

## **Анализ характеристик переключения ячеек памяти MRAM на основе материалов с одноосной анизотропией**

**Ю.А. Юсипова**

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия  
Институт проблем проектирования в микроэлектронике  
Российской академии наук, г. Москва, Россия*

*linda\_nike@mail.ru*

Магниторезистивная память с произвольным доступом (magnetoresistive random-access memory – MRAM) имеет преимущества перед другими видами памяти. Однако у MRAM есть существенный недостаток: значения плотности тока и магнитного поля, которые нужно приложить для переключения свободного слоя спинового вентиля, входящего в состав ячейки памяти MRAM, слишком велики.

Проанализирована зависимость плотности тока и магнитного поля переключения от магнитных параметров материала, из которого изготовлены ферромагнитные слои спинового вентиля. Сопоставление критических характеристик спинового вентиля с продольной анизотропией ферромагнитных слоев, выполненных на основе различных материалов, показало, что перспективными материалами для изготовления спинового вентиля являются кобальт, железо и их сплавы, ферробораты кобальта, а также сплавы кобальта с гадолинием. Для этих материалов построены и проанализированы бифуркационные диаграммы уравнений, описывающих процесс переключения вентиля. На основании проведенного исследования динамики вектора намагниченности выбраны четыре оптимальных режима его переключения. Выполнено сравнение величин внешнего магнитного поля и управляющего тока инжекции, отвечающих устойчивому переключению ячейки памяти MRAM для различных материалов. Проведены численные оценки времени переключения ячейки памяти MRAM и определены условия ее оптимального быстрогодействия.

Установлено, что наиболее подходящие материалы для изготовления спинового вентиля –  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$ , прошедшие отжиг при температурах 300 и 200 °C соответственно.

*Ключевые слова:* спиновый вентиль; магниторезистивная память с произвольным доступом (MRAM); ферробораты; сплавы редкоземельных металлов; константы анизотропии; намагниченность насыщения; коэффициент диссипации; параметр спиновой поляризации.

*Для цитирования:* Юсипова Ю.А. Анализ характеристик переключения ячеек памяти MRAM на основе материалов с одноосной анизотропией // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №5. – С. 421–432. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-421-432

## **Analysis of Switching Characteristics of MRAM Cells Based on Materials with Uniaxial Anisotropy**

*Iu.A. Iusipova*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia  
Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russia*

*linda\_nike@mail.ru*

The magnetoresistive random access memory (MRAM) has some advantages over other types of memory. However, MRAM has a significant drawback: the values of current density and the magnetic field, that must be applied to switch the free layer of the spin valve, which is included into the MRAM cell, are too high.

The dependence of the current density and of the switching magnetic field on the magnetic parameters, from which the ferromagnetic layers of the spin valve have been fabricated, has been analyzed. The comparison of the critical characteristics of the spin valve with the longitudinal anisotropy of the ferromagnetic layers, made on the basis of different materials has shown that the perspective materials for the spin valve are cobalt, iron, cobalt ferrobates and cobalt alloys with gadolinium. For these materials the bifurcation diagrams of the equations, describing the valve switching process, have been created and analyzed. On the basis of the study four optimal switching modes have been selected. The comparison of the values of the external magnetic field and the injection current corresponding to the stable switching of the magnetosensitive memory cell has been performed for various materials. The numerical estimations of the MRAM switching time have been executed and the conditions for the optimal cell operation have been found.

The studies performed have shown that the materials for the spin valve fabrication are most suitable –  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$  and  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$  annealed at the temperatures of 300 °C and 200 °C, respectively.

*Keywords:* spin valve; MRAM; ferrobate; alloys of rare earth metals; the coefficient of anisotropy, saturation magnetization; coefficient of dissipation; spin polarization.

*For citation:* Iusipova Iu.A. Analysis of Switching Characteristics of MRAM Cells Based on Materials with Uniaxial Anisotropy // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. 421–432. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-421-432

**Введение.** В настоящее время существующие типы памяти приближаются к пределам своих возможностей и ведется интенсивная разработка новых, в особенности энергонезависимых, видов памяти. В 2016 г. корпорация IBM в сотрудничестве с компанией Samsung продемонстрировала новую магниторезистивную память с произвольным доступом (magnetoresistive random-access memory – MRAM), диаметр ячейки которой составляет 11 нм. Время переключения такой ячейки превосходит все существующие виды памяти и составляет всего 10 нс [1]. При этом MRAM имеет высочайшую надежность,

так как данные в ней определяются ориентацией вектора намагниченности свободного слоя спинного вентиля, входящего в состав ячейки. Благодаря этому у MRAM не происходит утечки заряда, которая ограничивает время хранения данных в других технологиях. Широкий температурный диапазон (от  $-40$  до  $+125$  °C), неограниченное количество циклов перезаписи, высокая радиационная стойкость – это лишь немногие преимущества MRAM перед уже существующими типами памяти. MRAM можно считать «универсальной памятью», так как она выполняет функции внутрисхемно-программируемой памяти, быстрого буфера и энергонезависимого хранилища данных.

Цель настоящей работы – исследование влияния магнитных характеристик материала ферромагнитных слоев спинного вентиля на динамику вектора намагниченности его свободного слоя. Проводится бифуркационный анализ уравнений, описывающих процесс переключения спинного вентиля, с расчетом пороговых токов и оценкой времени записи одного бита информации для различных материалов.

**Математическая модель спинного вентиля.** Ячейка памяти MRAM представляет собой КМОП-транзистор, со стоком которого соединен спинный вентиль. Поперечное сечение спинного вентиля представляет собой квадрат со стороной 11 нм. Толщина свободного слоя составляет 2 нм, толщина закрепленного слоя – 5 нм, толщина немагнитной прослойки – 1,2 нм. Физические основы работы спинного вентиля под действием спин-поляризованного тока изложены в работе [2].

Уравнение динамики намагниченности в свободном слое вентильной структуры в виде канонической динамической системы имеет вид [3–5]

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial \tau} = -[\mathbf{m} \times \mathbf{h}^{eff}] + \alpha \mathbf{h}^{eff} - \alpha \mathbf{m}(\mathbf{m} \cdot \mathbf{h}^{eff}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{m}$  – вектор намагниченности свободного слоя;  $\mathbf{h}^{eff}$  – эффективное поле:

$$\mathbf{h}^{eff} = \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h + km_x \\ -jGm_z \\ jGm_y - m_z \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$h = \frac{H}{M_s}; \quad \tau = \frac{t\gamma\mu_0 M_s}{(1 + \alpha^2)}; \quad j = \frac{J\hbar}{de\mu_0 M_s^2}; \quad k = \frac{2K}{\mu_0 M_s^2}; \quad H - \text{внешнее магнитное поле};$$

$M_s$  – намагниченность насыщения;  $t$  – время;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\alpha$  – коэффициент диссипации;  $\gamma$  – гиромагнитное соотношение;  $d$  – толщина свободного слоя;  $e$  – элементарный электрический заряд;  $\hbar$  – постоянная Планка;  $K$  – константа одноосной анизотропии.

Воздействие спин-поляризованного тока на динамику намагниченности в такой модели описывается токовым членом в форме Слончевского – Берже. Коэффициент токовой поляризации, входящий в выражение для этого члена, равен:

$$G = \frac{4P^{3/2}}{(1 + P)^3 (3 + \mathbf{m} \cdot \mathbf{s}) - 16P^{3/2}} = \frac{c}{b + m_x},$$

здесь  $c = \frac{4P^{3/2}}{(1 + P)^3}$ ;  $b = 3 - 4c$ ;  $P = \frac{n_{\uparrow} - n_{\downarrow}}{n_{\uparrow} + n_{\downarrow}}$  – параметр спиновой поляризации;  $\mathbf{s} = (1, 0, 0)$  –

вектор намагниченности закрепленного слоя [2] в случае продольной анизотропии.

В координатной записи система (1) имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{m}_x &= -j(m_y^2 + m_z^2)G + m_y m_z + \alpha(h + km_x) - \alpha m_x L, \\ \dot{m}_y &= jm_x m_y G - m_x m_z - hm_z - km_x m_x - \alpha jm_z G - \alpha m_y L, \\ \dot{m}_z &= m_y(h + km_x) + jm_x m_z G + \alpha(jm_y G - m_z) - \alpha m_z L,\end{aligned}\quad (3)$$

где  $L = hm_x + km_x^2 - m_z^2$ ;  $m_x, m_y, m_z$  – проекции вектора намагниченности свободного слоя спинного вентиля на оси  $OX, OY$  и  $OZ$  соответственно.

Важной характеристикой динамики намагниченности являются особые точки системы (3), т.е. точки равновесия намагниченности данной вентильной структуры. В работах [3–5] получены следующие выражения для расчета координаты  $m_x$  особых точек:

$$m_x^2 - 1 = 0, \quad (4a)$$

$$\begin{aligned}m_x^4(k^2 + k) + m_x^3(h + 2bk^2 + 2hk + 2bk) + m_x^2(h^2 + 4hbk + 2hb + \\ + b^2k^2 + b^2k + c^2j^2) + m_x(hb^2 + 2h^2b + 2hb^2k) + h^2b^2 = 0.\end{aligned}\quad (4b)$$

Уравнение (4a) отвечает двум положениям равновесия  $T_{1,2}(\pm 1, 0, 0)$  в системе при любых токах и полях, уравнение (4b) позволяет рассчитать координаты дополнительных особых точек в зависимости от тока и поля и выделить области их существования. Представляет интерес наличие в системе (3) траектории, соединяющей точки равновесия  $T_{1,2}(\pm 1, 0, 0)$ , иными словами, переключающего режима. Такая траектория может существовать только в случае неустойчивости начального положения вектора намагниченности, соответствующего точке  $T_1(+1, 0, 0)$ , и устойчивости конечного положения вектора намагниченности для точки  $T_2(-1, 0, 0)$ .

Получены выражения для определения устойчивости точки  $T_1(+1, 0, 0)$  [3–5]:

$$\frac{\alpha de M_s \mu_0}{\hbar G} H - J + \frac{\alpha de}{\hbar G} \left( \frac{4K + M_s^2 \mu_0}{2} \right) = 0, \quad (5a)$$

$$\left[ \left( H + \frac{4K + M_s^2 \mu_0}{2M_s} \right) \left( \frac{M_s}{2} \right)^{-1} \right]^2 + \left[ J \left( \frac{de M_s^2 \mu_0}{2G\hbar} \right)^{-1} \right]^2 - 1 = 0. \quad (5b)$$

Выражения (5a) и (5b) отвечают за минимальный ток переключения спинного вентиля. Выражение (5a) – это канонический вид уравнения прямой, разделяющей области, в которых точка  $T_1(+1, 0, 0)$  имеет вид устойчивого или неустойчивого фокуса, и пересекающей ось  $J$  в точке

$$J_{\min} = \frac{\alpha de}{\hbar G} g, \quad g = \left( \frac{4K + M_s^2 \mu_0}{2} \right), \quad (6)$$

Выражение (5b) представляет собой каноническое уравнение эллипса, внутри которого точка  $T_1(+1, 0, 0)$  имеет вид седла. Эллипс пересекает ось  $H$  в точках с координатами

$$H_{\min} = \frac{-2K}{M_s \mu_0} \text{ и } H_{\max} = -\frac{2K + M_s^2 \mu_0}{M_s \mu_0}. \text{ Подробный анализ приведен в [3–5].}$$

Ток переключения можно снизить несколькими способами: приложив магнитное поле, направленное противоположно намагниченности закрепленного слоя; уменьшив

толщину свободного слоя  $d$ ; подобрав материал изготовления свободного слоя спинового вентиля, магнитные свойства которого предполагают минимальную область устойчивости точки  $T_1(+1,0,0)$ .

**Магнитные свойства некоторых материалов.** Рассмотрим влияние магнитных свойств ферромагнитных материалов на пороговый ток переключения ячейки памяти MRAM при нулевом магнитном поле  $J_{\min}$ . Согласно выражению (6) для минимизации порогового тока переключения при нулевом магнитном поле, помимо уменьшения коэффициента диссипации и параметра  $g$ , необходимо увеличить коэффициент токовой поляризации  $G$ .

Зависимость коэффициента токовой поляризации  $G$  от параметра спиновой поляризации  $P$  при  $x = 1$  на отрезке  $P \in (0;1)$  представляет собой гладкую монотонно возрастающую функцию. Как видно из данных табл.1, наименьшие значения параметра спиновой поляризации имеют чистые металлы и сплавы гадолиния с кобальтом, а добавление бора в сплав железа с кобальтом существенно увеличивает коэффициент токовой поляризации  $G$ , в то время как отжиг при высоких температурах его понижает.

Таблица 1

Значения параметра спиновой поляризации  $P$  и коэффициента токовой поляризации  $G$  некоторых ферромагнитных материалов ( $m_x = 1$ )

Table 1

Spin polarization  $P$  and ratio of the current polarization  $G$  for various materials and alloys ( $m_x = 1$ )

Материал	$P$	$G$
$\text{Co}_{80}\text{B}_{20}$ , отжиг при $T = 200^\circ\text{C}$ [6]	0,1	0,026
Gd [6]	0,13	0,037
$\text{Co}_{93}\text{B}_7$ , отжиг при $T = 200^\circ\text{C}$ [6]	0,3	0,107
Co [7]	0,35	0,127
Fe [7]	0,4	0,146
$\text{Fe}_{20}\text{Co}_{72}\text{B}_8$ , отжиг при $T = 450^\circ\text{C}$ [8]	0,44	0,160
$\text{Fe}_{20}\text{Co}_{72}\text{B}_8$ , отжиг при $T = 300^\circ\text{C}$ [8]	0,495	0,179
$\text{Fe}_{20}\text{Co}_{60}\text{B}_{20}$ , отжиг при $T = 450^\circ\text{C}$ [9]; $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$ , отжиг при $T = 300^\circ\text{C}$ [10]	0,52	0,186
$\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$ , отжиг при $T = 450^\circ\text{C}$ [9]	0,53	0,189
$\text{Fe}_{20}\text{Co}_{72}\text{B}_8$ , без отжига [8]	0,535	0,191
$\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ , отжиг при $T = 300^\circ\text{C}$ [11]	0,55	0,195
$\text{Fe}_{20}\text{Co}_{60}\text{B}_{20}$ , без отжига [9]	0,57	0,200
$\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$ , без отжига [9]	0,63	0,215
$\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$ , без отжига [9]	0,65	0,219

В табл.2 приведены значения намагниченности насыщения  $M_s$ , константа анизотропии  $K$ , а также рассчитанные исходя из этих данных параметр  $g$ , минимальное магнитное поле переключения при нулевом токе  $H_{\min}$  для различных материалов.

Таблица 2

Значения магнитных параметров для различных материалов

Table 2

The saturation magnetization, the coefficient of anisotropy, the parameter  $g$ , the threshold magnetic field strength  $H_{\min}$  for various materials and alloys

Материал	$M_s \mu_0$ , Тл	$K$ , Дж/м <sup>3</sup>	$g$ , Тл·м/Гн	$H_{\min}$ , А/м
Fe <sub>40</sub> Co <sub>40</sub> B <sub>20</sub> , отжиг при $T = 300$ °C [10, 12]	1,30	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$7,27 \cdot 10^5$	$-5,25 \cdot 10^{-2}$
Fe <sub>44</sub> Co <sub>23</sub> B <sub>30</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , без отжига [13]	1,10	$5 \cdot 10^2$	$7,96 \cdot 10^8$	$-9,09 \cdot 10^2$
Co <sub>80</sub> Gd <sub>20</sub> , отжиг при $T = 200$ °C [6]	0,10	$1,38 \cdot 10^3$	$2,19 \cdot 10^9$	$-2,75 \cdot 10^4$
Co <sub>93</sub> Gd <sub>7</sub> , отжиг при $T = 200$ °C [6]	1,21	$1,88 \cdot 10^3$	$2,98 \cdot 10^9$	$-3,10 \cdot 10^3$
Fe <sub>58</sub> Co <sub>31</sub> B <sub>8</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , без отжига [13]	1,76	$4,2 \cdot 10^3$	$6,69 \cdot 10^9$	$-4,77 \cdot 10^3$
Fe <sub>63</sub> Co <sub>44</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , без отжига [13]	2,00	$5,5 \cdot 10^3$	$8,76 \cdot 10^9$	$-5,50 \cdot 10^3$
Fe <sub>54</sub> Co <sub>23</sub> B <sub>22</sub> , без отжига [14]	1,34	$4,89 \cdot 10^3$	$7,78 \cdot 10^9$	$-7,29 \cdot 10^3$
Fe <sub>61</sub> Co <sub>26</sub> B <sub>13</sub> , без отжига [14]	2,00	$3,18 \cdot 10^4$	$1,17 \cdot 10^{10}$	$-9,28 \cdot 10^3$
Fe <sub>70</sub> Co <sub>30</sub> , без отжига [14]	2,00	$2,59 \cdot 10^4$	$4,12 \cdot 10^{10}$	$-2,59 \cdot 10^4$
Fe <sub>70</sub> Co <sub>30</sub> , отжиг при $T = 300$ °C [15]	2,40	$3,50 \cdot 10^4$	$5,57 \cdot 10^{10}$	$-2,92 \cdot 10^4$
Fe [7, 16]	2,15	$4,8 \cdot 10^4$	$7,64 \cdot 10^{10}$	$-6,23 \cdot 10^4$
Fe <sub>66</sub> Co <sub>28</sub> B <sub>6</sub> , без отжига [14]	1,80	$1,31 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^{11}$	$-7,07 \cdot 10^4$
Fe <sub>60</sub> Co <sub>20</sub> B <sub>20</sub> , отжиг при $T = 450$ °C [17, 18]	1,96	$2,1 \cdot 10^5$	$3,34 \cdot 10^{11}$	$-2,14 \cdot 10^5$
Co [7]	1,76	$5,3 \cdot 10^5$	$8,44 \cdot 10^{11}$	$-6,02 \cdot 10^5$

Как видно из табл.2, наибольшие значения  $g$  и  $H_{\min}$  имеют ферробораты кобальта с наибольшим процентным содержанием железа, беспримесные железо и кобальт, а наименьшие значения этих параметров у Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>B<sub>20</sub>, ферроборатов с добавлением оксида алюминия и сплавов гадолиния с кобальтом.

Основываясь на данных теоретического анализа и свойствах материалов (см. табл.1 и 2), можно заключить, что наиболее подходящими для изготовления спинового вентиля являются ферробораты кобальта, имеющие высокое значение параметра поляризации, а также сплавы кобальта с гадолинием за счет низкого значения  $H_{\min}$ . Однако выращивание качественных монокристаллических тонких пленок из составных материалов, в особенности в точных процентных пропорциях, представляет сложность, а также приводит к увеличению стоимости готовой микросхемы. Поэтому для дальнейших расчетов выбраны следующие материалы:

- Fe<sub>60</sub>Co<sub>20</sub>B<sub>20</sub> после отжига при  $T = 450$  °C, Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>B<sub>20</sub> и Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub> после отжига при  $T = 300$  °C, которые имеют наилучшие магнитные свойства для уменьшения тока переключения;
- Co<sub>80</sub>Gd<sub>20</sub> и Co<sub>93</sub>Gd<sub>7</sub> после отжига при  $T = 200$  °C, характеризующиеся наилучшими магнитными свойствами для уменьшения магнитного поля переключения;
- Co и Fe, монокристаллические пленки которых легче и дешевле получить.

Коэффициенты диссипации  $\alpha$  для рассматриваемых материалов имеют следующие значения: Co,  $\alpha = 0,020$  [7]; Fe,  $\alpha = 0,008$  [16];  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ ,  $\alpha = 0,015$  [16];  $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$ ;  $\alpha = 0,040$  [18];  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$ ,  $\alpha = 0,010$  [12];  $\text{Co}_{93}\text{Gd}_7$ ,  $\alpha = 0,020$  [6];  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$ ,  $\alpha = 0,020$  [6]. Нормировки основных переменных для этих материалов приведены в табл.3.

Таблица 3

Основные нормировки для расчетов

Table 3

The main normalizations used in the calculations

Материал	$t = \frac{\tau(1 + \alpha^2)}{\gamma\mu_0 M_s}, \text{ с}$	$H = hM_s, \text{ А/м}$	$J = \frac{jde\mu_0 M_s^2}{\hbar}, \text{ А/м}^2$	$K = \frac{\mu_0 M_s^2}{2} k, \text{ Дж/м}^3$
Co	$2,028 \cdot 10^{-11} \cdot \tau$	$1,401 \cdot 10^6 \cdot h$	$7,480 \cdot 10^{12} \cdot j$	$1,232 \cdot 10^6 \cdot k$
Fe	$1,660 \cdot 10^{-11} \cdot \tau$	$1,711 \cdot 10^6 \cdot h$	$1,116 \cdot 10^{13} \cdot j$	$1,839 \cdot 10^6 \cdot k$
$\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$	$1,487 \cdot 10^{-11} \cdot \tau$	$1,910 \cdot 10^6 \cdot h$	$1,391 \cdot 10^{13} \cdot j$	$2,292 \cdot 10^6 \cdot k$
$\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$	$1,823 \cdot 10^{-11} \cdot \tau$	$1,560 \cdot 10^6 \cdot h$	$9,276 \cdot 10^{12} \cdot j$	$1,529 \cdot 10^6 \cdot k$
$\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$	$2,745 \cdot 10^{-11} \cdot \tau$	$1,035 \cdot 10^6 \cdot h$	$4,081 \cdot 10^{12} \cdot j$	$6,724 \cdot 10^5 \cdot k$
$\text{Co}_{93}\text{Gd}_7$	$2,950 \cdot 10^{-11} \cdot \tau$	$9,629 \cdot 10^5 \cdot h$	$3,535 \cdot 10^{12} \cdot j$	$5,825 \cdot 10^5 \cdot k$
$\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$	$3,569 \cdot 10^{-10} \cdot \tau$	$7,958 \cdot 10^4 \cdot h$	$2,415 \cdot 10^{10} \cdot j$	$3,979 \cdot 10^3 \cdot k$

**Бифуркационный анализ.** На рис.1 изображены бифуркационные диаграммы для  $|m_x, m_y, m_z| < 1$ , построенные в программной среде MathLab, для различных материалов. В области 1 на бифуркационных диаграммах у системы (3) нет ни одной дополнительной особой точки. Для каждой точки двух областей 2, кроме точек  $T_{1,2}(\pm 1, 0, 0)$ , существуют еще две дополнительные особые точки типа «неустойчивый фокус», в области 3 – два неустойчивых узла, в области 4 – четыре дополнительные точки, две из которых являются неустойчивыми узлами, а две другие – «седлами». Для каждой точки области 5 существуют четыре особые точки, две из которых – «седла», а еще две – «неустойчивый фокус». Для каждой точки области 6 существуют четыре дополнительные точки, две из которых – «седла», а две другие – «неустойчивый фокус». Для каждой точки области 7 существуют четыре точки типа «седло», в области 8 – две точки типа «седло», а в области 9 – две точки типа «неустойчивый фокус». Координаты парных точек симметричны относительно оси OX. На вставках рис.2 области 7 и 8 показаны в увеличенном масштабе.

**Подбор оптимальных параметров переключения.** На рис.2 изображены линии устойчивости  $T_1(+1, 0, 0)$  для различных материалов. Переключение спинового вентиля возможно только в области выше прямой, уравнение которой имеет вид (5а), и внутри полуэллипса, определяемого формулой (5б).

Таким образом, можно выделить четыре характерных режима переключения спинового вентиля (см. рис.1 и 2): режим 1 – переключение током при нулевом магнитном поле; режим 2 – переключение полем при нулевом токе; режим 3 – переключение полем и током в области выше прямой устойчивости  $T_1(+1, 0, 0)$ ; режим 4 – переключение полем и током внутри полуэллиптической области. В табл.4 приведены значения токов и полей для четырех режимов переключения.

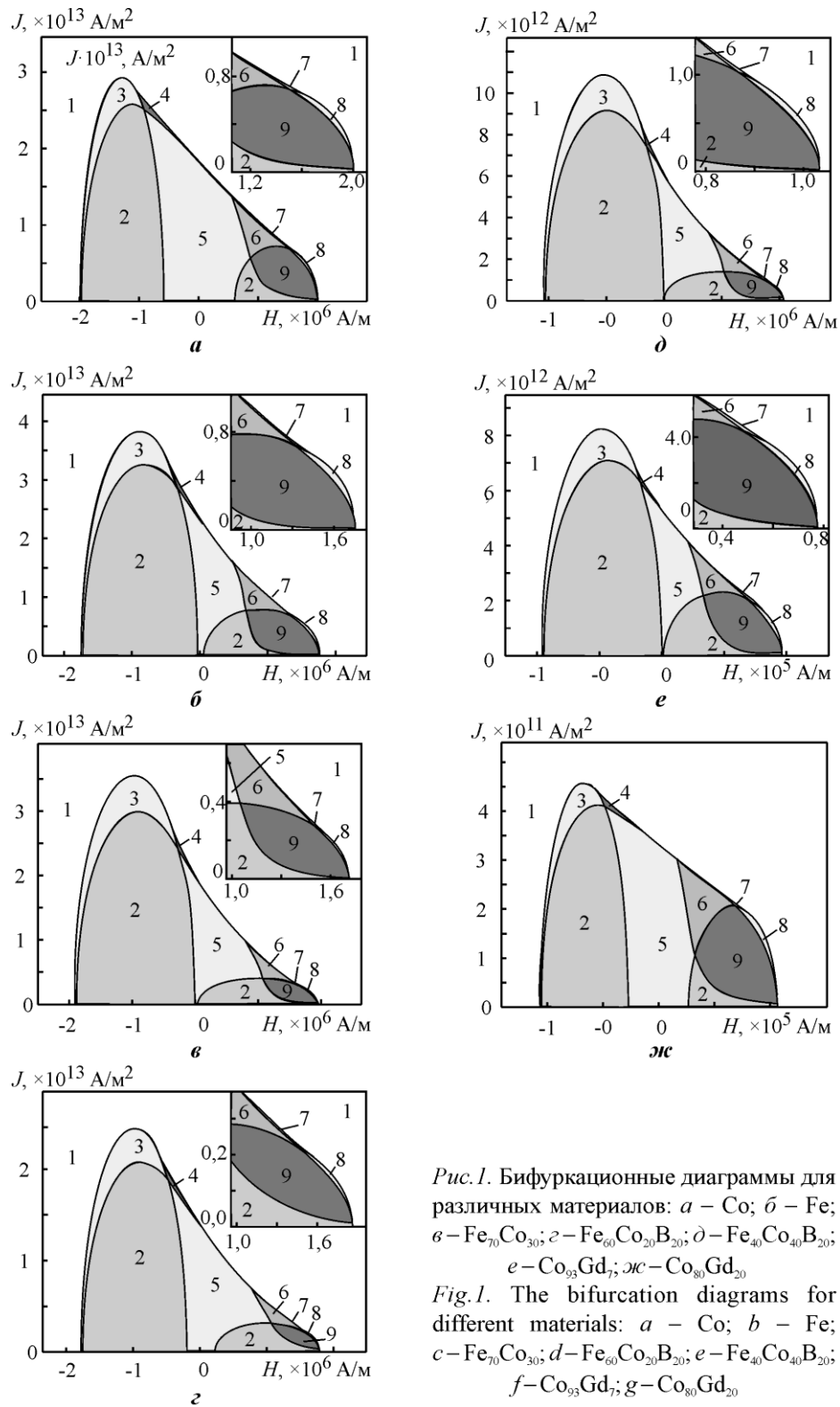


Рис.1. Бифуркационные диаграммы для различных материалов: а – Co; б – Fe; в – Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>; г – Fe<sub>60</sub>Co<sub>20</sub>B<sub>20</sub>; д – Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>B<sub>20</sub>; е – Co<sub>93</sub>Gd<sub>7</sub>; ж – Co<sub>80</sub>Gd<sub>20</sub>; з – Co<sub>70</sub>Gd<sub>30</sub>.

Fig.1. The bifurcation diagrams for different materials: а – Co; б – Fe; в – Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>; г – Fe<sub>60</sub>Co<sub>20</sub>B<sub>20</sub>; д – Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>B<sub>20</sub>; е – Co<sub>93</sub>Gd<sub>7</sub>; ж – Co<sub>80</sub>Gd<sub>20</sub>; з – Co<sub>70</sub>Gd<sub>30</sub>.

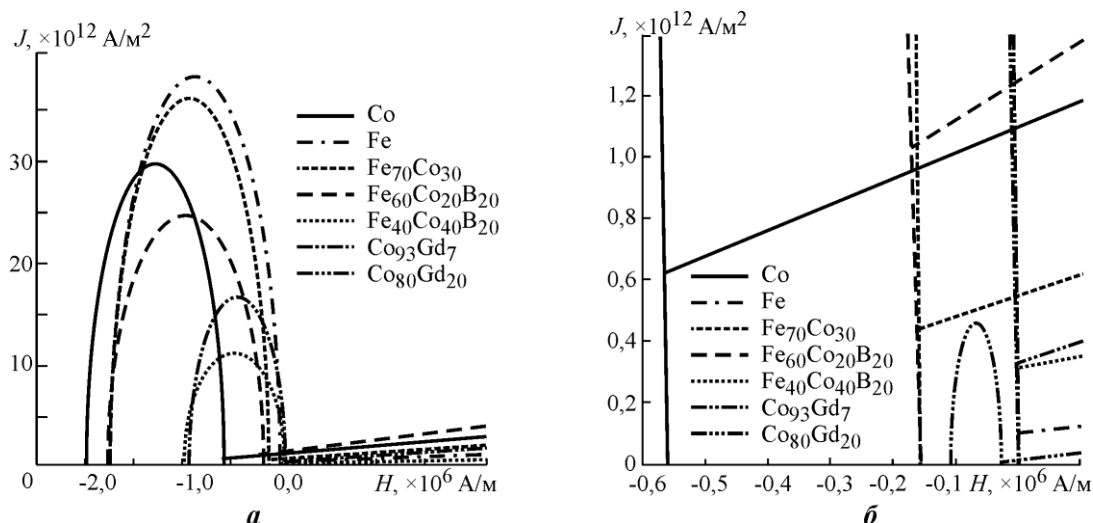


Рис.2. Линии устойчивости  $T_1(+1,0,0)$ , построенные в диапазоне по осям  $H[-2,5;2] \cdot 10^6$  А/м,  $J[0;40] \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup> (а) и  $H[-0,6;0,1] \cdot 10^6$  А/м,  $J[0;1,4] \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup> (б)

Fig.2. The stability line of singular point  $T_1(+1,0,0)$ : а – in the range  $H[-2,5;2] \cdot 10^6$  А/м and in the current range  $J[0;40] \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>; б – in the range  $H[-0,6;0,1] \cdot 10^6$  А/м and in the current range  $J[0;1,4] \cdot 10^{12}$  А/м<sup>2</sup>

Таблица 4

**Оптимальные параметры переключения спинного вентиля  
на основе различных материалов**

Table 4

**The optimal parameters for switching of the spin valve made of different materials**

Материал	Режим 1 $H = 0$	Режим 2 $J = 0$	Режим 3		Режим 4	
	$J_{\min}, \text{А/м}^2$	$H_{\min}, \text{А/м}$	$H, \text{А/м}$	$J, \text{А/м}^2$	$H, \text{А/м}$	$J, \text{А/м}^2$
Co	$1,12 \cdot 10^{12}$	$-6,02 \cdot 10^5$	$-3,01 \cdot 10^5$	$8,60 \cdot 10^{11}$	$-6,32 \cdot 10^5$	<b><math>8,40 \cdot 10^{10}</math></b>
Fe	$3,38 \cdot 10^{11}$	$-4,47 \cdot 10^4$	$-2,23 \cdot 10^4$	$3,29 \cdot 10^{11}$	$-4,69 \cdot 10^4$	<b><math>8,40 \cdot 10^{10}</math></b>
Fe <sub>70</sub> Co <sub>30</sub>	$5,79 \cdot 10^{11}$	$-2,92 \cdot 10^4$	$-1,46 \cdot 10^4$	$5,70 \cdot 10^{11}$	$-3,06 \cdot 10^4$	<b><math>8,40 \cdot 10^{10}</math></b>
Fe <sub>60</sub> Co <sub>20</sub> B <sub>20</sub>	$1,31 \cdot 10^{12}$	$-2,14 \cdot 10^5$	$-1,07 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^{12}$	$-2,25 \cdot 10^5$	<b><math>8,40 \cdot 10^{10}</math></b>
Fe <sub>40</sub> Co <sub>40</sub> B <sub>20</sub>	$1,15 \cdot 10^{11}$	<b><math>-5,17 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>-2,62 \cdot 10^{-2}</math></b>	$1,11 \cdot 10^{11}$	<b><math>-2,07 \cdot 10^1</math></b>	<b><math>8,40 \cdot 10^{10}</math></b>
Co <sub>93</sub> Gd <sub>7</sub>	$3,89 \cdot 10^{11}$	$-3,13 \cdot 10^3$	$-1,63 \cdot 10^3$	$3,49 \cdot 10^{11}$	$-3,26 \cdot 10^3$	<b><math>8,40 \cdot 10^{10}</math></b>
Co <sub>80</sub> Gd <sub>20</sub>	<b><math>2,66 \cdot 10^{10}</math></b>	$-2,76 \cdot 10^4$	<b><math>-5,00 \cdot 10^2</math></b>	<b><math>1,62 \cdot 10^{10}</math></b>	$-2,90 \cdot 10^4$	<b><math>8,40 \cdot 10^{10}</math></b>

Прямая устойчивости для  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$  (см. рис.2) имеет минимальный наклон. Следовательно, обеспечивается минимальный пороговый ток  $J_{\min}$  при нулевом магнитном поле (см. табл.4). Отметим, что есть ограничения на предельные величины плотности тока инжекции  $J$  и внешнего магнитного поля  $H$ , связанные с электромиграцией и нагревом образца. Максимальные значения плотности тока не должны превышать  $10^{11}$  А/м<sup>2</sup>, а напряженности внешнего магнитного поля по модулю –  $10^3$  А/м. В табл.4 жирным шрифтом выделены допустимые значения тока и поля. На основании рис.2, табл.2 и 4 можно сделать вывод, что переключение спинного вентиля с помощью маг-

нитного поля при нулевом токе возможно только для сплава  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$ , так как для остальных материалов  $H_{\min}$  на один-два порядка превышает максимально допустимые значения.

Ячейки памяти MRAM, изготовленные по технологии 10 нм корпорацией IBM в сотрудничестве с компанией Samsung, переключаются при токе плотности  $J = 7,89 \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$  [1]. Как видно из табл.4, переключение спинового вентиля без приложенного магнитного поля возможно только для сплава  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$ , так как для остальных материалов  $J_{\min}$  много больше допустимых значений плотности тока. Для этих материалов переключение спинового вентиля представляется возможным только при комбинированном воздействии тока и магнитного поля. Также, исходя из ограничений по плотности тока и магнитного поля, для сплава  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$  разрешенным является режим 4, предполагающий переключение полем и током внутри полуэллиптической области (см. рис.2), а для  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$  – режим 3, т.е. переключение полем и током в области выше пороговой прямой потери устойчивости  $T_1(+1,0,0)$ .

**Расчет времени переключения.** Для оценки времени переключения ячейки памяти MRAM проведено моделирование динамики процесса переключения спинового вентиля из параллельного в антипараллельное состояние. В табл.5 представлены значения времени переключения спинового вентиля, входящего в состав ячейки памяти MRAM со спиновым вентилям на основе различных материалов. Параметры переключения для различных режимов взяты из табл.4. Жирным шрифтом в табл.5 отмечены допустимые режимы по ограничениям плотности тока и поля.

**Таблица 5**

**Значения времени переключения спинового вентиля, нс**

**Table 5**

**The switching time of the spin valve, ns**

Материал	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Co	187,2	14,5	204,6	3,8
Fe	339,2	91,9	333,3	7,87
$\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$	171,5	21,1	160,2	5,6
$\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$	52,6	79,4	58,4	2,8
$\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$	564,0	<b>4690,9</b>	510,3	<b>89,7</b>
$\text{Co}_{93}\text{Gd}_7$	79,38	63,85	242,33	17,2
$\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$	<b>960,6</b>	105,5	<b>21,8</b>	3,6

Как видно из табл.5, наименьшее значение времени переключения для разрешенных режимов соответствует сплаву  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$  в режиме 3. Однако режимы переключения, использующие магнитное поле, предполагают усложнение производства микросхемы ячеек памяти MRAM, поскольку для приложения магнитного поля требуется дополнительная шина. Поэтому наиболее приоритетным является режим 1, в котором плотность тока переключения при расчете существенно ниже, чем у материала, использованного корпорацией IBM, но время переключения намного больше.

**Заключение.** На основании анализа зависимости тока переключения от характеристик материалов магнитных слоев спинового вентиля установлено, что перспективными материалами для магнитных слоев являются Co, Fe,  $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{20}\text{B}_{20}$  после отжига при

$T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$  и  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$  после отжига при  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$  и  $\text{Co}_{93}\text{Gd}_7$  после отжига при  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Исследование динамики вектора намагниченности свободного слоя спинового вентиля, изготовленного на основе данных материалов, позволило выбрать четыре оптимальных режима переключения спинового вентиля.

В результате расчета оптимальных параметров и времени переключения для каждого режима при учете физических ограничений на величины плотности тока и магнитного поля сделан вывод, что наиболее подходящие материалы для изготовления спинового вентиля, входящего в состав ячейки памяти MRAM, –  $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{B}_{20}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Gd}_{20}$ , прошедшие отжиг при температурах 300 и 200  $^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Автор благодарит профессора А.И. Попова за внимательное прочтение рукописи и доброжелательное обсуждение задачи.

### Литература

1. Dependence of voltage and size on write error rates in spin-transfer torque magnetic random-access memory / *J.J. Nowak, R.P. Robertazzi, J.Z. Sun et al.* // IEEE Magnetics Letters – 2016. – Vol. 7. – P. 3102604.
2. *Slonczewski J.C.* Current-driven excitation of magnetic multilayers // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 1996. – Vol. 159. – P. L1–L7.
3. *Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A.* Bifurcations in the dynamical system for three-layered magnetic valve // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 233–234. – P. 431–434.
4. *Островская Н.В., Скиданов В.А., Юсипова Ю.А.* Классификация динамических режимов переключения намагниченности в трехслойной ферромагнитной структуре в зависимости от спин-поляризованного тока инжекции и внешнего магнитного поля I. Продольная анизотропия // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – №4. – Т.8. – С. 605–620.
5. *Островская Н.В., Скиданов В.А., Юсипова Ю.А.* Особенности переключения намагниченности в ячейках памяти MRAM с планарной анизотропией // Сб. тр. ИПИМ РАН / Под общ. ред. РАН Стемпковского А.Л. – М.: ИПИМ РАН, 2016. – С. 199–206.
6. *Kaiser C., Papworth Parkin S.S.* United States Patent № US007230265B2. – 2007. – 46 p.
7. *Skomski R.* Simple models of magnetism. – N.Y.: Oxford university press, 2008. – 335 p.
8. Spin tunneling in junctions with disordered ferromagnets / *P.V. Paluskar, J.J. Attema, G.A. de Wijs et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100. – P. 057205.
9. *Huang S.X., Chen T.Y., Chien C.L.* Spin polarization of amorphous CoFeB determined by point-contact Andreev reflection // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92. – P. 242509.
10. Current-driven magnetization switching in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions / *J. Hayakawa, S. Ikeda, Y.M. Lee et al.* // Japanese Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 44(2). – No. 37–41. – P. L1267–L1270.
11. *Moodera J.S., Kim Tae Hee, Tanaka C., de Groot C.H.* Spin-polarized tunnelling, magnetoresistance and interfacial effects in ferromagnetic junctions // Philosophical Magazine B. – 2000. – Vol. 80. – No. 2. – P. 195–206.
12. Enhanced tunneling magnetoresistance and perpendicular magnetic anisotropy in Mo/CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions / *H. Almasi, D. Reifsnyder Hickey, T. Newhouse-Illige et al.* // Appl. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 106. – P. 182406.
13. Effect of B content on structure and magnetic properties of FeCoB- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanogranular films / *S. Wang, X. Zhang, J. Li et al.* // Appl. Phys. A. – 2011. – Vol. 104. – P. 415–423.
14. *Phuoc N.N., Ong C.K.* Influence of boron doping on magnetic properties and microwave characteristics of MnIr/FeCoB multilayers // J. of Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111. – P. 083920.
15. Физические величины: Справочник под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. / *А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.* – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
16. Dynamic magnetic properties of  $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{30}$ (100) single-crystal thin films deposited at various substrate temperatures / *T. Kawai, Y. Asai, M. Ohtake et al.* // EPJ Web of Conferences. – 2013. – Vol.40. – P. 13001
17. Enhancement of the anti-damping spin torque efficacy of platinum by interface modification / *M.H. Nguyen, C.F. Pai, K.X. Nguyen et al.* // Appl. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 106. – P. 222402
18. A perpendicular-anisotropy CoFeB–MgO magnetic tunnel junction / *S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto et al.* // Nature Materials. – 2010. – Vol. 9. – P. 721–724.

Поступила 10.04.2017 г.; принята к публикации 13.06.2017 г.

**Юсипова Юлия Александровна** – инженер кафедры общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), инженер-проектировщик отдела проектирования микроэлектронных компонентов для нанотехнологий Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3), linda\_nike@mail.ru

### References

1. Nowak J.J., Robertazzi R.P., Sun J.Z. et. al. Dependence of Voltage and Size on Write Error Rates in Spin-Transfer Torque Magnetic Random-Access Memory. *IEEE Magnetism Letters*, 2016, vol. 7, p. 3102604.
2. Slonczewski J.C. Current-driven excitation of magnetic multilayers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, vol. 159, pp. L1–L7.
3. Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Iusipova Iu.A. Bifurcations in the Dynamical System for Three-Layered Magnetic Valve. *Solid State Phenomena*, 2015, vols. 233–234, pp. 431–434.
4. Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., Yusipova Yu.A. Klassifikaciya dinamicheskikh rezhimov pereklyucheniya namagnichennosti v trekhslonnoj ferromagnitnoj strukture v zavisimosti ot spin-polyarizovannogo toka inzhekcii i vneshnego magnitnogo polya. I. Prodol'naya anizotropiya [Classification of dynamical switching regimes in a three-layered ferromagnetic nanopillar governed by spin-polarized injection current and external magnetic field. I. Longitudinal anisotropy]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 605–620. (in Russian).
5. Ostrovskaya N.V., Skidanov V.A., YUusipova YU.A., Osobennosti pereklyucheniya namagnichennosti v yachejkah pamyati MRAM s planarnoj anizotropiej [Features of magnetization reversal in a MRAM cell with in-plane anisotropy]. *Sbornik trudov IPPM RAN pod obshch. red. akad. RAN Stempkovskogo. A.L. – Proceedings of IPPM RAS. Ed. Stempkovskiy A.L.* Moscow, IPPM RAN, 2016, pp. 199–206. (in Russian).
6. Kaiser C. Papworth Parkin S.S. *United States Patent № US007230265B2*. 2007, 46 p.
7. Skomski R. *Simple Models of Magnetism*. New York, Oxford university press, 2008, 335 p.
8. Paluskar P.V., Attema J.J., de Wijs G.A., Fiddy S., Snoeck E., Kohlhepp J.T., Swagten H.J.M., de Groot R.A., Koopmans B. Spin tunneling in junctions with disordered ferromagnets. *Physical Review Letters*, 2008, vol. 100, pp. 057205.
9. Huang S.X., Chen T.Y., Chien C.L. Spin polarization of amorphous CoFeB determined by point-contact Andreev reflection. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, p. 242509.
10. Hayakawa J., Ikeda S., Lee Y.M., Sasaki R., Meguro T., Matsukura F., Takanashi H., Ohno H., Current-driven magnetization switching in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 44(2), no. 37–41, pp. L1267–L1270.
11. Moodera J.S., Kim Tae Hee, Tanaka C. and de Groot C.H. Spin-polarized tunnelling, magnetoresistance and interfacial effects in ferromagnetic junctions. *Philosophical Magazine B*, 2000, vol. 80, no. 2, pp. 195–206.
12. Almasi H., Reifsnnyder Hickey D., Newhouse-Illige T., Xu M., Rosales M.R., Nahar S., Held J.T., Mkhoyan K.A., Wang W.G. Enhanced tunneling magnetoresistance and perpendicular magnetic anisotropy in Mo/CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 106, p. 182406.
13. Wang S., Zhang X., Li J., Tian Q., Kou X. Effect of B content on structure and magnetic properties of FeCoB-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanogranular films. *Applied Physics A*, 2011, vol. 104, pp. 415–423.
14. Phuoc N.N. and Ong C.K. Influence of boron doping on magnetic properties and microwave characteristics of MnIr/FeCoB multilayers. *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, p. 083920.
15. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskij A.M. i dr. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik pod redakciej Grigor'eva I.S., Mejliхова E.Z.* [Physical quantities: Reference book Ed. Grigor'ev I.S., Meylihov E.Z.]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).
16. Kawai T., Asai Y., Ohtake M., Takeda S., Futamoto M. Dynamic magnetic properties of Fe<sub>70</sub>Co<sub>30</sub>(100) single-crystal thin films deposited at various substrate temperatures. *EPJ Web of Conferences*, 2013, vol. 40, p. 13001.
17. Nguyen M.H., Pai C.F., Nguyen K.X., Muller D.A., Ralph D.C., Buhrman R.A. Enhancement of the Anti-Damping Spin Torque Efficacy of Platinum by Interface Modification. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 106, p. 222402.
18. Ikeda S., Miura K., Yamamoto H., Mizunuma K., Gan H.D., Endo M., Kanai S., Hayakawa J., Matsukura F., Ohno H. A perpendicular-anisotropy CoFeB–MgO magnetic tunnel junction. *Nature Materials*, 2010, vol. 9, pp. 721–724

Submitted 10.04.2017; accepted 13.06.2017.

**Iusipova Iuliia A.** – engineer of the General Physics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), design engineer of the Design of Microelectronic Components for Nanotechnology Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), linda\_nike@mail.ru