

05:06:07

## Управление магнитным состоянием многослойных нанопленок с помощью лазерного излучения

© Н.Н. Крупа

Институт магнетизма НАН Украины,  
03142 Киев, Украина  
e-mail: krupa@imag.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 17 ноября 2009 г. В окончательной редакции 22 апреля 2010 г.)

Рассмотрены физические механизмы перемагничивания многослойных магнитных нанопленок лазерным излучением и проведены экспериментальные исследования влияния магнитного поля, наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов на проводимость туннельных микроконтактов  $Tb_{19}Co_5Fe_{76}/Pr_6O_{11}/Tb_{22}Co_5Fe_{73}$  и  $Co_{80}Fe_{20}/Pr_6O_{11}/Co_{30}Fe_{70}$ . Показано, что с помощью таких лазерных импульсов можно перемагничивать магнитные нанослои без внешнего магнитного поля под действием магнитного поля спинового тока, возбуждаемого за счет фотонного давления лазерного излучения, или магнитного поля, создаваемого циркулярно-поляризованными пикосекундными лазерными импульсами. Относительное изменение сопротивления при лазерном перемагничивании одного из нанослоев в микроконтактах  $Co_{80}Fe_{20}/Pr_6O_{11}/Co_{30}Fe_{70}$  достигает значения  $\Delta R/R = 0.06$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R/R = 0.25$  при  $T = 80$  К, в микроконтактах  $Tb_{19}Co_5Fe_{76}/Pr_6O_{11}/Tb_{22}Co_5Fe_{73}$   $\Delta R/R = 0.3$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R/R = 0.7$  при  $T = 80$  К.

### Введение

Дальнейший прогресс микроэлектроники связан с развитием спинтроники, которая базируется на процессах переноса спинового тока (спин-поляризованного тока) между элементами электронных устройств. При работе со спиновым током необходимо формировать и управлять ориентацией спинов электронов. Поэтому исследование динамики и спинзависимого транспорта в твердом теле не только важно с научной точки зрения, но и направлены на разработку новых методов активного управления спинами электронов и создание эффективно работающих элементов спинтроники.

Одними из наиболее перспективных материалов для спинтроники являются многослойные гетерогенные магнитные нанопленки. На основе таких пленок созданы чувствительные магнитные сенсоры и получено рекордно большое значение магнитосопротивления при прохождении спинового тока через барьер из оксида магния [1]. Поэтому исследования динамики перемагничивания и процесса переноса спинового тока в многослойных магнитных нанопленках, по нашему мнению, интересны не только с научной точки зрения, но и имеют практическую ценность.

При исследованиях особенностей спинзависимой проводимости магнитных наноструктур, как правило, изучают изменение электропроводимости таких структур при изменении состояния их намагниченности под действием внешнего магнитного поля или за счет перемагничивания спиновым током [2–5]. Причем для исследования процессов перемагничивания спиновым током приходится изготавливать специальные образцы с малыми (около 100 nm) характерными размерами и использовать очень высокую плотность электрического тока [6,7], что делает такие эксперименты достаточно сложными, а сам

принцип управления спиновым током — неприемлемым для практического использования.

В настоящей работе описан метод управления спиновым током в многослойных гетерогенных магнитных нанопленках с помощью наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов. Перспектива использования такого метода для управления спиновым током в элементах спинтроники базируется не только на результатах наших предыдущих исследований [8], но и на результатах других авторов [8,9], где получено сверхбыстрое перемагничивание магнитных нанослоев фемтосекундными лазерными импульсами.

### Перемагничивание магнитных нанослоев в поле

Рассмотрим трехслойную магнитную пленочную структуру, которая состоит из двух магнитных нанослоев, разделенных между собой более тонким проводящим или непроводящим немагнитным нанослоем. Перемагничивание магнитных нанослоев при облучении такой структуры лазерным излучением может быть обусловлено как тепловым, так и нетепловым влиянием этого излучения. Нагрев магнитного слоя может вызывать уменьшение его коэрцитивной силы и перемагничивание во внешнем или в размагничивающем магнитном поле. Такой процесс перемагничивания хорошо известен и широко используется для магнитооптической записи информации [11,12] в ферримагнитных пленках с перпендикулярной анизотропией, в которых наблюдается сильная зависимость магнитных характеристик от температуры.

Более интересным и перспективным с точки зрения использования в спинтронике является нетепловое воздействие лазерного излучения на магнитные свойства

пленок. Наиболее сильное нетепловое влияние на магнитные характеристики магнитных нанослоев оказывают локальные магнитные поля, создаваемые лазерным излучением за счет обратного магнитооптического эффекта Фарадея [13], и инжекции в этот слой большой концентрации неравновесных поляризованных электронов [8,14,15].

Обратный магнитооптический эффект Фарадея пропорционален квадрату напряженности поля световой волны, и при циркулярной поляризации лазерного излучения вследствие этого эффекта в среде возникает неравновесная намагниченность, направленная вдоль направления распространения лазерного пучка [13]

$$\mathbf{M}_i = \frac{\chi}{16\pi} [\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*], \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}_i$  — лазерно-индуцированная намагниченность среды,  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля световой волны,  $\chi$  — магнитооптическая восприимчивость среды.

В тонких магнитных проводящих пленках значения величины намагниченности  $\mathbf{M}_i$ , индуцируемой циркулярно-поляризованной световой волной с напряженностью электрического поля  $\mathbf{E}$ , можно найти из рассмотрения циркулярного тока, индуцированного лазерным излучением [16]

$$\mathbf{M}_i = \frac{ie^3N}{4(m_e^*)^2\omega^3} [\mathbf{E} \times \mathbf{E}^*], \quad (2)$$

где  $e$ ,  $m_e^*$  и  $N$  — заряд, эффективная масса и средняя концентрация электронов проводимости соответственно;  $\omega$  — частота лазерного излучения.

Направление вектора намагниченности изменяется с изменением направления вращения вектора поля циркулярно-поляризованного электромагнитного излучения на противоположное, поэтому используя лазерное излучение с правовращающейся или левовращающейся циркулярной поляризацией, можно намагнитить магнитный слой в направлении распространения лазерного пучка или против него. При этом интенсивность лазерного излучения должна быть достаточно высокой — такой, чтобы генерируемое магнитное поле было больше коэрцитивной силы магнитного слоя.

Из (2) для оценки напряженности магнитного поля  $H_i$ , индуцированного циркулярно-поляризованным излучением в магнитной пленке с магнитной проницаемостью  $\mu$  получим следующее выражение:

$$H_i = \frac{|\mathbf{M}_i| \mu}{4\pi\mu_0} = \frac{e^3\mu N E^2}{16\pi\mu_0 n (m_e^*)^2 \omega^3} = \frac{e^3\mu N I}{8\pi\mu_0 c \varepsilon_0 n (m_e^*)^2 \omega^3}, \quad (3)$$

где  $I$  и  $n$  — интенсивность и показатель преломления лазерного излучения соответственно,  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  — абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость.

При  $I = 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>,  $N \approx 10^{22}$  см<sup>-3</sup>,  $\mu/\mu_0 = 10^3 - 10^4$ ,  $n = 3$  и  $\omega = 10^{14}$  с<sup>-1</sup> напряженность магнитного поля, создаваемого за счет обратного магнитооптического эффекта Фарадея, может достигать значений  $H_i = 5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$  А/м.

Генерируемое лазерным излучением магнитное поле может перемагничивать как одиночные нанослои, так и нанопленки, состоящие из нескольких магнитных слоев, суммарная толщина которых меньше обратного значения коэффициента поглощения лазерного излучения. Понятно, что перемагничивать за счет обратного магнитооптического эффекта Фарадея можно только магнитные слои с перпендикулярной анизотропией, и интенсивность лазерного излучения должна быть достаточно высокой, чтобы генерируемое магнитное поле было больше коэрцитивной силы магнитного слоя.

В отличие от обратного магнитооптического эффекта Фарадея механизм перемагничивания магнитного нанослоя за счет инжекции в него большой концентрации неравновесных поляризованных электронов [6–8,14,15] реализуется только в пленках, состоящих из двух и более нанослоев. Первый по ходу лазерного излучения магнитный слой должен быть источником поляризованных электронов, которые инжектируются во второй магнитный слой за счет фотонного давления лазерного излучения [14,17]. Такой электрический ток создает не только хорошо известное магнитное поле  $H_j = k_j j$ , величина которого пропорциональна плотности тока инжекции, но также является причиной возникновения во втором слое локальной неравновесной намагниченности  $M_s = kS = k\gamma \sum s$ , величина которой пропорциональна суммарному магнитному моменту спинов инжектированных электронов [6].

Магнитное поле электрического тока  $H_j$  действует в плоскости магнитного нанослоя, а поле спинового момента  $H_s$  — в зависимости от направления намагниченности первого магнитного слоя может быть направлено как в плоскости второго слоя, так и перпендикулярно ей. Сравнение этих двух величин показывает [6,14], что

$$\frac{H_j}{H_s} \approx kr_0, \quad (4)$$

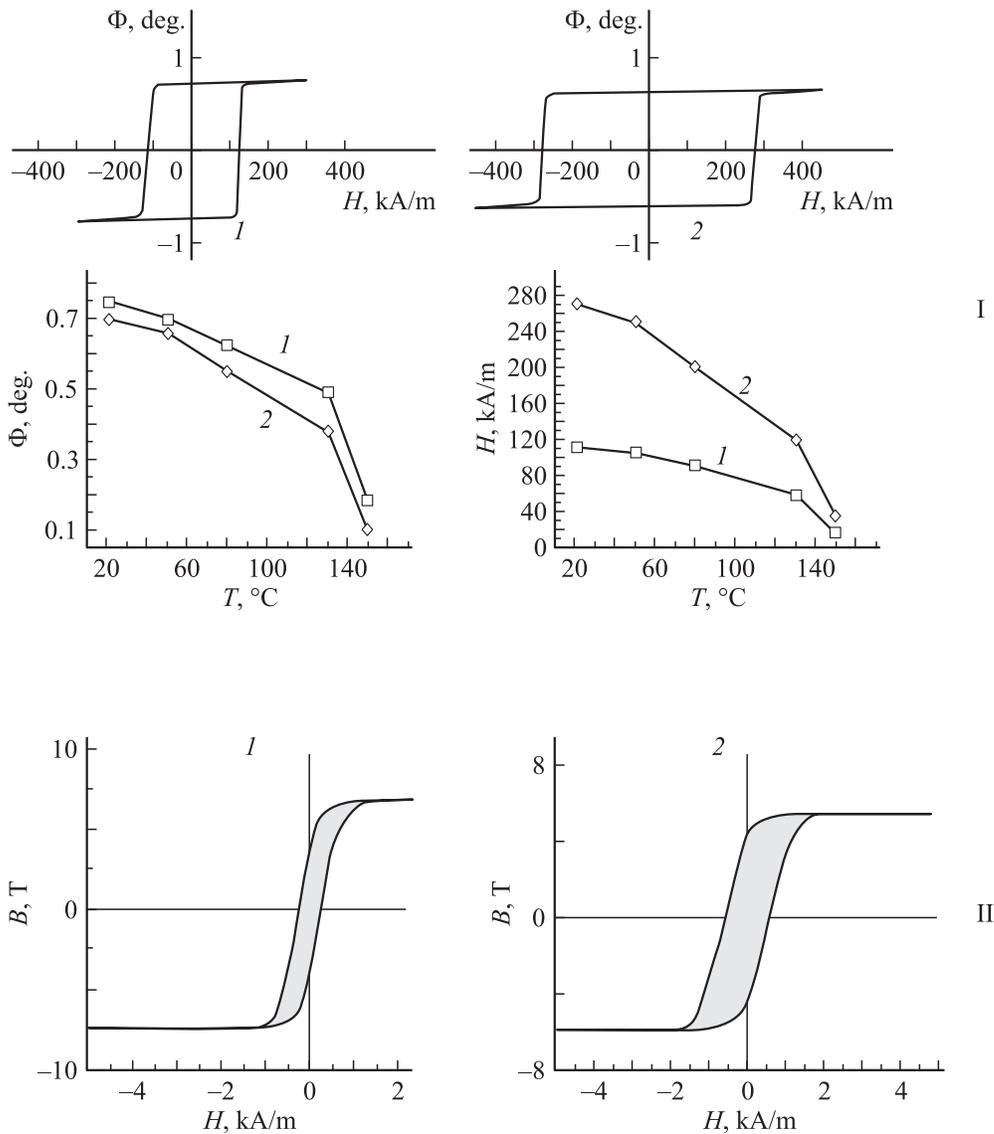
где  $r_0$  — радиус лазерного пучка.

Величины магнитного поля  $H_j$  и  $H_s$  можно найти из выражения для плотности тока, возникающего под действием фотонного давления лазерного излучения [14,18]

$$j_s = -e\alpha(1-R)I \frac{n_0\tau_p\eta\xi}{m_e c}, \quad (5)$$

где  $I$ ,  $\alpha$ ,  $R$  и  $n_0$  — интенсивность, коэффициенты поглощения и отражения и показатель преломления лазерного излучения первым магнитным слоем соответственно;  $\tau_p$  и  $m_e$  — время релаксации импульса и эффективная масса электрона в этом слое;  $\eta < 1$  и  $\xi < 1$  — коэффициенты, характеризующие передачу импульса фотонов электронам и эффективность прохождения электронов из первого магнитного слоя во второй слой,  $c$  — скорость света.

Тогда для оценки величины магнитного поля, создаваемого инжектируемыми лазерным излучением электро-



**Рис. 1.** I — кривые изменения угла Керра ( $\Phi$ ) и величины коэрцитивной силы ( $H$ ) для нанослоев  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  (1) и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  (2); II — кривые перемагничивания для нанослоев  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  (1) и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  (2).

нами, можно использовать следующие выражения:

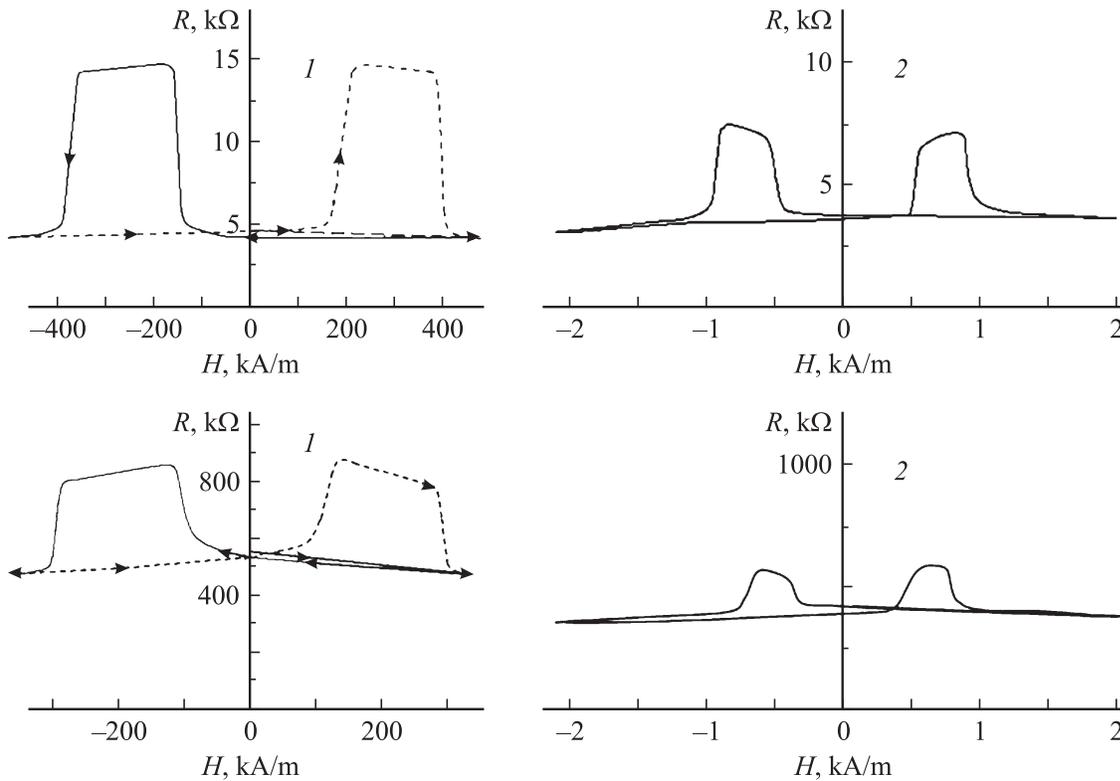
$$\begin{aligned} H_j &= -A_j e \alpha (1 - R) I h_0 \frac{n_0 \tau_p \gamma \xi}{2 m_e c}, \\ H_s &= -A_s e \alpha (1 - R) I \mu_B \frac{n_0 \tau_p \gamma \eta \xi}{2 \mu_0 m_e c}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $h_0$  — толщина магнитных слоев;  $\gamma < 1$  — коэффициент, характеризующий степень поляризации электронов в первом магнитном слое;  $\mu_B$  и  $\mu_0$  — магнетон Бора и абсолютная магнитная проницаемость;  $A_i$  — коэффициент размагничивания.

При  $I = 1 \text{ MW/cm}^2$ ,  $\alpha = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,  $R = 0.5$ ,  $n_0 = 2$ ,  $\tau_p = 10^{-10} \text{ s}$ ,  $A_i = 0.05$  и  $\gamma = 0.5$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $h_0 = 10^{-6} \text{ cm}$  и  $\xi = 0.5$  получим значения  $H_j > 2 \cdot 10^6$  и  $H_s > 10^6 \text{ A/m}$ , что обычно намного больше величины коэрцитивной силы большинства магнитных нанослоев.

## Эксперимент и полученные результаты

Экспериментальные исследования влияния лазерного излучения на величину спинового тока проводились на туннельных микроконтактах  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . Микроконтакты с проводящей площадью около  $S = 40 \mu\text{m}^2$  формировались методом лазерной фотолитографии в зоне пересечения двух скрещенных полосок магнитного материала, разделенных тонкой немагнитной прослойкой  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ . Толщина магнитных слоев была около 20 нм и немагнитной прослойки 2–3 нм. В качестве подложек использовались пластинки из плавленного кварца размером  $10 \times 14 \text{ mm}$ . На край подложки наносилась пластина, через которую подводился ток к туннельным контактам  $\text{TbCoFe}$  и  $\text{CoFe}$ . Зона туннельного контакта и проводящие полоски защищались покрытием  $\text{Al}_2\text{O}_3$



**Рис. 2.** Изменение сопротивления туннельных микроконтактов  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  (1) и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  (2) при перемагничивании внешним магнитным полем при  $T = 80$  К (вверху) и  $T = 300$  К (внизу).

толщиной около 40 nm. Перед измерениями проводилось тестирование микроконтактов и отбирались микроконтакты с близким по величине значением туннельного сопротивления.

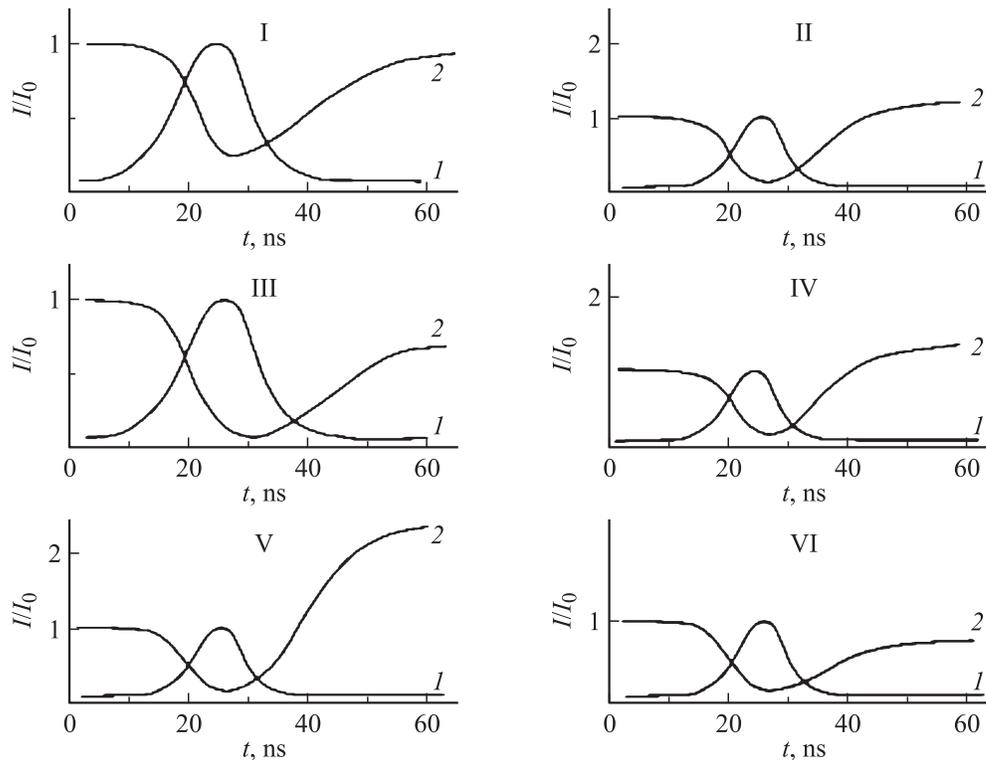
Ферромагнитные нанопленки аморфных сплавов редкоземельных и переходных металлов TbCoFe имеют большую энергию перпендикулярной анизотропии и сильную зависимость коэрцитивной силы от температуры [19,20]. Различие в концентрации составляющих в нанослоях  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  и  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  обеспечивает сильное различие в коэрцитивной силе этих слоев. При  $T = 300$  К коэрцитивная сила слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  составляла  $H_1 \approx 3 \cdot 10^5$  А/м и слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$   $H_2 \approx 1.2 \cdot 10^5$  А/м (рис. 1).

Коэрцитивная сила ферромагнитных нанослоев  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  из-за различия состава также заметно отличается. В  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$   $H'_1 \approx 300$  А/м и в  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$   $H'_2 \approx 800$  А/м (рис. 1). При напылении пленок CoFe подложка находилась в постоянном магнитном поле, что позволяло нам сформировать туннельный микроконтакт  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  с малой дисперсией одноосной анизотропии магнитных слоев в плоскости.

Если также учесть, что нами ранее в туннельном микроконтакте  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  получено достаточно большое значение туннельного магнитосопротивления [21], то можно сказать, что исследуемые в данной работе микроконтакты не только являются

удобной модельной средой для изучения процесса переключения их проводимости лазерным излучением, но и могут иметь хорошую перспективу применения.

В работе исследовалось влияние наносекундных ( $\tau_i = 15$  ns) и пикосекундных ( $\tau_i \approx 80$  ps) импульсов Nd:YAG лазера ( $\lambda = 1.06$   $\mu\text{m}$ ) и внешнего магнитного поля на величину сопротивления наших микроконтактов. При измерениях лазерный пучок фокусировался на микроконтакт с одной или другой стороны. С помощью фильтров интенсивность излучения  $I_i$  изменялась от 10 до 50  $\text{MW}/\text{cm}^2$  для наносекундных лазерных импульсов и от 100  $\text{kW}/\text{cm}^2$  до 10  $\text{GW}/\text{cm}^2$  для пикосекундных импульсов. Перед облучением нанослой в микроконтакте намагничивались магнитным полем в одном направлении ( $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) или в противоположных ( $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ). Внешнее магнитное поле прикладывалось вдоль оси легкого намагничивания магнитных нанослоев (для  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  перпендикулярно плоскости пленки и для  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  вдоль плоскости пленки). Величина магнитного поля изменялась от 0 до  $8 \cdot 10^5$  А/м. Результаты измерений зависимости величины туннельного сопротивления  $R$  от магнитного поля для лучших образцов микроконтактов представлены на рис. 2.



**Рис. 3.** Влияние линейно-поляризованных импульсов Nd:YAG-лазера (1) на сопротивление контактов (2)  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  (I, II, V),  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  (III),  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  (IV) и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  (VI): I —  $I_i = 100 \text{ kW/cm}^2$ ,  $H = 30 \text{ kA/m}$  и  $T = 300 \text{ K}$ ; II —  $I_i = 1 \text{ MW/cm}^2$ ,  $H = 30 \text{ kA/m}$  и  $T = 300 \text{ K}$ ; III —  $I_i \approx 1 \text{ MW/cm}^2$ ,  $H = 30 \text{ kA/m}$  и  $T = 300 \text{ K}$ ; IV —  $I_i \approx 10 \text{ MW/cm}^2$ ,  $H = 280 \text{ kA/m}$  и  $T = 80 \text{ K}$ ; V —  $I_i = 5 \text{ MW/cm}^2$ ,  $H = 50 \text{ kA/m}$  и  $T = 80 \text{ K}$ ; VI —  $I_i \approx 10 \text{ MW/cm}^2$ ,  $H = 280 \text{ kA/m}$  и  $T = 80 \text{ K}$ .

Если определять величину туннельного магнитосопротивления (TMR) как

$$\text{TMR} = (R_{\max} - R_{\min})/R_{\min}, \quad (7)$$

где  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  — максимальное и минимальное значения сопротивления [22], то получим для микроконтакта  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  при  $T = 300 \text{ K}$  величину  $\text{TMR} > 70\%$  и  $\text{TMR} > 240\%$  при  $T = 80 \text{ K}$ . Для микроконтакта  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  соответствующие величины TMR были меньше и достигали значений  $\approx 25\%$  при  $T = 300 \text{ K}$  и  $\approx 100\%$  — при  $T = 80 \text{ K}$ .

Проведенные нами исследования влияния лазерного излучения на сопротивление микроконтактов показали (рис. 3), что при малой интенсивности сопротивление микроконтактов в момент действия лазерного импульса падает, но после окончания импульса снова возвращается практически к начальной величине. При большой интенсивности лазерного излучения сопротивление микроконтактов после окончания лазерного импульса изменяется, а характер таких изменений зависит от состояния намагниченности магнитных слоев, от интенсивности, поляризации и даже от направления падения лазерного пучка на контакт. Одновременное действие мощного лазерного импульса и магнитного поля, на-

правленного навстречу намагниченности низкокоэрцитивного магнитного слоя в микроконтакте ( $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ ) практически всегда позволяет получить изменение проводимости этого микроконтакта. Величина напряженности магнитного поля при этом должна быть немного меньше величины коэрцитивной силы низкокоэрцитивного магнитного слоя в микроконтакте.

В микроконтактах с намагниченными в одном направлении магнитными слоями  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  после лазерного облучения в таком магнитном поле наблюдается увеличение начального сопротивления  $R_0$  на величину  $\Delta R$ . В лучших образцах микроконтактов  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  относительное увеличение сопротивления  $\Delta R$  после облучения в магнитном поле  $H = 40 \text{ kA/m}$  достигает  $\Delta R/R_0 = 0.5$  при  $T = 300 \text{ K}$  и 1.4 — при  $T = 80 \text{ K}$ . Тогда из (7) получаем для туннельного магнитосопротивления следующие значения:  $\text{TMR} = 50\%$  при  $T = 300 \text{ K}$  и 140% — при  $T = 80 \text{ K}$ . Для  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  при  $H = 200 \text{ A/m}$   $\Delta R/R_0 \leq 0.1$  и  $\text{TMR} = 10\%$  при  $T = 300 \text{ K}$  и  $\Delta R/R_0 \leq 0.6$   $\text{TMR} = 60\%$  — при  $T = 80 \text{ K}$ .

При очень большой интенсивности лазерного излучения и величине магнитного поля, близкой к значению коэрцитивной силы высококоэрцитивного магнитного

слоя ( $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ) сопротивление контакта в момент действия лазерного импульса также падает в несколько раз, но после его окончания снова возвращается практически к начальной величине. Отметим также, что для переключения проводимости в микроконтакте  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  необходимо тщательно подбирать напряженность внешнего магнитного поля и интенсивность лазерного излучения. В микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , для которых существует сильная зависимость коэрцитивной силы нанослоев  $\text{TbCoFe}$  от температуры, получить аналогичный результат намного проще.

При облучении микроконтактов с намагниченными в противоположных направлениях слоями  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  лазерными импульсами в магнитном поле, направленном навстречу намагниченности низкокоэрцитивного магнитного слоя, наблюдается уменьшение начального сопротивления  $R_1$  на величину  $\Delta R_1$ . При этом величина  $\Delta R_1$  немного меньше для случая намагниченных в одном направлении нанослоев  $\Delta R_1 < \Delta R$ , но найденные значения TMR для микроконтактов с намагниченными в противоположных направлениях слоями по своей величине примерно равны соответствующим значениям приведенным выше.

Для эффективного переключения проводимости на микроконтакты с намагниченными в одном направлении нанослоями  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  лазерное излучение лучше направлять со стороны низкокоэрцитивного магнитного слоя ( $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ ), а на микроконтакты с намагниченными в противоположных направлениях слоями  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  — со стороны высококоэрцитивного магнитного слоя ( $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ).

Описанное переключение проводимости микроконтактов  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76} / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  под действием лазерного излучения и магнитного поля хорошо согласуется с действием механизма терромагнитного перемагничивания низкокоэрцитивных слоев  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . В результате такого перемагничивания микроконтакты из низкоомного состояния с однонаправленной намагниченностью  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  переходят в высокоомное состояние с противоположно направленной намагниченностью  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . При очень больших значениях мощности лазерного излучения и больших значениях магнитного поля происходит терромагнитное перемагничивание обоих слоев микроконтакта, и он переходит из низкоомного состояния  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  в подобное низкоомное состояние  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \downarrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \downarrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . При таком

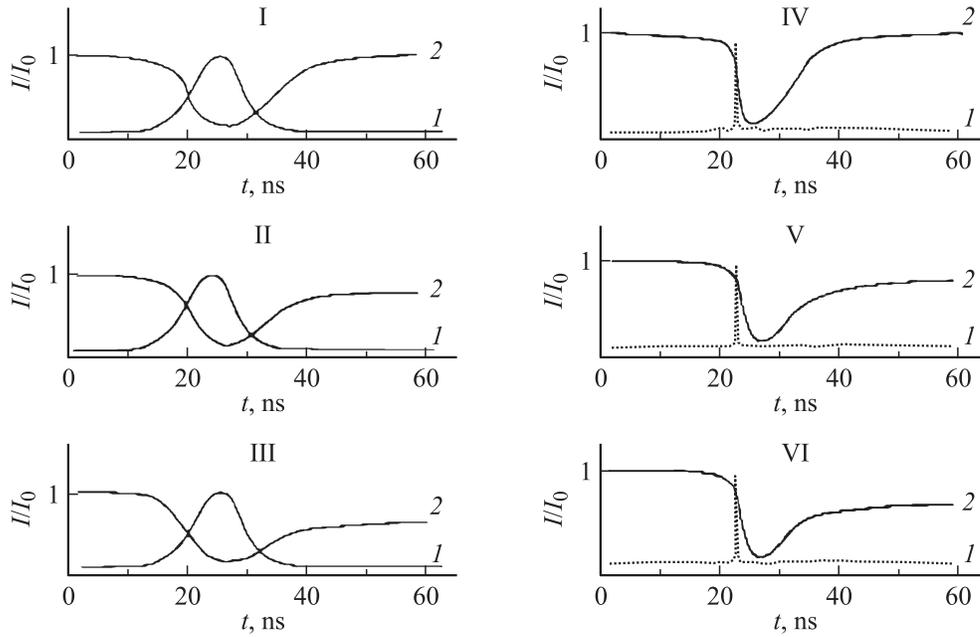
переходе проводимость микроконтактов практически не изменяется. Аналогично и в микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  при лазерном облучении в магнитном поле под действием терромагнитного механизма перемагничивания происходит переход в состояние  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ , и сопротивление микроконтакта уменьшается.

Без внешнего магнитного поля в микроконтактах  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ , где магнитные нанослои имеют одноосную анизотропию в плоскости и намагничены в одном направлении, нельзя получить переключение проводимости при облучении наносекундными и пикосекундными лазерными импульсами. В микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , где магнитные нанослои имеют перпендикулярную анизотропию, даже при намагниченных в одном направлении нанослоях при облучении циркулярно-поляризованными пикосекундными лазерными импульсами можно получить переключение проводимости без магнитного поля.

В микроконтактах с противоположно намагниченными слоями ( $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ) характер изменения сопротивления под действием мощных лазерных импульсов зависит от направления падения светового пучка на контакт и поляризации его излучения. Если неполяризованный или линейно-поляризованный лазерный пучок падает на такой микроконтакт со стороны низкокоэрцитивного слоя ( $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ), то получить переключение сопротивления микроконтакта без внешнего магнитного поля также нельзя. Для циркулярной поляризации пикосекундных лазерных импульсов можно получить переключение сопротивления микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и при падении лазерного пучка со стороны низкокоэрцитивного слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ .

Когда лазерный пучок падает на микроконтакт с противоположно намагниченными слоями со стороны высококоэрцитивного слоя ( $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ), то можно получить переключение проводимости и без магнитного поля как в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , так и в микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  (рис. 4). При переключении проводимости начальное сопротивление микроконтакта  $R_1$  уменьшается на  $\Delta R_2$ . Относительное значение  $\Delta R_2$  в лучших образцах микроконтактов  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  достигает  $\Delta R_2 / R_1 \leq 0.2$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R_2 / R_1 \leq 0.45$  при  $T = 80$  К, что дает TMR = 25% при  $T = 300$  К, 82% — при  $T = 80$  К. Для микроконтактов  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$   $\Delta R_2 / R_1 \leq 0.06$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R_2 / R_1 \leq 0.25$  при  $T = 80$  К, а соответственно TMR = 6% при  $T = 300$  К и 33% — при  $T = 80$  К.

Такое переключение проводимости под действием наносекундных лазерных импульсов происходит



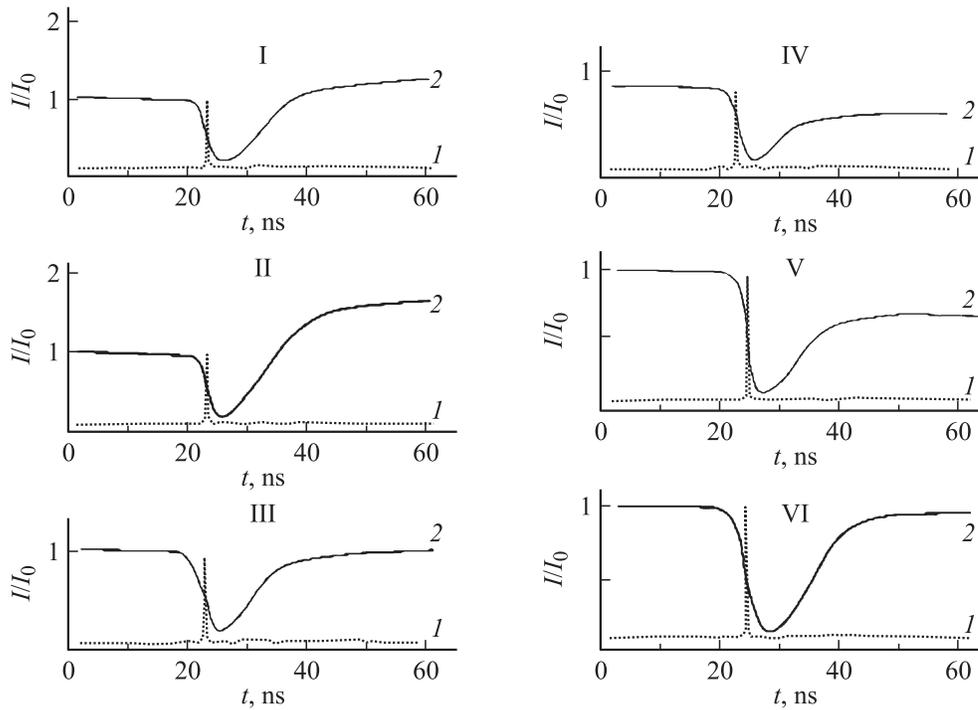
**Рис. 4.** Влияние линейно-поляризованных импульсов Nd:YAG-лазера (I) на сопротивление контактов  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  (I,II,V) и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  (III,IV,VI),  $H = 0$ : I — облучение со стороны слоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ ,  $I_i \approx 10 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ ; II — облучение со стороны слоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ,  $I_i \approx 10 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ ; III — облучение со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ,  $I_i \approx 1 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ ; IV — облучение со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ,  $I_i \approx 500 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ ; V — облучение со стороны слоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ,  $I_i \approx 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ ; VI — облучение со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ;  $I_i \approx 500 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ .

в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  при мощности  $P \geq P_{n1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76})$  и интенсивности  $I \geq I_{n1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76})$  лазерного излучения, а в микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  соответственно при  $P \geq P_{p1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70})$  и  $I \geq I_{n1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70})$ . Для пикосекундных лазерных импульсов эффект переключения достигается при более высоких значениях  $P \geq P_{p1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}) \gg P_{n1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76})$ ,  $P \geq P_{p1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}) \gg P_{n1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70})$  мощности и  $I \geq I_{p1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}) \gg I_{n1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76})$ ,  $I \geq I_{p1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}) \gg I_{n1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70})$  интенсивности излучения. Причем для наносекундных импульсов переключение проводимости в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  происходит при интенсивности излучения меньшей, чем в микроконтакте  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$   $I_{n1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}) \approx 2I_{n1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76})$ , а для пикосекундных импульсов имеем противоположное соотношение между интенсивностями переключения  $I_{p1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}) > I_{p1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70})$ .

Полученные результаты позволяют считать, что при лазерном облучении микроконтактов с противоположно намагниченными слоями со стороны более высококоэрцитивного нанослоя ( $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ) происходит перемагничивание низкокоэрцитивного нанослоя ( $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ ) магнитным полем, создаваемым инжектированными в этот слой поляризованными электронами. Такие электроны инжектируются за счет фотонного давления лазерного излучения

из высококоэрцитивного нанослоя, намагниченно-го до состояния близкого к состоянию насыщения. Наблюдаемое различие в величинах  $P_{n1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76})$ ,  $P_{p1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70})$ ,  $P_{p1}(\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76})$  и  $P_{p1}(\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70})$  может быть связано с нагревом и снижением коэрцитивной силы слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  для наносекундных импульсов и с сильным влиянием на перемагничивание слоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  магнитного поля обычного электрического тока  $H_j$  для пикосекундных лазерных импульсов (см. формулу (6)).

При облучении наших микроконтактов лазерным излучением с круговой поляризацией для разного типа микроконтактов получаем различные результаты. В микроконтактах  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70} / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  основные закономерности изменения сопротивления под действием лазерного излучения с круговой поляризацией практически такие же, как и для излучения с линейной поляризацией. В микроконтактах  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76} / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  облучение пикосекундными импульсами с круговой поляризацией излучения позволяет получить переключение проводимости без внешнего магнитного поля не только при противоположной намагниченности слоев, но и для слоев, намагниченных в одном направлении. При облучении микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  наносекундными лазерными импульсами с круговой поляризацией излучения нельзя получить переключение проводимости без магнитного поля вплоть до порога разрушения контакта лазерным излучением.



**Рис. 5.** Влияние циркулярно-поляризованных импульсов Nd:YAG-лазера (1) на сопротивление контактов (2)  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  (I–III) и  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  (IV–VI): I–III, V, VI — облучение со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ; IV — облучение со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ; I, II, V, — правовращающаяся, III, IV, VI — левовращающаяся поляризация: I —  $I_i = 600 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ; II —  $I_i = 800 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ ; III —  $I_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,  $T = 80 \text{ K}$ ; IV —  $I_i = 500 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ; V —  $I_i = 700 \text{ MW/cm}^2$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ; VI —  $I_i = 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,  $T = 300 \text{ K}$ .

При облучении микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  пикосекундными лазерными импульсами с заданной (правовращающейся) циркулярной поляризацией излучения можно получить переключение проводимости без внешнего магнитного поля (рис. 5, I, II). Направление вращения этой правовращающейся поляризации излучения должно соответствовать поляризации, которая создает в магнитном слое  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  за счет обратного эффекта Фарадея магнитное поле, направленное навстречу намагниченности этого слоя. При противоположной поляризации лазерного излучения переключения проводимости не происходит (рис. 5, III).

После облучения микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  пикосекундными лазерными импульсами с соответствующей циркулярной поляризацией излучения сопротивление микроконтакта  $R_0$  возрастает до  $R_0 + \Delta R_3 < R_1$ . Полученное относительное изменение сопротивления в лучших образцах достигает значений  $\Delta R_3/R_0 = 0.3$  при  $T = 300 \text{ K}$  и  $0.7$  — при  $T = 80 \text{ K}$ , что дает для TMR значения 30 и 70% соответственно.

Необходимо отметить, что эффект увеличения сопротивления микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  достигается только в некотором диапазоне интенсивности излучения пикосекундных импульсов  $I_{p3} \approx 500\text{--}1000 \text{ MW/cm}^2$ . При увеличении мощности и соответственно интенсивности лазерного излучения в несколько раз сопротивление микроконтакта

после окончания импульса возвращается практически к своему начальному значению  $R_0$ . Этот факт показывает, что при очень большой интенсивности излучения создаваемое им магнитное поле вызывает в микроконтакте  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  перемагничивание не только низкокоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , но и высококоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ . В результате такого перемагничивания в противоположных направлениях двух магнитных нанослоев проводимость микроконтакта практически не изменяется (рис. 5, III).

В микроконтакте  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  с противоположно намагниченными слоями можно получить переключение проводимости без магнитного поля при облучении пикосекундными лазерными импульсами как со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , так и со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ . После облучения этого микроконтакта со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  излучением с левовращающейся циркулярной поляризацией, создающей магнитное поле в направлении намагниченности этого нанослоя, переключение проводимости микроконтакта из высокоомного состояния  $R_1$  в более низкоомное состояние  $R_1 - \Delta R_4 > R_0$  (рис. 5, IV) происходит при некоторой мощности  $P_{p4}$  и интенсивности  $I_{p4}$  лазерного излучения. При противоположной поляризации лазерного излучения (правовращающаяся поляризация) переключение проводимости в этом микроконтакте происходит при более высокой (примерно в два раза) мощности  $P_{p5}$  и интенсивности лазерного излучения  $I_{p5}$ .

При облучении микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  пикосекундным лазерным импульсом с правополяризованной поляризацией излучения, создающей магнитное поле, направленное навстречу намагниченности этого слоя, переключение проводимости микроконтакта (рис. 5, V) происходит при более высоких значениях (примерно в полтора раза) мощности  $P_{p6}$  и интенсивности излучения  $I_{p6}$ , чем при облучении со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$   $P_{p6} > P_{p4}$  и  $I_{p6} > I_{p4}$ . Сопротивление микроконтакта после переключения проводимости уменьшается на величину  $\Delta R_6 \approx \Delta R_4$ . Для противоположной поляризации лазерного излучения, создающей магнитное поле, направленное по намагниченности нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и навстречу намагниченности нанослоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ , переключение проводимости микроконтакта происходит при еще более высокой мощности  $P_{p7} > P_{p6}$  и интенсивности лазерного излучения  $I_{p7} > I_{p6}$ . Сопротивление микроконтакта после переключения проводимости при этом уменьшается на  $\Delta R_7 \approx \Delta R_6$ . В лучших образцах микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  относительное изменение сопротивления после переключения проводимости под действием пикосекундных лазерных импульсов достигает значений  $\Delta R_4/R_1 = 0.2$  при  $T = 300$  К и 0.4 — при  $T = 80$  К. Соответственно для TMR получим значения 25 и 66%.

Эти результаты показывают, что с помощью циркулярно-поляризованных пикосекундных лазерных импульсов в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , где магнитные нанослои имеют перпендикулярную анизотропию, можно получить переход из высокоомного состояния  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  с сопротивлением  $R_1$  в низкоомное состояние  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  с сопротивлением  $R_1 - \Delta R_4$  и обратный переход в высокоомное состояние. Этот переход достигается при перемагничивании низкокоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  магнитным полем, создаваемым лазерным излучением за счет обратного эффекта Фарадея. При очень высокой мощности излучения пикосекундных лазерных импульсов можно получить перемагничивание не только низкокоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , но и высококоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ . Вследствие такого перемагничивания микроконтакт из высокоомного  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  или низкоомного состояния  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  переходит в низкоомное состояние  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\downarrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и его сопротивление практически не изменяется.

Когда пикосекундный лазерный импульс падает на микроконтакт  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , то перемагничивание этого нанослоя происходит под действием магнитного поля, созданного только за счет обратного эффекта Фарадея. Когда пикосекундный лазерный импульс падает на указанный микроконтакт со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ , то в перемагничивание нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  свой вклад

наряду с обратным эффектом Фарадея вносит и инжекция в этот слой поляризованных электронов (см. формулу (6)). Это приводит к снижению необходимой для переключения проводимости микроконтакта мощности пикосекундного лазерного импульса. Перемагничивание высококоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  пикосекундными лазерными импульсами с циркулярной поляризацией излучения происходит практически под действием магнитного поля, генерируемого в этом слое за счет обратного эффекта Фарадея.

## Заключение

Таким образом, полученные в данной работе результаты показывают, что эффекты перемагничивания магнитных нанослоев под действием наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов можно использовать для создания систем и элементов быстродействующего управления спиновым током. Для эффективной работы таких оптически управляемых спиновых элементов необходимо не только разрабатывать конструкцию и выбирать магнитные материалы с заданными характеристиками, но задавать длительность, интенсивность и поляризацию управляющего лазерного излучения.

Так, в туннельном микроконтакте  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  с намагниченными в одном направлении магнитными нанослоями, которые имеют одноосную анизотропию в плоскости, получить переключение проводимости при облучении лазерными импульсами можно только при наличии внешнего магнитного поля. При этом увеличение сопротивления микроконтакта достигается за счет термомагнитного перемагничивания низкокоэрцитивного нанослоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и перехода микроконтакта в состояние  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . Для случая противоположной намагниченности нанослоев в данном микроконтакте  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  можно получить переключение проводимости и переход микроконтакта в низкоомное состояние  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и без внешнего магнитного поля, но только при облучении лазерными импульсами микроконтакта со стороны слоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ . Перемагничивание нанослоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  в этом случае происходит под действием магнитного поля спинового тока поляризованных электронов, инжектированных в этот слой из нанослоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  в результате фотонного давления лазерного излучения.

Более эффективное управление спиновым током с помощью наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов можно реализовать при использовании магнитных нанослоев с перпендикулярной анизотропией. Так, в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , где магнитные нанослои имеют такую анизотропию, с помощью циркулярно-поляризованных пикосекундных лазерных импульсов без внешнего магнитного поля достигается переключение проводимости как при высокоомном состоянии микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , так и

при его низкоомном состоянии  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ . Изменение сопротивления для спинового тока возникает за счет перемагничивания низкоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  магнитным полем, создаваемым в этом слое пикосекундными лазерными импульсами с заданной (правовращающейся или левовращающейся) поляризацией за счет обратного эффекта Фарадея. Если направлять лазерные импульсы на контакт  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ , то перемагничивание нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  происходит при более низкой мощности лазерного излучения, что связано с действием магнитного поля инжектированных в этот слой поляризованных электронов. Эти электроны инжектируются из магнитного нанослоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  за счет фотонного давления лазерного излучения.

При термомагнитном механизме переключения проводимости в микроконтактах (лазерный импульс плюс магнитное поле) относительное изменение сопротивления в микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  достигает значений  $\Delta R/R_0 = 0.1$  при  $T = 300$  К и  $0.6$  — при  $T = 80$  К. В микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  при таком переключении  $\Delta R/R_0 = 0.5$  при  $T = 300$  К и  $1.4$  — при  $T = 80$  К. При переключении проводимости микроконтактов под действием только лазерного импульса без внешнего магнитного поля получены немного меньшие значения относительного изменения сопротивления. В микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$   $\Delta R/R_1 = 0.06$  при  $T = 300$  К и  $0.25$  — при  $T = 80$  К, а в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \uparrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$   $\Delta R/R_0 = 0.3$  при  $T = 300$  К и  $0.7$  — при  $T = 80$  К. При аналогичном переключении проводимости в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73} \uparrow / \text{Pr}_6\text{O}_{11} / \downarrow \text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  относительное изменение сопротивления достигает значения  $\Delta R/R_0 = 0.3$  при  $T = 300$  К,  $\Delta R_3/R_0 = 0.7$  — при  $T = 80$  К,  $\Delta R/R_1 = 0.2$  — при  $T = 300$  К и  $\Delta R_2/R_1 = 0.45$  — при  $T = 80$  К.

Полученные результаты говорят о перспективности использования наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов для высокоскоростного управления спиновым током в элементах спинтроники.

## Список литературы

- [1] Yuasa S., Djayaprawira D.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. P. R337.
- [2] Brataas A., Nazarov Yu.V., Bauer G.E.W. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 2481.
- [3] Pearton S.J., Norton D.P., Heo Y.W. et al // J. Electron. Mater. 2006. Vol. 35. P. 862.
- [4] Chen P., Moser J., Kotissek P. et al. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 74. P. 241 302.
- [5] Yue W., Bin H., Howe J. et al. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 75. P. 75 413.
- [6] Slonczewski J.C. // JMMM. 1996. Vol. 159. P. 1191.
- [7] Katine J., Albert F., Buhrman R. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 3149.
- [8] Крупа Н.Н. // ЖЭТФ. 2009. Т. 135. С. 981.
- [9] Stanciu C.D., Hansteen F., Kimel A.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 047 601.
- [10] Valhaplar K., Kalaschnikova A.M., Kimel A.V. et al // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 103. P. 117 201.
- [11] Johnson M.T., Jungblut R., Kelly P.J., Broeder F.J.A. // JMMM. 1995. Vol. 148. P. 118.
- [12] Komori M., Nukata T., Tsutsumi K. et al. IEEE Trans. Magn. 1984. Vol. 20. P. 1042.
- [13] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005. Т. 8. С. 484.
- [14] Крупа Н.Н. // ЖЭТФ. 2007. Т. 32. С. 782.
- [15] Krupa M.M., Korostil A.M. // Int. J. Mod. Phys. B. 2007. Vol. 21. P. 2339.
- [16] Hertel R. // JMMM. 2006. Vol. 303. P. L1.
- [17] Coff J.E., Shaide W.L. // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 61. P. 10 472.
- [18] Аскарьян Г.А., Рабинович М.С., Смирнова А.Д., Студенов В.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 5. С. 116.
- [19] Komorin M., Nukata T., Tsutsumi K. et al. // IEEE Trans. Magn. 1984. Vol. 20. P. 1042.
- [20] Крупа Н.Н., Кузьмак О.М., Карасева В.Ю. // Поверхность. 2001. № 11. С. 92.
- [21] Крупа Н.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87. С. 635.
- [22] Julliere M. // Phys. Lett. A. 1975. Vol. 54. P. 225.