

Магнитосопротивление и поляризация спинов электронов в наноструктуре $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ при работе на постоянном токе

А. Ф. Андреева, А. М. Касумов, В. В. Гавриленко

Для наноструктуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ определена зависимость поперечного сопротивления, магнитосопротивления и поляризации спинов электронов от величины тока, возбуждающего постоянное магнитное поле в слоях ферромагнетика, а также от толщины диэлектрической прослойки Y_2O_3 . Показано, что в условиях, обеспечивающих локальное воздействие магнитного поля на слои Fe_3O_4 , в них может быть достигнута значительная поляризация спинов электронов (до 91%) и соответствующее магнитосопротивление структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ (до 483%).

Введение

Магнетит Fe_3O_4 известен как полуметалл, обладающий электронами с высокой степенью поляризации спинов, благодаря чему он может быть использован для изготовления устройств, основанных на спин-зависимом переносе заряда, таких как датчики магнитного поля, считывающие головки, элементы памяти с высокой плотностью записи [1]. Эффективность работы таких устройств повышается с ростом уровня достигаемой поляризации спинов. В работе [2] сообщается о получении значительной поляризации 84% в контактах Fe_3O_4 , что уже близко к максимально возможному в магнетите значению 100%.

В настоящей работе использована возможность дальнейшего повышения уровня поляризации спинов в пленках Fe_3O_4 локальным воздействием постоянного магнитного поля. Оценена также величина магнитосопротивления, достигаемая при этом в туннельной наноструктуре $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$, и ее зависимость от толщины прослойки Y_2O_3 .

Экспериментальная часть

Величину поляризации спинов и магнитосопротивление определяли по методике работы [3] в туннельной наноструктуре, состоящей из двух одинаковых слоев ферромагнетика Fe_3O_4 , которые разделены тонкой диэлектрической прослойкой Y_2O_3 . В такой структуре сопротивление туннельному переходу зарядов между слоями ферромагнетика зависит от взаимной ориентации в них векторов спиновой поляризации и может регулироваться внешним магнитным полем, влияющим на направление спинов. Измеряя сопротивление перехода при параллельном и антипараллельном направлениях спинов в слоях ферромагнетика, можно по формулам Джуллиере (Julliere) определить величину поляризации спинов в слоях Fe_3O_4 и магнитосопротивление структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$.

На рис. 1 представлена схема измерения поперечного сопротивления структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ на постоянном токе. Структура 2—4 заключена между двумя медными пленочными электродами 1, 5, по которым проходит постоянный ток, возбуждаемый источниками постоян-

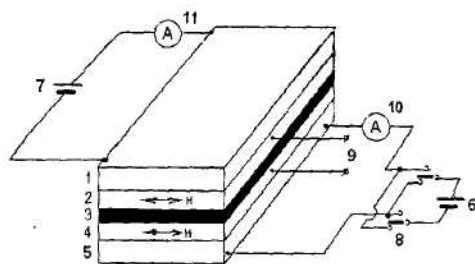


Рис. 1. Схема измерения поперечного сопротивления наноструктуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$: 1, 5 — Cu -электроды; 2, 4 — слои Fe_3O_4 ; 3 — прослойка Y_2O_3 ; 6, 7 — источники постоянного напряжения; 8 — переключатель; 9 — омметр; 10, 11 — амперметры.

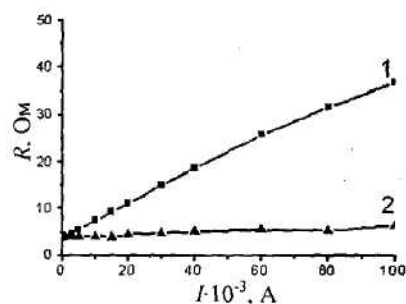


Рис. 2. Зависимость поперечного сопротивления $R_{\uparrow\uparrow}$ (1) и $R_{\uparrow\downarrow}$ (2) структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3$ (95 нм) — Fe_3O_4 от величины возбуждающего тока, текущего по Cu -электродам.

ного напряжения 6, 7. Переключатель 8 позволяет пропускать ток через верхний и нижний Cu -электроды либо в одинаковых, либо в противоположных направлениях. Проходящий по Cu -электродам ток возбуждает в прилегающих к ним слоях Fe_3O_4 поперечное магнитное поле соответственно с антипараллельным и параллельным направлениями векторов напряженности. Омметр 9 измеряет поперечное сопротивление структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ при параллельной R^{\wedge} и антипараллельной R^{\vee} поляризации спинов, устанавливаемой в слоях Fe_3O_4 магнитным полем. Полученные значения $R_{\uparrow\uparrow}$ и $R_{\uparrow\downarrow}$ использовали для определения магнитосопротивления MR и поляризации спинов P .

Многослойную структуру наносили на стеклянную подложку методом электронно-лучевого испарения металлов. Для образования оксидных слоев напыление Fe и Y производили в присутствии кислорода. На основании исследований, проведенных ранее [4], установлено, что пленки Fe_3O_4 и Y_2O_3 стехиометрического состава образуются при следующих условиях напыления: парциальное давление кислорода — $2 \cdot 10^{-3}$ Па, скорость роста слоев Fe_3O_4 — 5—50 нм/мин и Y_2O_3 — 2—70 нм/мин, температура подложки — 20—50 °С. При таких условиях пленки Fe_3O_4 являлись поликристаллическими, а пленки Y_2O_3 — аморфными.

Длина и ширина структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ равна соответственно 1 и 0,1 см, толщина слоев Cu — 150 нм, Fe_3O_4 — 150 нм, Y_2O_3 — варьировалась в пределах 3—100 нм.

На рис. 2 приведена зависимость сопротивления $R_{\uparrow\uparrow}$ (1) и $R_{\uparrow\downarrow}$ (2) структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ от величины возбуждающего тока, протекающего в Cu -электродах. Величина тока в верхнем и нижнем Cu -электродах одинакова. Как видно на данном рисунке, с ростом величины возбуждающего тока, а значит, и напряженности магнитного поля в слоях Fe_3O_4 возрастает сопротивление $R_{\uparrow\uparrow}$ и $R_{\uparrow\downarrow}$, причем $R_{\uparrow\uparrow}$ увеличивается быстрее, чем $R_{\uparrow\downarrow}$.

С ростом величины возбуждающего тока быстро возрастает и поляризация спинов в слоях Fe_3O_4 (рис. 3, а, кривая 1). Максимальная поляризация, достигаемая при токе 0,08 А, составляет 91%. При более

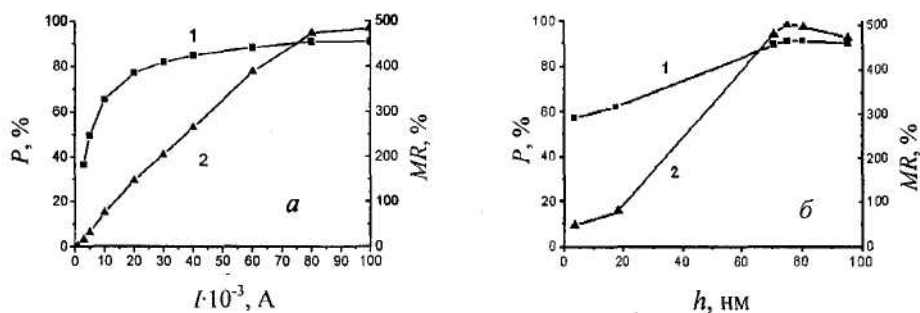


Рис. 3. Зависимость поляризации P (1) спинов электронов в слоях Fe_3O_4 и магнитосопротивления MR (2) структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ от величины возбуждающего тока / (а) и от толщины прослойки Y_2O_3 (б, $I = 0,1$ А).

высоком токе рост поляризации прекращается и свыше 0,15 А начинает уменьшаться.

Рост тока, возбуждающего магнитное поле в слоях Fe_3O_4 , приводит к увеличению магнитосопротивления структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ (рис. 3, а, кривая 2). Максимальная величина магнитосопротивления 483% наблюдается при токе 0,08 А, то есть в условиях достижения максимальной поляризации спинов в слоях Fe_3O_4 .

С ростом толщины прослойки Y_2O_3 в структуре $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ достигаемая в слоях Fe_3O_4 поляризация спинов электронов увеличивается. Рост поляризации прекращается при толщине прослойки более 75 нм (рис. 3, б, кривая 1). Магнитосопротивление структуры также возрастает, достигая предела при той же толщине прослойки (рис. 3, б, кривая 2).

Обсуждение результатов

Рост зависимости $P(I)$, показанный на рис. 3 (кривая 1), отражает процесс возрастающей ориентации спинов электронов в усиливаемом магнитном поле, порождаемом токами в Си-электродах. Максимальная поляризация спинов $P = 91\%$, полученная в слоях Fe_3O_4 структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$, близка к максимально возможной в магнетите величине $P = 100\%$. Достижение столь высокого значения в поликристаллических пленках Fe_3O_4 становится возможным благодаря применению магнитного поля, действующего локально на слои ферромагнетика. В случае повышения возбуждающего тока более 0,1 А, когда, предположительно, магнитное поле каждого Си-электрода начинает воздействовать сразу на оба слоя Fe_3O_4 , поляризация спинов быстро уменьшается.

Аналогичный эффект наблюдается, по-видимому, и при увеличении толщины прослойки Y_2O_3 в структуре $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$. Рост толщины диэлектрического слоя способствует лучшей локализации магнитных полей в слоях Fe_3O_4 и получению более высокой спиновой поляризации (рис. 3, б, кривая 1). При большой толщине прослойки Y_2O_3 (>75 нм) рост кривой $P(h)$ прекращается, то есть достигнутая величина $P = 91\%$ в данных условиях является предельной. При очень малой толщине Y_2O_3 (3 нм) и такой же величине возбуждающего тока 0,1 А P снижается до 57%, отражая взаимное влияние слоев Fe_3O_4 .

Рост поляризации спинов $P(I)$ приводит, согласно работе [3], к увеличению магнитосопротивления структуры $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$ (рис. 3, а, кривая 2). Значительная поляризация, полученная в слоях Fe_3O_4 , позволяет достичь при этом и большого магнитосопротивления (483%). О возможности получения магнитосопротивления 500% в наноконтактах Fe_3O_4 сообщается и в работе [5].

Так же, как для поляризации спинов, с увеличением толщины прослойки Y_2O_3 наблюдается рост и магнитосопротивления (рис. 3, б, кривая 2). При большой толщине прослойки (>75 нм) увеличение $MR(h)$ прекращается. При малой толщине Y_2O_3 (3 нм) величина MR снижается до 50%.

Выводы

В наноструктуре $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{—Y}_2\text{O}_3\text{—Fe}_3\text{O}_4$, работающей на постоянном токе, достигнута поляризация спинов электронов в слоях Fe_3O_4 , равная 91%, и соответствующее ей магнитосопротивление 483%. Значительная поляризация получена за счет приложения магнитного поля, локально действующего на каждый слой Fe_3O_4 .

С ростом толщины прослойки Y_2O_3 происходит увеличение поляризации спинов электронов в слоях Fe_3O_4 , что объясняется повышением локализации действующего на них магнитного поля.

1. *Sliuziene K.* Growth and investigation of magnetite thin films and heterostructures // Summary of Doctoral Dissertation. — Vilnius: Vilnius University, 2006.
2. *Preisler E. J., Brooke J., Oldham N. C., McGill T. C.* Pulsed laser deposition growth of Fe_3O_4 on III-V semiconductors for spin injection // J. Vac. Sci. Technol. — 2003. — **B21**, No. 4. — P. 1745—1748.
3. *Teresa J. M. de.* Magnetoresistance phenomena in magnetic materials and devices // European School on Magnetism: New Experimental Approaches in Magnetism. — Constanta, Romania: September 7—16, 2005. — <http://esm.neel.cnrs.fr/2005-constantina/abs/deteresa-abs.pdf>
4. *Андреева А. Ф., Касумов А. М., Двойненко О. К.* Свойства поликристаллических пленок магнетита Fe_3O_4 // Современные проблемы физического материаловедения. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2008. — Вып. 17. — С. 163—165.
5. *Switzer I. A., Sorenson T. A., Morton S. A., Waddill G. D.* Magnetic properties of Fe_3O_4 films grown by epitaxial electrodeposition on the low index planes of gold // <http://www.als.lbl.gov/als/compendium/AbstractManager/frontend/pagBeamLines2.php?BeamLineID=32>