained by electrochemical deposition into the matrix pores. Aluminum oxide was used as matrices. To establish the influence of the aspect ratio, matrices of two types were used: with a pore diameter of 8  $\mu\text{m}$  and 170–200 nm and a variable thickness from 10 to 60  $\mu\text{m}$ . Investigations of the GMR coefficient were carried out by measuring the current-voltage characteristics in external magnetic fields up to 130 mT. When using type I matrices (pore diameter 8  $\mu\text{m}$ ), a positive GMR coefficient (an increase in electrical resistivity in an external magnetic field) was noted, while when using type II matrices (pore diameter 170–200 nm), a negative GMR coefficient was established (a decrease in electrical resistance in an external magnetic field). This is due to the enhancement of the interactions of spin-polarized electrons in the magnetic layers through the copper layer through the RKKY exchange with an increase in the aspect ratio. A significant effect of the composition of the ferromagnetic layer (Co, CoNi, and NiFe) on the value of the GMR coefficient is noted. The maximum value of the negative GMR coefficient (up to  $-27.5\%$ ) was established for the CoNi-based nanowire system. The use of multilayer micro- and nanowires, electrolytically deposited in a matrix of aluminum oxide with the ability to control the GMR coefficients, opens up perspective use of these objects as sensitive elements (sensors) of a constant magnetic field, as well as devices for storing magnetic information with a vertical principle.

**Keywords:** micro- and nanowires, multilayer structures, matrices, electrochemical deposition, magnetoresistance.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Fedosyuk V.M. Correlation of composition, aspect ratio and magnetic resistance of multilayer micro- and nanowires of the “ferromagnetic/diamagnetic” type. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 5-13.

### Введение

На протяжении длительного времени значительный интерес многих исследователей прикован к материалам на основе наноструктурированных магнитных материалов, таких как многослойные наноструктурированные пленки [1], квазиодномерные объекты типа нанопроволок и микропроводов [2, 3]. Интерес многих исследователей обусловлен важной научной и практической значимостью данных объектов исследований [4–6]. Многие исследователи отмечают, что наноразмерные многослойные металлические структуры характеризуются эффектом гигантского магнитосопротивления (эффект ГМС). Эффект ГМС проявляется в резком снижении электрического сопротивления многослойной пленочной структуры (или гранулированных композиционных пленок), состоящих из последовательно расположенных слоев с различными магнитными и электрическими свойствами, в условиях воздействия постоянного магнитного поля [7, 8]. Коэффициент ГМС может быть определен с использованием нескольких формул.

Один из подходов заключается в представлении отношения изменения электрического сопротивления к сопротивлению в состоянии насыщения  $\Delta R/R_{\text{нас}}$ : 
$$\frac{\Delta R}{R_{\text{нас}}} = \frac{R(H) - R_{\text{нас}}}{R_{\text{нас}}} \cdot 100\% ,$$

где  $R(H)$  – сопротивление в зависимости от приложенного поля  $H$ ,  $R_{\text{нас}}$  – сопротивление в состоянии магнитного насыщения или сопротивление в максимальном поле, если образец полностью не насыщается. Другое определение, также часто используемое на практике, состоит в нормировке сопротивления к его значению при нулевом внешнем поле ( $R_0$ ). Оно

определяется следующим образом:  $\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(H) - R_0}{R_0} \cdot 100\%$ . Эти два представления связаны

друг с другом соотношением  $\Delta R / R_{\text{нас}} = \frac{(\Delta R / R_0)}{(\Delta R / R_0) - 1}$ .

Большинство экспериментаторов предпочитают пользоваться первым определением, поскольку сопротивление при нулевом поле, как правило, зависит от предыстории образца. Снижение электрического сопротивления связано с магнитным упорядочением в соседних ферромагнитных слоях (изменение с антипараллельного на параллельное упорядочение) под действием магнитного поля. При протекании электрического тока в плоскости слоев (current-in-plane или СІР ГМС) перенос заряда в основном имеет диффузионный характер, и ГМС можно рассматривать как результат спин-зависимого рассеяния на магнитных примесях, расположенных на границах раздела. При пропускании тока перпендикулярно плоскости слоев (current-perpendicular-plane или СРР ГМС) [9], электроны проводимости пересекают все слои, и зонная структура материалов, составляющих многослойную структуру, является крайне важной [10].

В квазиодномерных нанообъектах (нанопроволоки) [11] теоретически предсказана возможность наблюдения больших значений коэффициента гигантского магнитосопротивления, гораздо больших по сравнению с двумерными наноструктурами (пленки). Следует отметить, что значительные величины коэффициента ГМС в нанопроволоках могут быть отмечены в геометрии СРР. Именно при этой конфигурации реализуется рассеяние практически всех носителей заряда на границах ферромагнитных и диамагнитных слоев.

Главное затруднение при исследованиях нанопроволок в конфигурации СРР – детектирование относительного изменения удельного электрического сопротивления в постоянном магнитном поле. Так, для планарного образца с перпендикулярно ориентированными многослойными нанопроволоками с размером в плоскости  $1 \times 1 \text{ см}^2$  и толщиной 10 мкм (длина нанопроволок) с удельным сопротивлением  $\rho \sim 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , сопротивление в случае, когда ток протекает параллельно слоям (СІР), оказывается равным

$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho \cdot 10^{-2}}{10^{-2} \cdot 10^{-6}} \approx \rho \cdot 10^6 = 10^{-2} \text{ Ом}$ . Однако для того же образца в геометрии СРР

$R = \rho \frac{10^{-6}}{10^{-2} \cdot 10^{-2}} \approx \rho \cdot 10^{-2} = 10^{-10} \text{ Ом}$ .

Сопротивление в последнем случае (СРР) почти на восемь порядков меньше, чем в случае СІР. Измерение очень малого сопротивления сопряжено с большими техническими трудностями. Для решения этой задачи требуется получать образцы с малой площадью поперечного сечения и большой толщиной. Поэтому для измерения СРР ГМС образцы должны состоять из большого числа слоев с очень малой площадью поперечного сечения. Это можно реализовать, получая образцы в виде нанопроволок методом электрохимического осаждения. И чем больше отношение длины к поперечному размеру, тем легче осуществляется измерение сопротивления образца.

Нанопроволоки, синтезированные в виде последовательно расположенных ферромагнитных структур в порах матриц, могут быть хорошим модельным объектом для объяснения природы магнитных, электрических и магнитотранспортных явлений в наноструктурированных квазиодномерных системах [11–13]. Данные системы имеют значительный потенциал для практического использования в качестве чувствительных элементов датчиков постоянных магнитных полей, устройств хранения магнитной информации с вертикальным типом записи. Следует отметить два наиболее важных параметра, влияющих на величину магнитосопротивления: 1. качество интерфейсов на границе раздела слоев; 2. соотношение линейных параметров нанопроволок (длина/диаметр) или аспектное соотношение.

## Методика эксперимента

Образцы многослойных микро- и нанопроволок типа «ферромагнетик/диамагнетик» были синтезированы методом электрохимического осаждения ферромагнитных (Co, CoNi, NiFe) и диамагнитных (Cu) слоев в поры матриц. В качестве матриц были использованы образцы анодированного оксида алюминия двух типов: I-тип с диаметром пор 8 мкм (рис. 1, *a*) и II-тип с диаметром пор 170–200 нм (рис. 1, *b*).

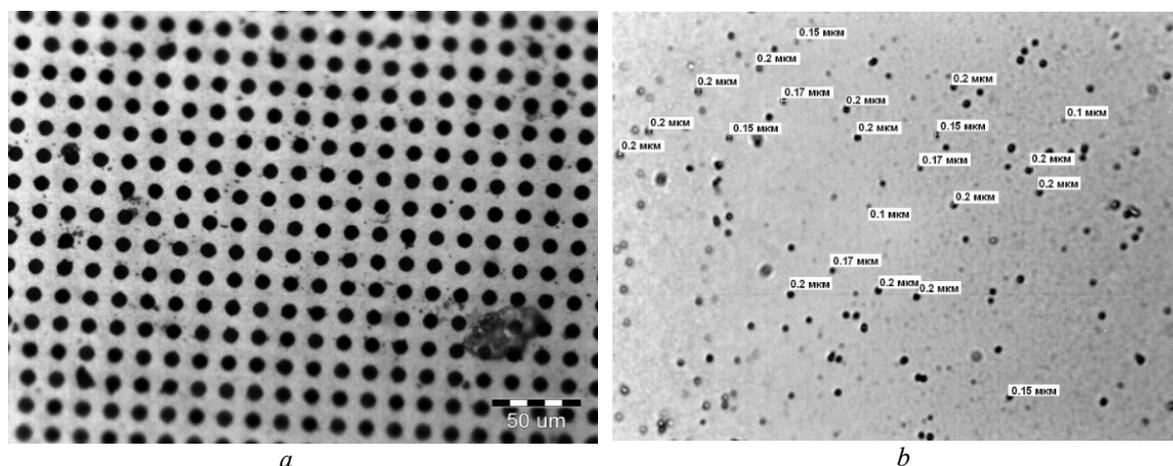


Рис. 1. Изображения поверхности матриц I-типа (*a*) и II-типа (*b*)  
Fig. 1. Surface images of type I (*a*) and type II matrices (*b*)

Толщина матрицы (длина проволоки) варьировалась от 10 до 60 мкм. Толщины ферромагнитных слоев были фиксированными (25 нм), а толщина диамагнитного слоя составляла 3 нм.

Состав электролита и режимы получения многослойных микро- и нанопроволок для системы Co/Cu:  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 100$ ;  $\text{H}_3\text{BO}_3 - 30$ ;  $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 2-2,5$ ;  $\text{pH} = 4,2-4,5$ ;  $T = 50-60$  °C;  $\varphi_{\text{Co}} = -1,0 \dots 1,2$  В;  $\varphi_{\text{Cu}} = -0,3 \dots 0,4$  В. При изменении времени осаждения магнитных и немагнитных слоев в пределах  $\tau_{\text{NiCo}} = (0,5-10)$  с и  $\tau_{\text{Cu}} = (5-100)$  с толщина магнитных слоев составляет 25–200 Å, медных слоев – 20–500 Å.

Состав электролита и режимы получения многослойных микро- и нанопроволок для системы CoNi/Cu:  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 280$ ;  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 30$ ;  $\text{NiCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} - 10$ ;  $\text{H}_3\text{BO}_3 - 30$ ; сахарин – 0,8;  $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 2-4$ ;  $\text{pH} = 2,4-2,6$ ;  $T = 50-60$  °C;  $\varphi_{\text{CoNi}} = -1,2 \dots 1,5$  В;  $\varphi_{\text{Cu}} = -0,3 \dots 0,4$  В. Время осаждения магнитных слоев ( $\tau_{\text{NiCo}}$ ) и меди ( $\tau_{\text{Cu}}$ ) изменялось в интервалах (0,5–10) с и (5–100) с соответственно, что позволяло варьировать толщины слоев в пределах  $d_{\text{NiCo}} = 25-200$  Å,  $d_{\text{Cu}} = 20-500$  Å.

Состав электролита и режимы получения многослойных микро- и нанопроволок для системы NiFe/Cu:  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 210$ ;  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 15$ ;  $\text{NiCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} - 20$ ;  $\text{H}_3\text{BO}_3 - 30$ ;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 60$ ; сахарин – 1; сегнетова соль (тарtrat натрия калия) – 30;  $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} - 0,5-2$ ;  $\text{pH} = 2,2-2,5$ ;  $T = 25-35$  °C;  $\varphi_{\text{NiFe}} = -1,0 \dots 1,2$  В;  $\varphi_{\text{Cu}} = -0,3-0,4$  В;  $\tau_{\text{NiFe}} = (0,5-10)$  с;  $\tau_{\text{Cu}} = (5-100)$  с. При этом в полученных структурах толщины слоев варьировалась в пределах  $d_{\text{NiFe}} = 25-200$  Å,  $d_{\text{Cu}} = 20-500$  Å.

Коэффициенты ГМС были определены с помощью измерительного комплекса (рис. 2) на базе программно-аппаратного комплекса ИППП-1/6, совмещенного с магнитопроводом рупорного типа, управляемого персональным компьютером в диапазоне напряжений до 2 В и магнитных полей до  $\pm 130$  мТл. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились двухконтактным методом при фиксированных значениях магнитных полей 20, 40, 55, 75, 95, 110, 120, 130 мТл во взаимно противоположных направлениях. Магнитное поле прикладывалось перпендикулярно оси проволоки (направление магнитного поля перпендикулярно направлению тока). При каждом значении поля снималась ВАХ, а при расчете сопротивления принималась ее линейная часть.



**Рис. 2.** Измерительный комплекс для определения коэффициента ГМС  
**Fig. 2.** Measuring system for determining the GMR coefficient

Расчет коэффициентов ГМС проводился по формуле  $MR = (R_B - R_0) / R_B \cdot 100 \%$ , где  $MR$  – величина магнитосопротивления (коэффициент, выраженный в процентах);  $R_B$  – электрическое сопротивление нанопроволок во внешнем магнитном поле, Ом;  $R_0$  – электрическое сопротивление нанопроволок без магнитного поля, Ом.

Были сформированы две партии образцов микро- и нанопроволок.

Партия 1 – микропроволоки в порах матриц I-типа (MI – диаметр пор 8 мкм) с толщиной матриц 60 мкм (d60). В качестве ферромагнитного слоя были использованы слои Co (C), CoNi (CN) и NiFe (NF) с толщинами 25 нм. Толщина диамагнитного слоя была фиксирована – 3 нм.

Партия 1 (микропроволоки) – система на основе Co-MI-d60-CNC<sub>3</sub>; система на основе CoNi-MI-d60-CNC<sub>3</sub>; система на основе NiFe-MI-d60-NFC<sub>3</sub>.

Партия 2 (нанопроволоки) – в порах матриц II-типа (MII – диаметр пор 170–200 нм) с толщиной матриц 10–60 мкм (d10–d60). В качестве ферромагнитного слоя были использованы слои Co (C) и CoNi (CN) с толщинами 25 нм. Толщины диамагнитного слоя составляли 3–5–12 нм.

Партия 2 – система на основе Co-MII-d10-CC<sub>3</sub>; система на основе CoNi-MII-d10-CNC<sub>3</sub>; система на основе CoNi-MII-d20-CNC<sub>3</sub>; система на основе CoNi-MII-d40-CNC<sub>3</sub>; система на основе CoNi-MII-d60-CNC<sub>3</sub>.

## Результаты и обсуждение

*Результаты исследования образцов из партии 1 (микропроволоки).* В многослойных гранулированных структурах Co/Cu и CoNi/Cu имеет место разбавление отдельных магнитных слоев примесными элементами до 5–6 ат. % Cu, в то время как в слоях меди примеси кобальта и никеля не обнаружены. При осаждении многослойных структур системы NiFe/Cu в слоях меди зафиксировано незначительное количество примеси железа – до 0,4 ат. %.

В многослойных микропроводах CoNi/Cu с толщинами слоев меди 3 нм – MI-d60-CNC<sub>3</sub> отмечено равномерное и однородное заростание пор матрицы. Интерфейс раздела между диамагнитными Cu и ферромагнитными CoNi не разрешаются. На рис. 3 представлена полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CNC<sub>3</sub>. По данным химического анализа, четко разрешается зона подслоя Ni и зона сплава CoNi. Измерены полевые зависимости электросопротивления образцов при комнатной температуре в интервалах полей до 130 мТл.

Ветви полевой зависимости являются симметричными. Отмечен положительный характер магнитосопротивления (увеличение электросопротивления во внешних магнитных полях). Максимальное значение положительного коэффициента магнитосопротивления достигает порядка 1 % в полях свыше 40 мТл. Основной вклад в увеличение сопротивления вносит рассеяние спин-поляризованных электронов в диамагнитных слоях меди.

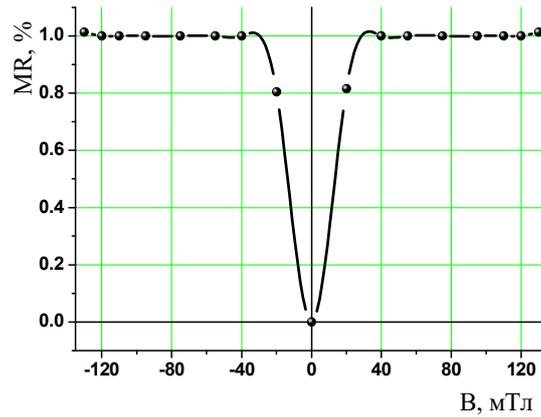


Рис. 3. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CNC<sub>3</sub>  
Fig. 3. Field dependence of the GMR coefficient for sample MI-d60-CNC<sub>3</sub>

На рис. 4 представлена полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CC<sub>3</sub>. Для образца на основе Co-MI-d60-CC<sub>3</sub>, как и в случае с образцом на основе слоев CoNi, осажденных в матрицы ААО I-типа, отмечена симметричность положительной и отрицательной ветвей на графике полевой зависимости ГМС (рис. 4). Коэффициент ГМС также является положительным. Однако увеличение сопротивления носит ступенчатый характер. Наиболее резкое изменение сопротивления отмечено в полях до 20 мТл. Максимальный коэффициент составляет 2,2 % в полях 130 мТл. Природа магнитосопротивления данного образца также обусловлена рассеянием спин-поляризованных носителей заряда в диамагнитной прослойке меди.

На рис. 5 представлена полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-NFC<sub>3</sub>. Для образца на основе NiFe – MI-d60-NFC<sub>3</sub>, как и в случае с образцами на основе слоев Co и CoNi, осажденных в матрицы ААО I-типа, отмечена симметричность положительной и отрицательной ветвей на графике полевой зависимости ГМС (рис. 5). Коэффициент ГМС также является положительным. Однако увеличение сопротивления носит практически линейный характер. Наиболее резкое изменение сопротивления отмечено в полях до 20 мТл. Максимальный коэффициент составляет порядка 3 % в полях 130 мТл. Природа магнитосопротивления данного образца также обусловлена рассеянием спин-поляризованных носителей заряда в диамагнитной прослойке меди.

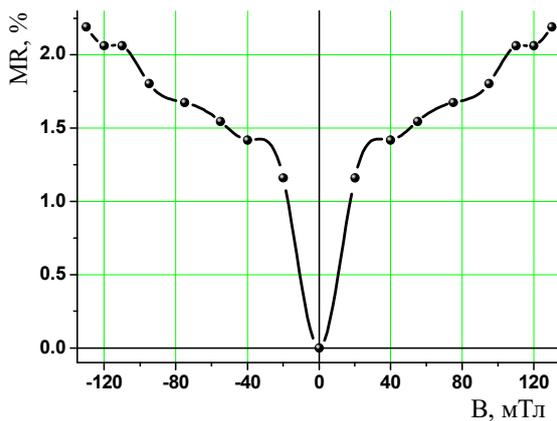


Рис. 4. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-CC<sub>3</sub>  
Fig. 4. Field dependence of the GMR coefficient for sample MI-d60-CC<sub>3</sub>

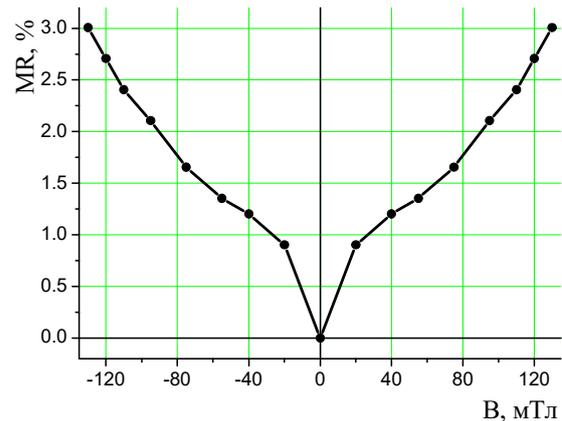


Рис. 5. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MI-d60-NFC<sub>3</sub>  
Fig. 5. Field dependence of the GMR coefficient for sample MI-d60-NFC<sub>3</sub>

В результате исследований образцов, синтезированных в порах матриц I-типа, можно отметить увеличение удельного электрического сопротивления в постоянном магнитном поле. Таким образом, отмечен эффект положительного ГМС.

Минимальное значение коэффициента ГМС (порядка 1 %) наблюдается для образца на основе системы CoNi – MI-d60-CNC<sub>3</sub>, в то время как максимальное значение коэффициента ГМС (порядка 3 %) наблюдается для образца на основе NiFe – MI-d60-NFC<sub>3</sub>.

Результаты исследования образцов из партии 2. На рис. 6, 7 представлены полевые зависимости коэффициентов ГМС для образцов на основе Co (рис. 6) и CoNi (рис. 7) в матрицах с толщиной 10 мкм и диаметром пор 170–200 нм.

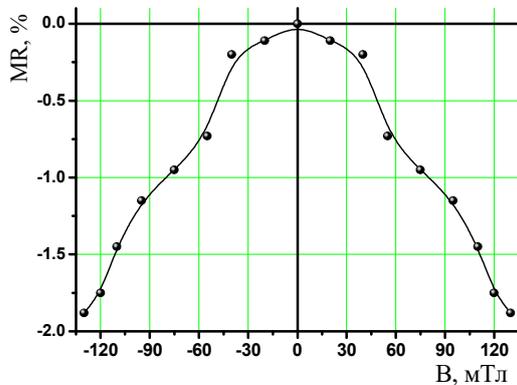


Рис. 6. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d10-CC<sub>3</sub>  
Fig. 6. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d10-CC<sub>3</sub>

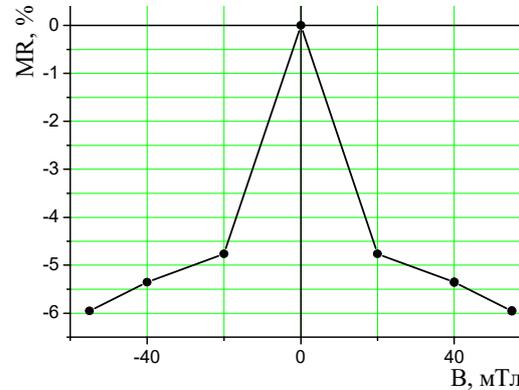


Рис. 7. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d10-CNC<sub>3</sub>  
Fig. 7. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d10-CNC<sub>3</sub>

Характерно изменение знака коэффициента ГМС для образцов в матрицах II-типа на отрицательный по сравнению с положительными коэффициентами ГМС (характерное для образцов в матрицах I-типа). Ветви отрицательной и положительной части являются симметричными и характеризуются линейной зависимостью для образца на основе Co-MII-d10-CC<sub>3</sub> (рис. 6). Максимальный коэффициент магнитосопротивления (в поле 130 мТл) составляет –1,88 %. Однако для образца MII-d10-CNC<sub>3</sub> отмечена нелинейность (рис. 7). Наиболее резкое изменение коэффициента ГМС отмечено в полях до 20 мТл. Максимальный коэффициент магнитосопротивления (в поле 50 мТл) составляет –5,99 %. Таким образом, можно отметить увеличение коэффициента ГМС практически в 3 раза для образцов нанопроволок в матрицах II-типа при использовании в качестве ферромагнитных слоев CoNi вместо Co.

При увеличении толщины матрицы от 10 мкм до 20, 40 и 60 мкм с фиксированным диаметром пор (170–200 нм) увеличивается аспектное соотношение. При увеличении аспектного соотношения теоретически должен увеличиваться коэффициент ГМС. На рис. 8–10 представлены полевые зависимости коэффициента ГМС для образцов на основе CoNi с толщиной матрицы 20 мкм – MII-d20-CNC<sub>3</sub> (рис. 8), 40 мкм – MII-d40-CNC<sub>3</sub> (рис. 9) и 60 мкм – MII-d40-CNC<sub>3</sub> (рис. 10). При увеличении аспектного отношения значение отрицательного коэффициента ГМС увеличивается до –13,2, –15,3 и –27,5 % для толщин матриц 20, 40 и 60 мкм соответственно.

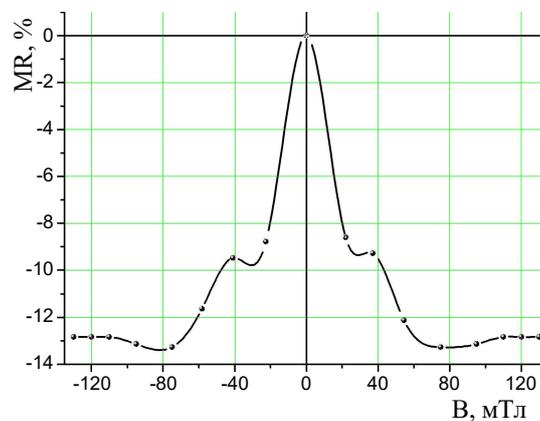
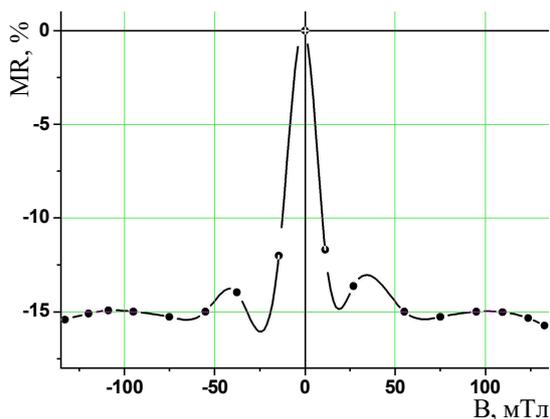
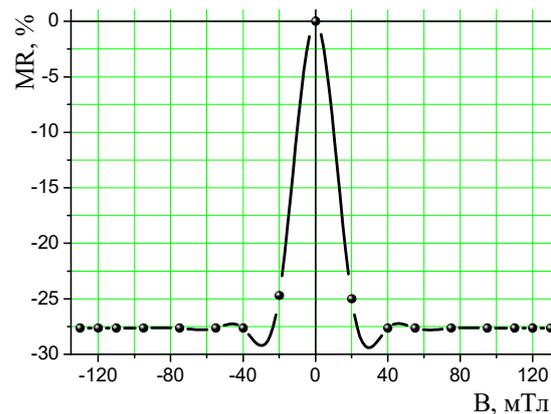


Рис. 8. Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d20-CNC<sub>3</sub>  
Fig. 8. Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d20-CNC<sub>3</sub>



**Рис. 9.** Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d40-CNC<sub>3</sub>  
**Fig. 9.** Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d40-CNC<sub>3</sub>



**Рис. 10.** Полевая зависимость коэффициента ГМС для образца MII-d60-CNC<sub>3</sub>  
**Fig. 10.** Field dependence of the GMR coefficient for sample MII-d60-CNC<sub>3</sub>

### Заключение

Синтезированы многослойные микро- и нанопроволоки на основе чередующихся слоев ферромагнитного материала (Co, CoNi и NiFe) и диамагнитного материала (Cu). Синтез был проведен методом электрохимического осаждения в поры оксида алюминия. Были использованы матрицы двух типов: с диаметром пор 8 мкм (тип I) и 170–200 нм (тип II). Толщины ферромагнитных и диамагнитных слоев были фиксированными – 25 и 3 нм соответственно.

Исследования коэффициентов ГМС были проведены путем измерения ВАХ во внешних магнитных полях до 130 мТл. Толщины матриц, определяющие аспектное соотношение, варьировались от 10 до 60 мкм. Процесс формирования многослойных структур с контролируемыми толщинами и составом на основе Co/Cu и CoNi/Cu и NiFe/Cu в матрицах протекает равномерно, степень заполнения пор близка к 100 %, заполнение осуществляется сферическими зернами с размерами, зависящими от диаметра пор в матрицах. После завершения процесса заполнения на поверхности матрицы образуется сплошная пленка соответствующего металла.

Показано, что образцы в матрицах I-типа на основе Co/Cu и CoNi/Cu и NiFe/Cu характеризуются положительным коэффициентом ГМС (от 1 до 3 %), в то время как использование матриц II-типа (с диаметром пор 170–200 нм) приводит к изменению знака коэффициента ГМС на отрицательный. Таким образом, установлено влияние диаметра пор (при переходе от микрометрового до наноразмерного диаметра пор) на коэффициент ГМС. Коэффициент отрицательного магнитосопротивления в системе CoNi/Cu выше по сравнению с системой Co/Cu при осаждении в матрицы с толщиной 10 мкм (различие практически в 3 раза).

Увеличение толщины матрицы от 10 до 60 мкм (что соответствует длине нанопроволок) при фиксированном диаметре пор (до 200 нм) приводит к увеличению ГМС от –5,99 (для 10 мкм) до –27,5 (для 60 мкм) и от –3,13 % (при толщине матрицы 13,5 мкм) до –27,5 % (при толщине 57–60 мкм) в нанопроволоках системы CoNi/Cu. Таким образом, установлено влияние аспектного соотношения в исследуемых нанопроволоках. Это обусловлено усилением взаимодействий спин-поляризованных электронов в магнитных слоях через слой меди посредством РККИ-обмена при увеличении аспектного соотношения.

### Список литературы / References

1. Sanvito S., Lambert C.J., Jefferson J.H. GMR in 3d, 4d and 5d transition metals multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1999;196-197:101-103. DOI:10.1016/S0304-8853(98)00677-5.
2. Posth O., Hassel C., Spasova M., Dumpich G., Lindner J., Mangin S. Influence of growth parameters on the perpendicular magnetic anisotropy of [Co/Ni] multilayers and its temperature dependence. *Journal of Applied Physics*. 2009;106(2):23919. DOI:10.1063/1.3176901.
3. Hassel C., Römer F.M., Meckenstock R., Dumpich G., Lindner J. Magnetization reversal in epitaxial Fe nanowires on GaAs(110). *Physical Review B*. 2008;77(22): 224439. DOI:10.1103/PhysRevB.77.224439.
4. Moser A., Takano K., Margulies D. T., Albrecht M., Sonobe Y., Ikeda Y., Sun S., Fullerton E.E. Magnetic recording: advancing into the future. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002;35(19): R157–R167. DOI:10.1088/0022-3727/35/19/201.
5. Battle X., Labarta A. Finite-size effects in fine particles: magnetic and transport properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002;35(6): R15–R42. DOI:10.1088/0022-3727/35/6/201.
6. Suzdalev I.P., Suzdalev P.I. Nanoclusters and nanocluster systems. Assembling, interactions and properties. *Russian Chemical Reviews*. 2001;70(3):177-210. DOI:10.1070/RC2001v070n03ABEH000627.
7. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Van Dau F.N., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. *Physical Review Letters*. 1988;61(21):2472-2475. DOI:10.1103/PhysRevLett.61.2472.
8. Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Physical Review B*. 1989;39(7):4828-4830. DOI:10.1103/PhysRevB.39.4828.
9. Pratt W.P., Lee S.-F., Slaughter J.M., Loloee R., Schroeder P.A., Bass J. Perpendicular giant magnetoresistances of Ag/Co multilayers. *Physical Review Letters*. 1991;66(23):3060-3063. DOI:10.1103/PhysRevLett.66.3060.
10. Gijs M.A.M., Bauer G.E.W. Perpendicular giant magnetoresistance of magnetic multilayers. *Advances in Physics*. 1997;46(3-4):285-445. DOI:10.1080/00018739700101518.
11. Nasirpour F., Southern P., Ghorbani M., Irajizad A., Schwarzacher W. GMR in multilayered nanowires electrodeposited in track-etched polyester and polycarbonate membranes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;308(1):35-39. DOI:10.1016/j.jmmm.2006.04.035.
12. Schwarzacher W., Attenborough K., Michel A., Nabiyouni G., Meier J.P. Electrodeposited nanostructures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1997;165(1):23-29. DOI:10.1016/S0304-8853(96)00465-9.
13. Evans P.R., Yi G., Schwarzacher W. Current perpendicular to plane giant magnetoresistance of multilayered nanowires electrodeposited in anodic aluminum oxide membranes. *Applied Physics Letters*. 2000;76(4):481-483. DOI:10.1063/1.125794.

#### Сведения об авторе

Федосюк В.М., д.ф.-м.н., профессор, член-кор.  
НАН Беларуси, генеральный директор Научно-  
практического центра Национальной академии  
наук Беларуси.

#### Information about the author

Fedosyuk V.M., D.Sc., Professor, Corresponding  
Member of NAS of Belarus, General Director  
of the Scientific-Practical Materials Research Centre  
of NAS of Belarus.

#### Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 19,  
Научно-практический центр  
Национальной академии наук Беларуси;  
тел. +375-17-322-27-91;  
e-mail: podvornaya@bsuir.by  
Федосюк Валерий Михайлович

#### Address for correspondence

220072, Republic of Belarus  
Minsk, P. Brovki str., 19,  
Scientific-Practical Materials Research  
Centre of NAS of Belarus;  
tel. +375-17-322-27-91;  
e-mail: podvornaya@bsuir.by  
Fedosyuk Valery Mikhailovich