



Получено: 23.03.2023 г. | Принято: 28.03.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.96.102>

Научная статья

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОРЕЗИСТИВНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ МАГНИТНОЙ СТРЕЙНТРОНИКИ

Д.А.Жуков¹, науч. сотр., ORCID: 0000-0001-5904-8189 / D.Zhukov@tcen.ru

П.А.Поляков², д.ф.-м.н., проф. МГУ, ORCID: 0000-0001-5871-7686

В.В.Амеличев¹, к.т.н., нач. отдела, ORCID: 0000-0002-4204-2626

С.И.Касаткин³, д.т.н., гл. науч. сотр., ORCID: 0000-0003-4444-0473

О.П.Поляков³, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., ORCID: 0000-0001-9232-5790

Д.В.Костюк¹, нач. лаб., ORCID: 0000-0003-2795-5547

Аннотация. Представлены результаты исследования экспериментальных образцов и разработанной теоретической модели физического процесса перемагничивания многослойной магниторезистивной наноструктуры с магнитострикционным эффектом. Описаны основные факторы, влияющие на процессы магнитной стрейнтроники. Полученные результаты теоретического расчета магнитосопротивления при механических деформациях согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: магнитная стрейнтроника, анизотропный магниторезистивный эффект, теория микромагнетизма, магниторезистивная наноструктура

Для цитирования: Д.А. Жуков, П.А. Поляков, В.В. Амеличев, С.И. Касаткин, О.П. Поляков, Д.В. Костюк. Теоретическая модель процесса перемагничивания магниторезистивной наноструктуры магнитной стрейнтроники. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 2. С. 96–102. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.96.102>.

Received: 23.03.2023 | Accepted: 28.03.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.96.102>

Original paper

THEORETICAL MODEL OF THE PROCESS OF MAGNETIZATION REVERSAL OF A MAGNETORESISTIVE NANOSTRUCTURE OF MAGNETIC STRAINTRONICS

D.A.Zhukov¹, Researcher, ORCID: 0000-0001-5904-8189 / D.Zhukov@tcen.ru

P.A.Polyakov², Doct. of Sc. (Physics and Mathematics), Professor, ORCID: 0000-0001-5871-7686

V.V.Amelichev¹, Cand. of Sc. (Technical), Head of Department, ORCID: 0000-0002-4204-2626

S.I.Kasatkin³, Doct. of Sc. (Technical), Chief Researcher, ORCID: 0000-0003-4444-0473

O.P.Polyakov³, Cand. of Sc. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, ORCID: 0000-0001-9232-5790

D.V.Kostyuk¹, Head of Laboratory, ORCID: 0000-0003-2795-5547

¹ НПК "Технологический центр", Москва, Россия / SMC "Technological Centre", Moscow, Russia

² Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова / Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Институт проблем управления РАН, Москва, Россия / V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia



Abstract. The results of the study of experimental samples and the developed theoretical model of the physical process of magnetization reversal of a multilayer magnetoresistive nanostructure with a magnetostrictive effect are presented. The main factors influencing the processes of magnetic straintronics are described. The obtained results of the theoretical calculation of the magnetoresistance under mechanical deformations agree with the experimental data

Keywords: magnetic straintronics, anisotropic magnetoresistive effect, theory of micromagnetism, magnetoresistive nanostructure

For citation: D.A. Zhukov, P.A. Polyakov, V.V. Amelichev, S.I. Kasatkin, O.P. Polyakov, D.V. Kostyuk. Theoretical model of the process of magnetization reversal of a magnetoresistive nanostructure of magnetic straintronics. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 2. PP. 96-102. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.2.96.102>.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная стрейнтроника является активно развивающимся научным направлением нанoeлектроники и спинтроники, объединяя в себе физические явления, связь между которыми осуществляется через механическую деформацию. Главным образом, это разработка элементов механического напряжения и давления на основе деформаций в магнитных наноструктурах, например, на основе прямого и обратного магнитострикционного эффекта в ферромагнитных пленках. Одним из направлений магнитной стрейнтроники, который представляет научный интерес, является применение анизотропных магниторезистивных (АМР), спин-вентильных магниторезистивных наноструктур и спинтуннельных магниторезистивных переходов в комбинации с магнитострикционными пленками, что позволяет создать новый тип преобразователей механического напряжения с расширенными функциональными возможностями.

Для более глубокого анализа физических процессов, происходящих в наноструктурах магнитной стрейнтроники, проведена разработка теоретической модели процесса перемагничивания магниторезистивной наноструктуры с магнитострикционным эффектом.

ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДОВАННОЙ НАНОСТРУКТУРЫ

На экспериментальной установке двухзондовым методом проведено исследование магнитострикционной наноструктуры на основе АМР-эффекта следующего состава и соотношения тонкопленочных слоев: Ta (5 нм) / FeNiCo (20 нм) / CoFe (10 нм) / Ta (5 нм). Данная структура формировалась на кремневой подложке методом магнетронного напыления.

Слой CoFe обладает повышенной магнитострикцией, при деформации которого может возникать магнитоупругая энергия, сравнимая с энергией наведенной одноосной анизотропии. Величина

плотности магнитоупругой энергии для изотропного вещества определяется выражением [1]:

$$w_{\sigma} = \pm \frac{3}{2} \sigma \lambda \sin^2 \phi, \quad (1)$$

где σ – приложенное механическое напряжение, λ – магнитострикционная константа, знак плюс соответствует деформации растяжения, а минус – деформации сжатия. Вектор намагниченности \vec{M}_1 магнитострикционного слоя CoFe связан сильным обменным взаимодействием с намагниченностью \vec{M}_2 магниторезистивного слоя FeNiCo, обладающего АМР-эффектом [2]:

$$R = R_{\perp} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \cos^2 \phi\right), \quad (2)$$

где ϕ – угол между векторами плотности тока \vec{J} и вектором намагниченности \vec{M}_2 в полоске, R_{\perp} – сопротивление полоски в направлении, перпен-

дикулярном вектору \vec{J} , $\Delta\rho/\rho$ – коэффициент АМР-эффекта.

Экспериментальное исследование образцов наноструктур проведено на разработанной экспериментальной установке [3, 4]. Измерение АМР-эффекта проводилось двухзондовым методом – установка имеет в своей конструкции устройство для создания контролируемых механических деформаций в поверхностном слое образца. Образец размером $3,8 \times 19,8 \times 0,46$ мм³ подвергался механической деформации различной величины и воздействию внешнего магнитного поля с напряженностью H_0 , источником которого являлась пара магнитных катушек Гельмгольца.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ОБРАЗЦА

При теоретическом моделировании процесса квазистационарного перемагничивания образца полагаем, что пластина намагничена однородно и под действием напряженности



внешнего магнитного поля H_0 вектора намагниченности магнитных слоев \vec{M}_1 и \vec{M}_2 изменяют ориентацию в плоскости пленки, отклоняясь от оси на угол ϕ . Толщина магнитоотрицательного слоя h_1 , магниторезистивного – h_2 . Ось легкого намагничивания (ОЛН) направлена вдоль длинной стороны пластины (вдоль оси X), как показано на рис.1.

Под воздействием механической нагрузки в образце возникает деформация, которая приводит к возникновению в магнитоотрицательном слое (h_1) магнитоупругой энергии (1). Тогда суммарная объемная плотность магнитной энергии первого слоя примет вид:

$$w_1 = K_1 \sin^2 \phi \pm \frac{3}{2} \sigma \lambda_1 \sin^2 \phi - H_0 M_1 \cos \phi, \quad (3)$$

где K_1 – константа одноосной анизотропии в этом слое.

Плотность магнитной энергии АМР-слоя (h_2) равна:

$$w_2 = K_2 \sin^2 \phi - H_0 M_2 \cos \phi, \quad (4)$$

где K_2 – константа одноосной анизотропии второго магнитного слоя.

Для усредненной по толщине слоев объемной плотности двух магнитных слоев находим:

$$w = t_1 w_1 + t_2 w_2, \quad (5)$$

где

$$t_1 = \frac{h_1}{h_1 + h_2}, \quad t_2 = \frac{h_2}{h_1 + h_2}. \quad (6)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в (5), получим:

$$w = K_{ef} \sin^2 \phi - H_0 M_{ef} \cos \phi, \quad (7)$$

где K_{ef} – эффективная константа анизотропии, определяемая выражением:

$$K_{ef} = t_1 K_1 + t_2 K_2 \pm t_1 \frac{3}{2} \sigma \lambda_1, \quad (8)$$

M_{ef} – эффективная величина вектора намагниченности, равная:

$$M_{ef} = t_1 M_1 + t_2 M_2. \quad (9)$$

Введем константу поля эффективной анизотропии:

$$H_{an_{ef}} = \frac{2K_{ef}}{M_{ef}} = H_{an} \pm H_{\sigma}, \quad (10)$$

где H_{an} и H_{σ} – напряженности эквивалентных полей анизотропии и магнитоотрицательности:

$$H_{an} = 2 \frac{t_1 K_1 + t_2 K_2}{M_{ef}}, \quad (11)$$

$$H_{\sigma} = 2 t_1 \frac{3}{2 M_{ef}} \sigma \lambda_1. \quad (12)$$

Тогда выражение для плотности магнитной энергии можно представить в виде:

$$w = \frac{H_{an_{ef}} M_{ef}}{2} \sin^2 \phi - H_0 M_{ef} \cos \phi. \quad (13)$$

Если образец перемагничивается внешним магнитным полем перпендикулярно ОЛН, то во втором слагаемом в (13) следует угол ϕ заменить на $\pi/2 - \phi$, тогда зависимость плотности магнитной энергии от угла ϕ будет равна:

$$w = \frac{H_{an_{ef}} M_{ef}}{2} \sin^2 \phi - H_0 M_{ef} \sin \phi. \quad (14)$$

Равновесная ориентация вектора намагниченности, задаваемая углом ϕ (рис.1), при квазистатическом перемагничивании определяется минимумом функций (13) при продольном перемагничивании и (14) при перпендикулярном перемагничивании. Дифференцируя выражения (13) и (14) по переменной ϕ и приравнявая производные к нулю, получим следующие значения равновесных углов ϕ при заданном значении напряженности внешнего магнитного поля H_0 при условии $H_{an_{ef}} > 0$.

При воздействии поля H_0 вдоль ОЛН:

$$\phi = \pi (\cos \phi = -1) \text{ при изменении } H_0 \text{ от } -\infty \text{ до } H_{an_{ef}} \quad (15)$$

$$\phi = 0 (\cos \phi = 1) \text{ при изменении } H_0 \text{ от } \infty \text{ до } H_{an_{ef}} \quad (16)$$

При воздействии поля H_0 перпендикулярно ОЛН:

$$\phi = \frac{\pi}{2} (\cos \phi = -1) \text{ при изменении } H_0 \text{ от } \infty \text{ до } H_{an_{ef}} \text{ и от } H_{an_{ef}} \text{ до } \infty \quad (17)$$

$$\sin \phi = \frac{H_0}{H_{an_{ef}}} \text{ при изменении } H_0 \text{ от } H_{an_{ef}} \text{ до } -H_{an_{ef}} \text{ и от } -H_{an_{ef}} \text{ до } H_{an_{ef}} \quad (18)$$

$$\phi = -\frac{\pi}{2} (\cos \phi = 0) \text{ при изменении } H_0 \text{ от } -H_{an_{ef}} \text{ до } -\infty \text{ и от } -\infty \text{ до } -H_{an_{ef}} \quad (19)$$



Из приведенных решений следует, что при перемагничивании образца вдоль ОЛН (вдоль оси X на рис.1) $\cos^2 \phi = 1$ при любых значениях напряженности H_0 внешнего магнитного поля, кроме критической точки $H_0 = H_{anef}$. В этой точке происходит ориентационный фазовый переход и вектор намагниченности M_{ef} меняет свою ориентацию на угол π . Поэтому при однородном перемагничивании вдоль ОЛН магнитосопротивление, согласно формуле (2), не изменяется.

При перемагничивании перпендикулярно ОЛН (вдоль оси Y на рис.1) будет происходить изменение магнитосопротивления только в диапазоне:

$$-H_{anef} \leq H_0 \leq H_{anef}. \quad (20)$$

Согласно формуле (18) $\cos^2 \phi$ в диапазоне (20) будет изменяться по закону:

$$\cos^2 \phi = 1 - \left(\frac{H_0}{H_{anef}} \right)^2. \quad (21)$$

Подставляя выражение (21) в формулу (2), получим зависимость изменения АМР сопротивления от внешнего магнитного поля H_0 :

$$\frac{\Delta R}{R_{\perp}} = \frac{R - R_{\parallel}}{R_{\perp}} = - \frac{H_0^2}{H_{anef}^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} = -a H_0^2, \quad (22)$$

где

$$R_{\parallel} = R_{\perp} \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right), \quad (23)$$

сопротивление [5] при параллельных ориентациях вектора плотности тока и вектора намагниченности, а

$$a = \frac{1}{H_{anef}^2} \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad (24)$$

Из формулы (22) следует, что зависимость изменения магнитосопротивления квадратично зависит от внешнего поля, а график этой зависимости представляет собой перевернутую параболу, коэффициент которой определяется формулой (24).

При деформации растяжения образца эффективное поле анизотропии (10) увеличивается (знак плюс в формулах (8), (10)). Поэтому коэффициент параболической зависимости относительного изменения магнитосопротивления (22) уменьшится и график этой зависимости станет более пологим. При деформации сжатия, наоборот, H_{anef} уменьшается, коэффициент a увеличится и, следовательно, изменение магнитосопротивления (22) будет более резким.

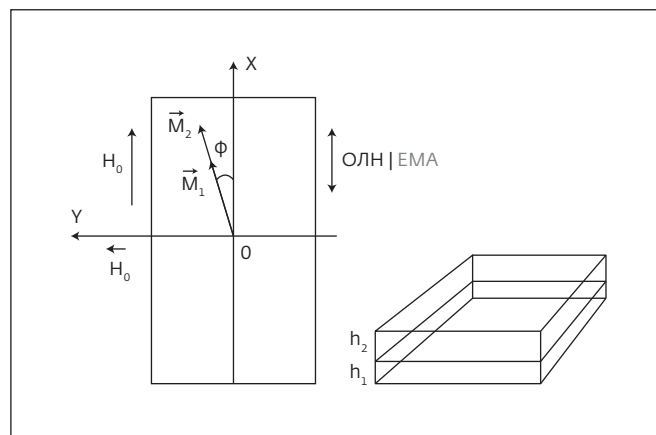


Рис.1. Геометрические и физические характеристики исследуемого образца

Fig.1. Geometrical and physical characteristics of the studied sample

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис.2 представлена экспериментальная зависимость относительного магнитосопротивления от величины поля H_0 при перпендикулярном перемагничивании образца в условиях различных механических напряжений сжатия σ при прямом и обратном изменении напряженности магнитного поля H_0 . По оси абсцисс отложены значения напряженности поля H_0 , по оси ординат относительное изменение АМР сопротивления $\Delta R/R_{\perp}$ в процентах в отсутствии деформации, при наличии механической деформации сжатия $\sigma = 30$ МПа, $\sigma = 65$ МПа.

Из приведенных экспериментальных результатов следует, что при изменении магнитного поля от -50 до $+50$ Э (прямой ход) и от $+50$ до -50 Э (обратный ход) зависимости изменения $\Delta R/R_{\perp}$ смещены относительно друг друга, то есть наблюдается наличие коэрцитивности. Экспериментальные значения зависимости поля коэрцитивности H_c и максимального изменения относительного сопротивления $\Delta R/R$ от величины механического напряжения сжатия σ представлены в табл.1.

Графики зависимости на рис.2 могут быть аппроксимированы перевернутыми параболой не на всем диапазоне допустимых значений. При некотором отклонении от вершин графиков параболический ход зависимости нарушается, причем кривизна петли меняет свой знак. Область параболичности сужается по мере увеличения механического напряжения в деформируемом образце.

Для количественного сравнения теоретических данных с приведенными экспериментальными результатами рассчитана величина эффективной напряженности магнитострикции H_c (12). Для этого использовались физические параметры



Таблица 1. Результаты исследования наноструктуры при перпендикулярном перемагничивании в условиях механической нагрузки

Table 1. Results of research of nanostructure at perpendicular remagnetisation under mechanical loading

Механическое напряжение Mechanical stress	Коэрцитивное поле (Hc), Э Coercive field	$\Delta R/R$, %
0 МПа МПа	2,6	1,73
Сжатие 30 МПа Compression, МПа	2,6	1,67
Сжатие 65 МПа Compression, МПа	2,9	1,55

слоя $Fe_{50}Co_{50}$ представленные в работе [1], согласно которой модуль Юнга данного материала равен $E = 200 \cdot 10^9$ Па, таким образом, механическое напряжение при деформации определяется относительным растяжением или сжатием слоя ε согласно закону Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (25)$$

На рис.3 изображен деформированный слой образца при его прогибе на величину $s=0,244$ мм. Длина пластины в недеформированном состоянии l_0 , в деформированном – l .

Толщина кремневой подложки h_0 много больше толщины магнитной структуры h и, согласно рис.3, изменение длины структуры составляет:

$$\Delta l = l_0 - l = (R + \frac{h_0}{2}) \cdot 2\alpha - R \cdot 2\alpha = h_0\alpha. \quad (26)$$

Из соотношений сторон треугольников с углами α на рис.3 следует:

$$R \cdot \sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\alpha = s. \quad (27)$$

Так как деформация мала и угол $\alpha \ll 1$ из (27) и (26), имеем

$$\alpha^2 = \frac{s}{R} = \frac{s \cdot 2\alpha}{l_0}. \quad (28)$$

В результате для относительной деформации слоя магнитной структуры определено:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2h_0 s}{l_0^2}. \quad (29)$$

Для образца, используемого в эксперименте при получении зависимости на рис. 2 $h_0 = 0,46$ мм,

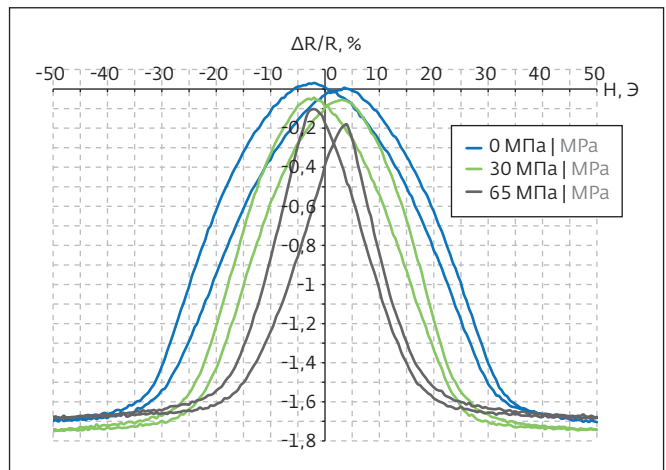


Рис.2. Зависимость АМР-эффекта при перпендикулярном перемагничивании в условиях наличия/отсутствия механической нагрузки

Fig.2. Dependence of the AMR effect during perpendicular remagnetisation in the presence/absence of mechanical load

$l_0 = 19,8$ мм, $s = 0,244$ мм, из (29) находим $\varepsilon = 5,6 \cdot 10^{-4}$. Тогда механическое напряжение в образце равно:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 2 \cdot 10^{11} \cdot 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ Па} = 112 \text{ МПа}. \quad (30)$$

Исследуемый экспериментальный образец состоит из двух магнитных слоев $CoFe$ толщиной $h_1 = 10$ нм с намагниченностью насыщения $M_1 = 1960$ Э [1] и $FeNiCo$ толщиной $h_2 = 20$ нм с намагниченностью насыщения $M_2 = 1050$ Э. Тогда средняя по толщине намагниченность, согласно (6) и (9), равна:

$$M_{ef} = \frac{1}{3}1960 + \frac{2}{3}1050 = 1353 \text{ Гс}. \quad (31)$$

На основе приведенного в работе [1] значения константы магнитострикции $\lambda_1 = 10^{-5}$ для эффективного поля напряжения H_σ из формулы (12) при механическом напряжении (30) получено:

$$H_\sigma = \tau_1 \frac{3}{M_{ef}} \sigma \lambda_1 = 8,3 \text{ Э}. \quad (32)$$

При деформации $s = 0,3 \cdot 0,244$ мм механическое напряжение $\sigma = 34$ МПа и согласно (32):

$$H_\sigma = 0,3 \cdot 8,3 = 2,5 \text{ Э}. \quad (33)$$

Используя теоретические формулы (22) и (24) для двух значений механических напряжений σ_1 , σ_2 и соответствующие им коэффициенты параболы (24) a_1 , a_2 определили:

$$\left(\frac{\Delta R}{R_\wedge}\right)_1 / \left(\frac{\Delta R}{R_\wedge}\right)_2 = \frac{a_1}{a_2} = \frac{1}{H_{anef_1}^2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_1 / \frac{1}{H_{anef_2}^2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_2. \quad (34)$$

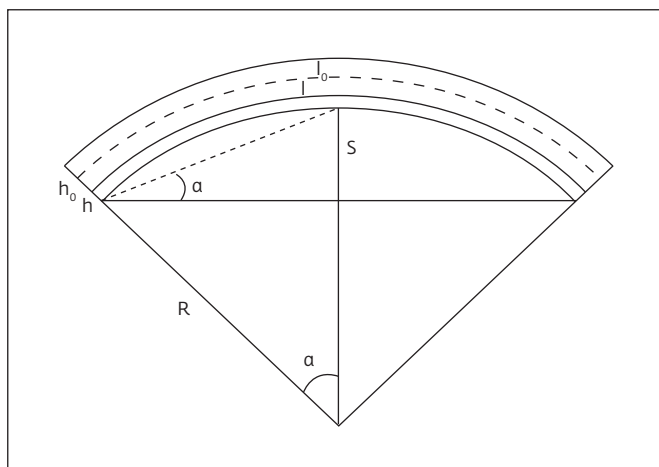


Рис.3. Схема деформации слоя
Fig.3. Layer deformation diagram

Полагая, что магниторезистивные константы в первом и втором случаях совпадают:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_2, \quad (35)$$

получим соотношение:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{H_{an_{ef2}}^2}{H_{an_{ef1}}^2} = \frac{(H_{an} - H_{\sigma})_2^2}{(H_{an} - H_{\sigma})_1^2}. \quad (36)$$

В частности, если в первом случае механическое напряжение отсутствовало, то есть $\sigma_1 = 0$ и, следовательно, $H_{\sigma_1} = 0$ из (36) получаем:

$$H_{an} = \frac{H_{\sigma_2}}{1 - \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}}. \quad (37)$$

Воспользовавшись экспериментальными данными, представленными на рис. 2 и рассчитав коэффициенты парабол a_1 при механическом напряжении $\sigma = 0$ и a_2 при механическом напряжении $\sigma = 30$ МПа для константы поля анизотропии, получим следующее значение:

$$H_{an} = 6,1 \text{ Э}. \quad (38)$$

Учитывая величину поля анизотропии, вычисляем механическое напряжение инверсии, при котором

$$H_{\sigma} = H_{an}. \quad (39)$$

Так как H_{σ} пропорционально σ согласно (32) для механического напряжения инверсии σ_1 согласно (30), (32) и (38) получим:

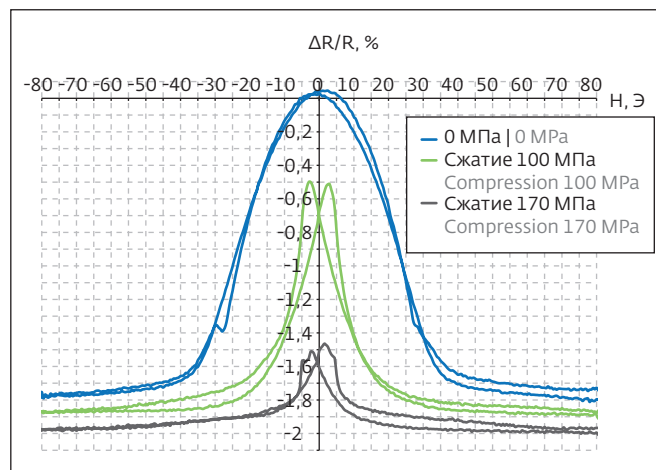


Рис.4. Изменение АМР-сопротивления при перемагничивании вдоль короткой стороны образца (вдоль ОЛН) для механического напряжения, превышающего механическое напряжение инверсии

Fig.4. Change in AMR resistance when remagnetised along the short side of the sample (along the EMA) for mechanical stress greater than mechanical inversion stress

$$\sigma_1 = \frac{6,1}{8,3} \cdot 112 = 82,3 \text{ МПа}. \quad (40)$$

Отметим, что при превышении механического напряжения инверсии $\sigma < \sigma_1$ константа поля эффективной анизотропии будет отрицательной $H_{an_{ef}} < 0$, что соответствует повороту ОЛН на 90° . То есть в образце направления осей легкого и трудного намагничивания меняются местами – ОЛН будет направлена вдоль короткой стороны прямоугольного образца (рис.1), а ось трудного намагничивания будет направлена вдоль длинной стороны образца.

В случае измерения относительного изменения магнитосопротивления при перемагничивании вдоль длинной стороны образца (рис.1), в условиях механических напряжений меньше механического напряжения инверсии (40) $\sigma < \sigma_1$, значительного изменения сопротивления не наблюдается, что согласуется с приведенной теорией.

При перемагничивании перпендикулярно ОЛН (вдоль короткой стороны образца на рис.1) для механических напряжений меньше механических напряжений инверсии наблюдается изменение магнитосопротивления, которое в первом приближении соответствует параболическому закону изменения (рис.2).

На рис.4 приведены экспериментальные данные изменения магнитосопротивления образца при механическом напряжении больше механического напряжения инверсии при перемагничивании вдоль короткой стороны (рис.1). В этом случае ОЛН направлена вдоль короткой стороны и изменение

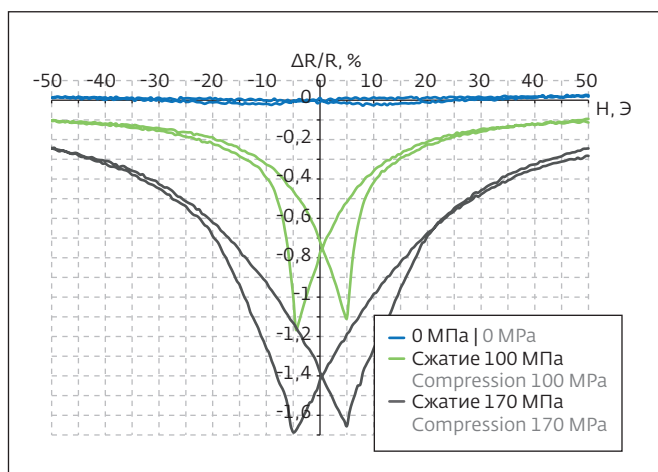


Рис.5. Изменение АМР-сопротивления при перемагничивании вдоль длинной стороны образца (перпендикулярно ОЛН) для механических напряжений, превышающих механическое напряжение инверсии

Fig.5. Change in AMR resistance during remagnetisation along the long side of the sample (perpendicular to the EMA) for mechanical stresses greater than the mechanical stress of inversion

магнитосопротивления, согласно представленной выше теории, не происходит. Предварительно, экспериментальные данные должны быть близки к данным, когда перемагничивание происходит вдоль ОЛН и механические напряжения меньше механического напряжения инверсии. Однако, как видно из рис.4, в этом случае при $\sigma=100$ МПа и 170 МПа, изменение магнитосопротивления отличается от параболического закона.

На рис.5 представлены экспериментальные данные изменения магнитосопротивления образца при механическом напряжении больше механического напряжения инверсии при перемагничивании вдоль длинной стороны (рис.1). Так как ОЛН направлена вдоль короткой стороны, изменение магнитосопротивления, согласно представленной выше теории, имеет параболический вид (22) в диапазоне от $-H_{\text{анг}} < H_0 < H_{\text{анг}}$, при этом ветви параболы направлены вверх. За пределами этого диапазона магнитосопротивление изменяется и имеет максимальную величину. Экспериментальные данные на рис.5 качественно соответствуют теории, но количественно график при механическом напряжении $\sigma=100$ МПа и 170 МПа существенно отличается на большей части значения поля H_0 и может быть аппроксимирован параболой только в узкой области вблизи минимума. В отсутствии механического напряжения ОЛН направлена вдоль длинной стороны прямоугольного образца и при изменении внешнего магнитного поля вдоль этого направления магнитосопротивление существенно не

меняется, что полностью соответствует выводам рассмотренной теории.

ВЫВОДЫ

Разработанная теоретическая модель позволяет качественно описать процесс перемагничивания магнитострикционной наноструктуры, что соответствует полученным экспериментальным данным и в ряде случаев дает соответствующие количественные результаты. Однако, при больших механических напряжениях, особенно при значениях превышающих механическое напряжение инверсии, график зависимости изменения магнитосопротивления от напряженности перемагничивающего магнитного поля существенно отличается от параболического закона. Это обстоятельство требует дополнительного экспериментального и теоретического исследования и, возможно, связано с возникновением неоднородного перемагничивания образца.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передаче их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Lohndorf M., Duenas T., Tewes M., Quandt E. et al. Highly sensitive strain sensors based on magnetic tunneling junctions // Applied Physics Letters. 2002. V. 81, no. 2. PP. 313–315.
2. Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электронинформ, 2005, 168 с.
3. Zhukov D., Amelichev V., Kasatkin S., Kostyuk D. Investigation of Multilayer Nanostructures of Magnetic Straintronics Based on the Anisotropic Magneto-resistive Effect. Sensors 2021, 21, 5785. <https://doi.org/10.3390/s21175785>
4. Жуков Д.А., Крикунов А.И., Амеличев В.В. и др. Магнитострикционные свойства периодических наноструктур на основе CoFe/FeNiCo // Известия РАН. Серия Физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1550–1553. <https://doi.org/10.31857/S0367676521110399>
5. Вагин Д.В., Герасименко Т.Н., Поляков П.А. Точное аналитическое выражение для индукции магнитного поля образца прямоугольной формы // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2008. № 6. С. 20

14
АПРЕЛЯ

XXVII Международный форум МАС – 2023 «Цифровая трансформация во благо человека»



Уважаемые коллеги!



Приглашаем Вас на XXVII Международный форум МАС – 2023 «Цифровая трансформация во благо человека», который будет проходить в рамках деловой программы «Российской недели высоких технологий-2023» в ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР» 14 апреля 2023 г. с 11.00 до 17.00 в павильоне №8, в конференц-зале.

Форум МАС`2023 направлен на объединение усилий, обмен знаниями и практическим опытом, развитие творческих связей и делового сотрудничества в сфере инфокоммуникаций между представителями регулятора, профильных организаций и предприятий, операторов связи.

Главная цель Форума МАС`2023 - обсудить теорию и практику цифровой трансформации во благо человека путем интеграции представителей науки, образования, производства, бизнеса, заинтересованных органов власти различных уровней, операторов связи, СМИ.

В работе Форума примут участие академики МАС, представители государственных структур и ведомств, Регионального содружества в области связи, Правительства Москвы, профессиональных общественных объединений, ученые научно-исследовательских и образовательных учреждений, руководители и специалисты операторов связи, разработчики и провайдеры телекоммуникационных решений и информационных систем.

Планируется обсудить следующие вопросы:

1. Цифровые технологии – ключ к своевременному предоставлению новых услуг электросвязи/ИКТ.
2. Практика инфокоммуникаций в области госуправления, образования, телемедицины, транспорта, энергетики, промышленной автоматизации, создания «умных» домов, регионов и городов.
3. Технологический переход к инфокоммуникациям для людей: AI/ML, BigData, 5G, 6G, 7G, IoT/IIoT, квантовые технологии, «зеленые» коммуникации, технологии самоорганизации, всепроникающий интернет.
4. Развитие инфокоммуникаций как базиса цифровой экономики в интересах всех групп населения, информационная безопасность. Механизмы национального формирования информационного пространства, которые обеспечат лидерство в освещении актуальных событий, высокое качество контента для ограничения иностранного влияния в российском информационном пространстве.
5. Разработка российских норм, стандартов, компонентов базы, программного обеспечения и других продуктов импортозамещения.
6. Арктика: устойчивое развитие.
7. Формирование технической политики и концепций развития инфокоммуникаций для людей.
8. Развитие цифровой метрологии и использование российских средств измерения, контроля и управления для сетей связи.
9. Вклад МАС во исполнение Указа Президента России «Об объявлении в Российской Федерации «Десятилетия науки и технологий» № 231 от 25 апреля 2022 г.: реализация программы издания ИНФОКОМ «Труды Международной академии связи» с привлечением молодежи до 35 лет, а также специалистов государственных, научных, образовательных, некоммерческих и других организаций.
10. Молодежный конкурс МАС «Молодежный конкурс инноваций, инновационных проектов в области технических, социально-экономических вопросов и неравенства (в области телекоммуникаций, почтовой связи и радиотехники): «Новое поколение» - 2022/2023.
11. Цифровая трансформация национальной системы квалификаций в области телекоммуникаций, почтовой связи и радиотехники.

От имени Международной академии связи приглашаем Вас и Ваших коллег принять участие в работе Форума МАС`2023 и выступить с докладом или приветствием. В целях формирования программы Форума следует направить тему и аннотацию доклада в секретариат МАС не позднее **15 марта 2023 г.**

Доклады публикуются в трудах Форума МАС. По итогам Форума принимается решение, которое будет направлено в директивные и регуляторные органы.