

УДК 621.318.1, 53.6

МОДЕЛЬ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНОЙ СТРЕЙНТРОНИКИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ МАГНИТНЫХ НАНОСТРУКТУР

Д.А. Жуков

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, стр. 7
E-mail: D.Zhukov@tcen.ru

О.П. Поляков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, г. Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: physster@gmail.com

П.А. Поляков

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, стр. 7
E-mail: polyakovpa@mail.ru

С.И. Касаткин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, г. Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: serkasat@ipu.ru

В.В. Амеличев

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, стр. 7
E-mail: V.Amelichev@tcen.ru

Д.В. Костюк

Научно-производственный комплекс «Технологический центр»
Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, стр. 7
E-mail: D.Kostyuk@tcen.ru

Ключевые слова: магниторезистивный эффект, магнитная стрейнтроника, наноструктура, теория микромагнетизма.

Аннотация: Представлено сравнение экспериментальных исследований и разработанной математической модели перемагничивания элемента магнитной стрейнтроники на основе тонкопленочной многослойной наноструктуры Ta / FeNiCo / Co₅₀Fe₅₀ / Ta, сформированной на окисленной кремниевой подложке. Подтверждено совпадение теоретических данных с экспериментальными результатами для наноструктуры с осью легкой намагниченности под углом 45° в условиях механического сжатия наноструктуры, обладающей анизотропным магниторезистивным эффектом.

Магнитная стрейнотроника является одним из перспективных направлений стрейнотроники [1, 2]. Главным образом, это разработка элементов механического напряжения и давления на основе различных физических напряжений в магнитных наноструктурах, в т.ч. на основе прямого и обратного магнитострикционного эффекта в ферромагнитных пленках. В настоящее время активно развиваются чувствительные элементы механического напряжения и давления с гибридными наноструктурами, объединяющими различные эффекты в одном устройстве.

Одним из актуальных направлений магнитной стрейнотроники является применение анизотропных магниторезистивных (АМР), спин-вентильных магниторезистивных (СВМР) наноструктур и спин-туннельных магниторезистивных (СТМР) переходов в комбинации с МС пленками, что позволяет создать новый тип преобразователей напряжения и давления с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями [2-4].

Проведено исследование АМР чувствительного элемента магнитной стрейнотроники, представляющего собой прямоугольную полосу, состоящую из напыленных на окисленную Si подложку гибридную наноструктуру из магниторезистивного (МР) и магнитострикционного (МС) нанослоев Ta (5 нм) / FeNiCo (20 нм) / CoFe (10 нм) / Ta (5 нм). Слой CoFe обладает большой магнитострикцией, при деформации которого может возникать магнитоупругая энергия сравнимая с энергией наведенной одноосной анизотропии. Намагниченность \vec{M}_1 этого МС слоя связана сильным обменным взаимодействием с намагниченностью \vec{M}_2 МР слоя FeNiCo, обладающего АМР эффектом. Ось легкого намагничивания (ОЛН) развернута на 45° относительно сторон полосы.

При описании теории процесса квазистационарного перемагничивания магнитных слоев элемента основывались из модели когерентного однородного синхронного вращения векторов намагниченности магнитных слоев \vec{M}_1 и \vec{M}_2 под действием внешнего магнитного поля H_0 , направления векторов намагниченности совпадают и обозначены как \vec{M} . Под воздействием механической нагрузки в образце возникает деформация сжатия, которая приводит к возникновению в МС (слой 1) магнитоупругой энергии. На рис. 1 представлены графики зависимости углов $\cos^2\varphi$, где φ – угол между векторами плотности тока \vec{j} и вектором \vec{M} в полоске для устойчивых равновесных ориентаций вектора \vec{M} от безразмерной проекции напряженности внешнего магнитного поля h_x .

Из полученных теоретических результатов следует, что при перемагничивании ферромагнитных слоев внешним магнитным полем, составляющим с ОЛН угол $\beta = \pi/4$, происходит изменение равновесной ориентации вектора намагниченности \vec{M} . Возможны две устойчивые ориентации вектора \vec{M} . Для перехода из одного устойчивого состояния в другое требуется преодоления потенциального барьера, величина которого для решения с меньшей величиной $\cos^2\varphi$ уменьшается при приближении параметра h_x к значениям

$$(1) \quad h_x = \pm \frac{1}{2}.$$

При достижении критической точки данное состояние намагниченности становится неустойчивым и спонтанно переходит к другой устойчивой ориентации вектора намагниченности \vec{M} . В реальности, при наличии тепловых флуктуаций и других случайных воздействий переход из одного состояния в другое может происходить и при меньших значениях параметра h_x , когда

$$(2) \quad |h_x| < \frac{1}{2}.$$

Следовательно, определение критического значения поля H_x , при котором угол достигает минимального значения, позволит определить константу поля анизотропии H_{an} . В реальности, в силу сделанного выше замечания, спонтанное изменение ориентации состояния намагниченности может произойти при меньших значениях H_x . Поэтому данным методом возможно провести только приблизительную оценку величины H_{an} .

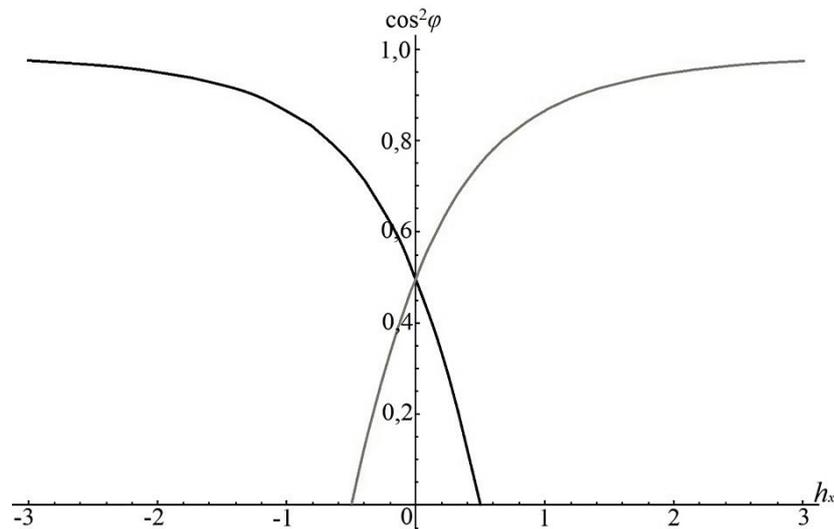


Рис. 1. Зависимость $\cos^2\varphi$ для устойчивых равновесных ориентаций вектора \vec{M} от безразмерной проекции напряженности внешнего магнитного поля h_x

На рис. 2а представлены результаты экспериментального измерения относительного изменения МР сопротивления элемента при изменении напряженности магнитного поля H_x вдоль оси X от 250 Э до -250 Э и обратно от -250 Э до 250 Э.

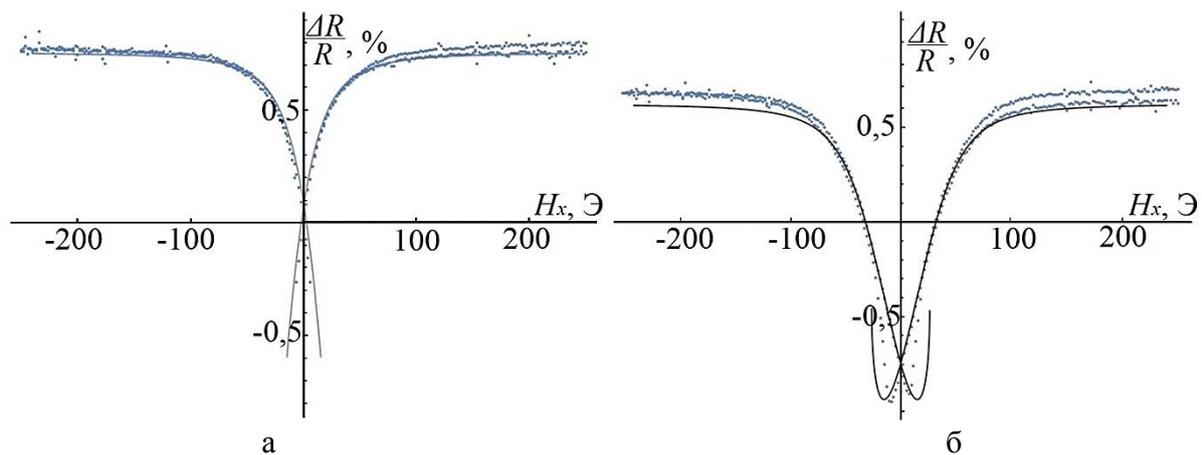


Рис. 2. Экспериментальная (точки) и теоретическая (сплошная линия) зависимости относительного магнитосопротивления от напряженности магнитного поля: (а) в отсутствии механического напряжения, (б) для механического напряжения $\sigma = 100$ МПа.

Из графика видно, что экспериментальные точки при прямом и обратном изменении магнитного поля практически совпадают, хотя при больших значениях полей имеется небольшое отличие.

Экспериментальное значение относительного магнитосопротивления может отличаться от теоретической формулы, так как угол может не достигнуть своего минимального значения равного нулю при $H_x = \pm H_{an}$ вследствие перехода состояния намагниченности в более устойчивое состояние при меньших значениях H_x . Кроме этого сопротивление $R(0)$ в отсутствие магнитного поля может отличаться от идеального, когда вектор намагниченности во всех областях образца направлен вдоль ОЛН, так как в образце может возникнуть магнитные неоднородности (домены) и, следовательно, $R(0)$ изменится и график на рис. 2а сместится вдоль оси ординат. Кроме того, при измерении происходит нагрев образца и, следовательно, увеличение сопротивления, что также может привести к эффективному изменению МР константы $\Delta\rho/\rho$ [5]. Поэтому экспериментальное значение относительного изменения магнитосопротивления элемента следует аппроксимировать эмпирической формулой:

$$(3) \quad \frac{\Delta R}{R} = a \cos^2 \varphi - b,$$

где константы a и b получены из полученных экспериментальных значений.

При преобразовании (3), получено следующая зависимость магнитосопротивления от внешнего магнитного поля:

$$(4) \quad \frac{\Delta R}{R} = F(a, b, \frac{H_x}{H_{an}}),$$

где

$$(5) \quad F(a, b, \frac{H_x}{H_{an}}) = a \left[1 - \left(-\frac{H_x}{2H_{an}} \pm \sqrt{\left(\frac{H_x}{2H_{an}}\right)^2 + \frac{1}{2}} \right)^2 \right] - b.$$

Для определения неизвестных параметров a , b , H_{an} использовалось условие наилучшего квадратичного приближения теоретической формулы (5) с экспериментальными значениями, представленными на рис. 2а. Для этого выбраны экспериментальные точки в диапазоне $0 \leq H_x \leq 250$ Э и найдены значения a , b , H_{an} , минимизирующие квадратичный функционал:

$$(6) \quad \sum_{i=1}^{250} \left(\frac{\Delta R}{R}(H_{xi}) - F(a, b, \frac{H_{xi}}{H_{an}}) \right)^2 = \min.$$

Согласно экспериментальным значениям, представленным на рис. 2а, минимум функционала достигается при:

$$a = 1,3535; b = 0,5943; H_{an} = 29,9 \text{ Э}.$$

На рис. 2а для данных значений параметров в соответствии с формулами (4) и (5) построена теоретическая зависимость (сплошная линия). Демонстрируется высокое совпадение теоретической кривой и экспериментальных значений. Также отметим, что наименьшее экспериментальное значение магнитосопротивления достигается при значении напряженности магнитного поля порядка 6 Э, что более чем в 2 раза меньше теоретического значения $\frac{H_{an}}{2} = 15$ Э. Это указывает на то, что инверсия магнитного состояния (ориентационный фазовый переход) происходит при магнитных полях более чем в 2 раза большего критического значения.

Исследовано влияние механического напряжения на величину МР эффекта элемента, определяемого безразмерным параметром h_σ . В рамках развиваемой теории сопротивление элемента пропорционально $1 - \sin^2 \varphi$. Уравнение относительно $\sin \varphi$ представлено в виде полинома четвертой степени:

$$(7) \quad \sin^4 \varphi + 2 \frac{h_x}{1+h_\sigma^2} \sin^3 \varphi + \frac{h_x^2 - 1 - h_\sigma^2}{1+h_\sigma^2} \sin^2 \varphi - \frac{h_x}{1+h_\sigma^2} \sin \varphi + \frac{1}{4(1+h_\sigma^2)} = 0.$$

Это уравнение имеет четыре аналитических решения:

$$(8) \quad \begin{aligned} \sin \varphi_1 &= f1(h_x, h_\sigma), \quad \sin \varphi_2 = f2(h_x, h_\sigma), \\ \sin \varphi_3 &= f3(h_x, h_\sigma), \quad \sin \varphi_4 = f4(h_x, h_\sigma). \end{aligned}$$

Функции $f1(h_x, h_\sigma)$ и $f4(h_x, h_\sigma)$ соответствуют минимуму магнитной энергии, а другие два решения – максимуму.

Для аппроксимации экспериментальных значений зависимости магнитосопротивления от величины напряженности магнитного поля H_x использовались следующие теоретические функции:

$$(9) \quad F1(a, b, \frac{H_x}{H_{an}}, h_\sigma) = a \left[1 - \left(f1\left(\frac{H_x}{H_{an}}, h_\sigma\right) \right)^2 \right] - b,$$

$$(10) \quad F4(a, b, \frac{H_x}{H_{an}}, h_\sigma) = a \left[1 - \left(f4\left(\frac{H_x}{H_{an}}, h_\sigma\right) \right)^2 \right] - b.$$

Константа эффективного поля одноосной анизотропии считалась независимой от механического напряжения и равной значению $H_{an} = 30$ Э, найденному по результатам экспериментальных значений в отсутствии механического напряжения (7).

Для определения неизвестных параметров a , b , h_σ использовалось условие наилучшего квадратичного приближения теоретических формул (9) и (10) с экспериментальными значениями. Для этого выбрали экспериментальные точки относительного магнитосопротивления в диапазоне $0 \leq H_x \leq 250$ Э и определили значения a , b , h_σ , минимизирующие квадратичный функционал:

$$(11) \quad \sum_{i=1}^{250} \left(\frac{\Delta R}{R}(H_{xi}, h_\sigma) - F4(a, b, \frac{H_x}{H_{an}}, h_\sigma) \right)^2 = \min.$$

В итоге, были рассчитаны параметры для случая напряжения сжатия $\sigma = 30, 65$ и 100 МПа. При напряжении сжатия $\sigma = 100$ МПа значения параметров составили:

$$a = 1,582; b = 0,937; h_\sigma = 1,157.$$

Соответствующая теоретическая кривая, построенная по функциям (9), (10) – сплошная линия, представлена на рис. 2б. Продемонстрировано высокое совпадение теоретической и экспериментальной (точки) кривых.

Таким образом, анализ работоспособности чувствительного элемента стрейнтроники по предложенной модели с ОЛН под 45° подтвердил совпадение с экспериментальными результатами.

Список литературы

1. Жуков Д.А., Поляков П.А., Амеличев В.В., Касаткин С.И., Поляков О.П., Костюк Д.В. Теоретическая модель процесса перемагничивания магниторезистивной наноструктуры магнитной стрейнтроники // Наноиндустрия. 2023. Т. 16, № 2. С. 96-102.
2. Fuji Y., Nara M., Higashi Y., Kaji S., Masunishi K., Nagata T., Yuzawa A., Otsu K., Okamoto K., Baba S., Ono T., Hori A., Fukuzawa H. An ultrasensitive spintronic strain-gauge sensor and a spin-MEMS microphone // Electron Comm Jpn. 2019. No 102. P. 48-54.
3. Zhukov D., Amelichev V., Kasatkin S., Kostyuk D. Investigation of Multilayer Nanostructures of Magnetic Straintronics Based on the Anisotropic Magnetoresistive Effect // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 5785.
4. Жуков Д.А., Крикунов А.И., Амеличев В.В., Костюк Д.В., Касаткин С.И. Магнитострикционные наноструктуры с гигантским магниторезистивным эффектом для устройств магнитной стрейнтроники // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 5. С. 730-732.
5. Касаткин С.И., Васильев Н.П., Муравьев А.М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе. М.: Электронинформ, 2005. 168 с.