ВЛИЯНИЕ ОБМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ НА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕННИЕ СПИНОВОГО ВЕНТИЛЯ

В. С. Сергеенко[1], А. Л. Данилюк[2]

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П.Бровки,6, 220013, г. Минск, Республика Беларусь,
[1)] e-mail: vsevolodars@mail.ru
[2)] e-mail: danilyuk@nano-center.org

В данной работе рассмотрены закономерности магнетосопротивления спиновых вентилей, содержащих антиферромагнитные слои. Проведенное моделирование показало, что эффект обменного смещения между антиферромагнитным и ферромагнитным слоями может приводить к росту величины магнитосопротивления почти в три раза.

Ключевые слова: магнитосопротивление; наноструктуры; спиновый вентиль; обменное смещение.

INFLUENCE OF BIASING EXCHANGE ON MAGNETIC RESISTANCE SPIN VALVE

V. S. Sergeenko[1], A. L. Danilyuk[2]

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovky str,6, 220013, Minsk, Belarus,
Corresponding author: A. L. Danilyuk (danilyuk@nano-center.org)

The magnetoresistance laws of spin valves, which contain antiferromagnetic layers, have been considered in this paper. The simulation showed that the effect of bias exchange between the antiferromagnetic and ferromagnetic layers could lead to an increase of the magnetoresistance by almost three times.

Key words: magnetoresistance; nanostructures; spin valve; exchange bias.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наноструктуры для спинтронных элементов, содержащих ферромагнитные и антиферромагнитные слои активно изучаются в ведущих научных центрах. Основными активными компонентами спинтронных элементов являются ферромагнетики. Их поведение широко изучено и подробно описанных в литературе. Существенные успехи достигнуты в технологии формирования наноразмерных спиновых вентилей, содержащих ферромагнитные слои, разделенные металлическими или диэлектрическими немагнитными прослойками с высокими структурное совершенством. Их электрические и структурные свойства, магнитосопротивление и эффект переноса спина при прохождении тока были детально изучены. Часть полученных результатов успешно внедрена в промышленности и используется при изготовлении датчиков магнитного поля и элементов памяти. В последнее время интерес проявляется и к другим магнитным материалам, таким как антиферромагнетики, которые рассматриваются как потенциальные носители информации [1]. С точки зре-

ния приложений у них есть преимущества над ферромагнетиками. Во-первых, высокая восприимчивость к внешним полям. Антиферромагнитные материалы имеют нулевую или малую намагниченность, это означает, что они не создают внешних магнитных полей и, как результат, слабо взаимодействуют друг с другом. Во-вторых, характерные частоты переключения между различными состояниями превышают аналогичные значения для типичных ферромагнитных материалов на несколько порядков [2]. Это означает возможность создания высокоскоростных устройств, работающих не в гигагерцах, а в терагерцовом диапазоне. Наконец, антиферромагнитный порядок в магнитных полупроводниках наблюдается гораздо чаще и в гораздо более мягких условиях, чем ферромагнитное упорядочение [3], что позволяет комбинировать в одном устройстве преимущества как электроники (производительность, простота управления) и спинтроника (высокая чувствительность, низкое энергопотребление). Однако антиферромагнитная спинтроника все еще находится в зачаточном состоянии. Целью настоящей работы является изучение особенностей магнитосопротивления спинового вентиля с антиферромагнитным фиксирующим слоем, с учетом влияния обменного смещения. Эффект обменного смещения, кроме температуры Нееля для антиферромагнетика, также характеризуется блокировкой температурой блокировки и значением сдвига петли (поле обменного смещения, H_{EB}).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе рассматривается модель магнитосопротивления спинового вентиля, содержащего фиксирующий антиферромагнитный слой, которая учитывает обменное смещение. Полная энергия системы спинового вентиля описывается уравнение [4]:

$$E_{TOT}\left(H\right) = -\mu_0 M_1 t_1 H cos\vartheta_1 - \mu_0 M_2 t_2 H cos\vartheta_2 - E_{ED} cos\vartheta_2 - J cos\left(\vartheta_1 - \vartheta_2\right). \quad (1)$$

Первые два члена представляют собой зеемановскую энергию магнитных слоев с намагниченностью M и толщиной t в магнитном поле H. Третий член соответствует энергии одноосной анизотропии E_{EB} в обменно-смещенном слое ферромагнетика, возникающий в результате обменного взаимодействия ферромагнетиков и антиферромагнетиков. Четвертый член учитывает обменную связь между ферромагнитными слоями через немагнитный слой с параметром обменной связи J. Направления векторов намагниченности ферромагнитных слоев M_1 и M_2 в зависимости от приложенного поля определяются путем минимизации полной энергии системы по отношению к углам ϑ_1 и ϑ_2.

$$\left(\frac{\partial E_{TOT}}{\partial \vartheta_1}\right)_{\vartheta_2, H} = 0, \qquad \left(\frac{\partial E_{TOT}}{\partial \vartheta_2}\right)_{\vartheta_1, H} = 0, \quad (2)$$

Чтобы упростить обозначение, введем теперь следующие безразмерные величины:

$$j = \frac{J}{E_{EB}}, \quad h = \frac{\mu_0 M_2 t_2 H}{E_{EB}} = \frac{H}{H_{EB}} \quad (3)$$

$$x = \frac{M_1 t_1}{M_2 t_2} = \frac{t_1}{t_2} \quad \left(M_1 = M_2\right). \quad (4)$$

Определенные наборы углов $\vartheta_1\left(h\right)$ и $\vartheta_2\left(h\right)$ удовлетворяют уравнениям (2). Решение для минимальной полной энергии, $\vartheta_{1,min}(h)$ и $\vartheta_{2,min}(h)$ можно найти, учтя все

возможные решения в уравнении (1). Величина магнетосопротивления может быть рассчитана как:

$$r(h)=1+\frac{1}{2}\left\{1-cos\left[\vartheta_{1,min}(h)-\vartheta_{2,min}(h)\right]\right\}. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

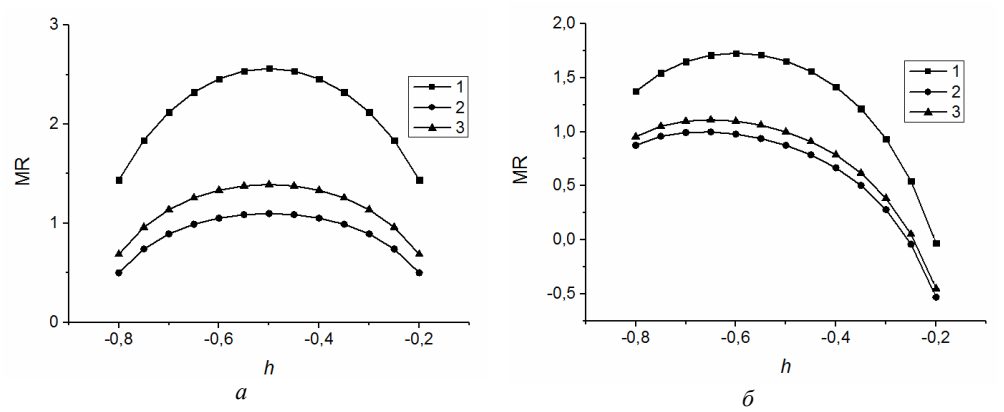

Рисунок 1. – (*а*) – Зависимости *r*(*h*) для *x* = 1 при изменении безразмерного параметра связи *j*: 1 – *j*=0.2; 2 – *j*=0.8; 3 – *j*=1. Критический параметр связи j_{crit} = 1/4. Максимум в магнитосопротивлении находится при *h* = -0.5.; (*б*) – зависимости *r*(*h*) для *x* = 4/3 при изменении *j*. Критический параметр связи j_{crit} = 0.287, максимум магнитосопротивления находится при *h* = - 0,427

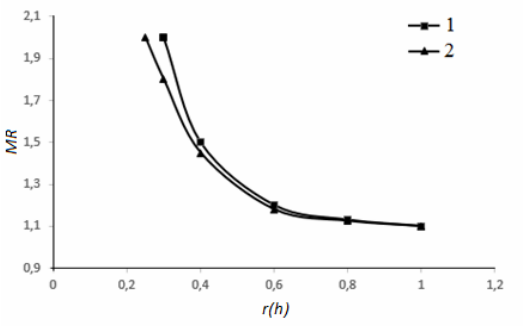

Рисунок 2. – Зависимости максимума магнитосопротивления для 1 - *x* = 1, 2 – *x* = ¾

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной работы было проведено исследование влияния межслойной обменной связи между ферромагнитными слоями на магниторезистивное поведение спинового вентиля с учетом эффекта обменного смещения между слоями ферромагнетиков и антиферромагнетиков. Проведенное моделирование магнитосопротивления спинового вентиля, содержащего антиферромагнитный фиксирующий слой, показано, что эффект обменного смещения, возникающий при контакте ферромагнитного и антиферромагнитного слоев с некоторыми комбинациями па-

раметров спинового вентиля, может приводить к увеличению магнитосопротивления почти в три раза из-за наличия поля обменного смещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Brataas, A. Current-induced torques in magnetic materials // A. Brataas, A.D.Kent, H.Ohno// Nature Mater. – 2012 – V. 11(5) – P.372-381
2. Máca, F. Room-temperature antiferromagnetism in CuMnAs / F.Máca, J.Mašek, O.Stelmakhovych et al.// Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2012 - V. 324 – P. 1606-1612.
3. Grzybowski, M.J. Imaging current-induced switching of antiferromagnetic domains in CuMnAs / M.J. Grzybowski, P.Wadley, K.W.Edmonds// Physical Review Letters - 2017 – V. 118(5) – P. 057701.
4. Rijks, Th.G.S.M. Interplay between exchange biasing and interlayer exchange coupling in $Ni_{80}Fe_{20}/Cu/Ni_{80}Fe_{20}/Fe_{50}Mn_{50}$ layered systems / Th.G.S.M.Rijks, R.Coehoorn, J.T.F.Daemen// Journal of Applied Physics – 1994 – V. 76(2) – P. 1092-1099.

СЕДИМЕНТАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ

А. А. Таболич[1], Н. В. Белько[1], А. А. Луговский[2], В. А. Пархоменко[1], Г. А. Гусаков[2]

[1)] Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: nastya.tabolich@mail.ru

[2)] Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь

Разработана методика приготовления устойчивых водных суспензий ультрадисперсных алмазов. Показано, что предварительный температурный отжиг ультрадисперсных алмазов оказывает влияние на их свойства в водной среде. Установлено, что наибольшая концентрация в суспензии достигается для наноалмазов, подвергнутых вакуумному отжигу при 750 °C, а наиболее высокая седиментационная устойчивость водных суспензий получена для образцов, отожженных в атмосфере воздуха при 430 °C.

Ключевые слова: наноалмазы; детонационный синтез; водные суспензии; седиментация.

SEDIMENTATION STABILITY OF AQUEOUS SUSPENSIONS OF NANODIAMONDS

A. A. Tabolich[1], N. V. Belko[1], A. A. Lugovski[2], V. A. Parkhomenko, G. A. Gusakov[2]

[1)] Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

[2)] A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Kurchatova str.7, 220045 Minsk, Belarus,

Corresponding author: A. A. Tabolich (nastya.tabolich@mail.ru)