

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦ С КОНДЕНСИРОВАННЫМ ВЕЩЕСТВОМ

PACS numbers: 72.25.Fe, 72.25.Mk, 73.63.Rt, 75.70.-i, 81.40.Rs, 85.75.Hh, 85.75.Mm

### Перемагничивание многослойных нанопленок и быстродействующее управление спиновым током с помощью пикосекундных лазерных импульсов

Н. Н. Крупа

*Институт магнетизма НАН и МОН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36<sup>б</sup>,  
03142 Киев, Украина*

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований перемагничивания магнитных нанопленок и переключение проводимости туннельных микроконтактов  $Tb_{19}Co_5Fe_{76}/Pr_6O_{11}/Tb_{22}Co_5Fe_{73}$  и  $Co_{80}Fe_{20}/Pr_6O_{11}/Co_{30}Fe_{70}$  при облучении их наносекундными и пикосекундными лазерными импульсами. Полученные результаты показывают, что с помощью пикосекундных лазерных импульсов даже без магнитного поля можно перемагничивать магнитные нанослои и тем самым управлять протекающим через исследуемые контакты спиновым током. Перемагничивание нанослоев происходит под действием магнитного поля, генерируемого лазерным излучением за счет обратного эффекта Фарадея, или магнитного поля, создаваемого инжектированными в этот слой спин-поляризованными электронами. При переключении проводимости микроконтактов под действием лазерного импульса относительные изменения сопротивления контактов  $Co_{80}Fe_{20}/Pr_6O_{11}/Co_{30}Fe_{70}$  достигают значений  $\Delta R/R_0 = 0,06$  при  $T = 300$  К,  $\Delta R/R_0 = 0,25$  при  $T = 80$  К, а контактов  $Tb_{22}Co_5Fe_{73}/Pr_6O_{11}/Tb_{19}Co_5Fe_{76}$  —  $\Delta R/R_0 = 0,3$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R/R_0 = 0,7$  при  $T = 80$  К.

У роботі представлено результати експериментальних досліджень перемагнетування магнетних наноплівки та перемикання провідності тунельних мікроконтактів  $Tb_{19}Co_5Fe_{76}/Pr_6O_{11}/Tb_{22}Co_5Fe_{73}$  і  $Co_{80}Fe_{20}/Pr_6O_{11}/Co_{30}Fe_{70}$  при опроміненні їх наносекундними й пікосекундними лазерними імпульсами. Одержані результати показують, що за допомогою пікосекундних лазерних імпульсів навіть без магнетного поля можна перемагнетувати магнетні нанощари і тим самим управляти спиновим струмом, що протікає через досліджувані контакти. Перемагнетування нанощарів відбувається під дією магнетного поля, генерованого лазерним випроміненням за рахунок оберненого ефекту Фарадея, або магнетного поля, створюваного інжекттованими у ці нанощари спин-поляризованими електронами. При перемиканні провід-

ности мікроконтактів під дією лазерного імпульсу відносні зміни опору контактів  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  досягають значень  $\Delta R/R_0 = 0,06$  при  $T = 300$  К і  $\Delta R/R_0 = 0,25$  при  $T = 80$  К, а контактів  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  —  $\Delta R/R_0 = 0,3$  при  $T = 300$  К і  $\Delta R/R_0 = 0,7$  при  $T = 80$  К.

This paper presents the results of experimental studies of both the magnetic reversal of  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  and  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  nanofilms and the conductivity switching in tunnelling microcontacts obtained on the base of these films irradiated by nanosecond and picosecond laser pulses. These results show that, by means of picosecond laser pulses even without a magnetic field, it is possible to remagnetize magnetic nanolayers and to govern the spin current flowing through the investigated contacts. Nanolayers remagnetization occurs under the magnetic field generated by the laser light due to the inverse Faraday effect or the magnetic field generated by spin-polarized electrons injected into this layer. If conduction of microcontacts is switched under the influence of the laser pulse, relative changes in resistance of  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  contacts reach the values of  $\Delta R/R_0 = 0.06$  at  $T = 300$  K and  $\Delta R/R_0 = 0.25$  at  $T = 80$  K, and for  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  contacts,  $\Delta R/R_0 = 0.3$  at  $T = 300$  K and  $\Delta R/R_0 = 0.7$  at  $T = 80$  K.

**Ключевые слова:** аморфные пленки, магнитный нанослой, лазерный импульс, спиновый ток, проводимость.

*(Получено 19 октября 2010 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенные магнитные многослойные нанопленки являются базовыми структурами для создания элементов спинтроники. Кроме задач по поиску материалов с высокой степенью спиновой поляризации электронов и создание на их основе новых элементов в спинтронике существует задача высокоскоростного изменения магнитного состояния управляющих элементов в локальной микрообласти. Решать эту задачу с помощью традиционных магнитных систем достаточно сложно. В работах [1, 2] рассмотрена возможность перемагничивания магнитных неоднородных наноструктур спиновым током. Мы предлагаем использовать для таких целей ультракороткие лазерные импульсы, что позволяет не только получить большой спиновый ток в направлении распространения лазерного пучка [3, 4], но и создавать в локальной микрообласти за счет обратного эффекта Фарадея [5, 6] значительное магнитное поле [7] и тем самым перемагничивать магнитные нанопленки с очень высокой скоростью.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе исследовалась динамика перемагничивания маг-

нитных нанослоев в пленке с одним магнитным нанослоем  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и в пленках с двумя магнитными нанослоями  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}/\text{Al}_2\text{O}_3$  при облучении наносекундными ( $\tau_i = 15$  нс) и пикосекундными ( $\tau_I \approx \approx 80$  пс) импульсами Nd:YAG-лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм). Изучалось также влияние этих лазерных импульсов на проводимость туннельных микроконтактов  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . Пленки напылялись методом магнетронного напыления на пластинки размером  $10 \times 14$  мм и на диски диаметром 110 мм из оптического плавленого кварца с толщиной 1,2 мм. Толщина магнитных нанослоев TbCoFe и CoFe составляла 20 нм, барьерного нанослоя  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  2–3 нм и защитного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 40 нм. Туннельные микроконтакты с проводящей площадью меньше  $S = 20$  мкм<sup>2</sup> изготавливались методом фотолитографии. Для измерений отбирались микроконтакты с близкими по величине значениями сопротивления.

Ферромагнитные аморфные пленки  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  и  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  имеют большую энергию перпендикулярной анизотропии [8, 9], что обеспечивает в них долговременную сохранность состояния намагниченности близкую к намагниченности насыщения, и высокую степень поляризации электронов проводимости. Ферромагнитные пленки CoFe в намагниченном состоянии также обладают достаточно высокой степенью поляризации электронов [10]. В наших образцах пленки  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  имели малую угловую дисперсию одноосной анизотропии намагниченности в плоскости. 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, слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$   $H_2 \approx 1,2 \cdot 10^5$  А/м, слоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$   $H_1' \approx 300$  А/м и слоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$   $H_2' \approx 800$  А/м, что позволяло нам перемагничивать магнитным полем низкокоэрцитивные нанослои  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  и  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  не изменяя направление намагниченности слоев  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  и  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ .

Динамика перемагничивания магнитных нанослоев в пленке  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Al}_2\text{O}_3$  изучалась по изменению фотоэлектрических сигналов, которые пропорциональны углу Керра или Фарадея в зоне действия лазерного излучения. Оптическая схема таких исследований описана в работах [3, 4]. Динамика перемагничивания магнитных нанослоев пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}/\text{Al}_2\text{O}_3$  при облучении лазерными импульсами изучалась по изменению тока, проходящего через туннельный контакт  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ .

Выполненные исследования показали, что в пленках  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Al}_2\text{O}_3$  перемагничивание нанослоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_7$  при облучении наносекундными лазерными импульсами происходит под действием внешнего магнитного поля или поля размагничивания по известному механизму термомагнитной записи информации [8]. При облучении этих пленок пикосекундными лазерными импульсами с циркулярной поляризацией излучения можно получить пе-

ремагничивание нанослоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  без внешнего магнитного поля под действием магнитного поля, генерируемого лазерным излучением за счет обратного магнитооптического эффекта Фарадея [6, 11]. Такое магнитное поле направлено вдоль распространения лазерного пучка, и величина его напряженности  $H_F$  в проводящих пленках выражается как [6]

$$H_F = \frac{|\mathbf{M}_F| \mu}{4\pi\mu_0} = \frac{e^3 \mu N E^2}{16\pi\mu_0 n (m_e^*)^2 \omega^3} = \frac{e^3 \mu N I}{8\pi\mu_0 c \varepsilon_0 n (m_e^*)^2 \omega^3}, \quad (1)$$

где  $I$  и  $\omega$  — интенсивность и частота лазерного излучения;  $c$  — скорость света;  $e$ ,  $m_e^*$  и  $N$  — заряд, эффективная масса и средняя концентрация электронов проводимости;  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость и диэлектрическая проницаемость пленки;  $\mu_0$  и  $\mu$  — абсолютная магнитная проницаемость и магнитная проницаемость пленки.

Оценки показывают [11], что величина  $H_F$  для магнитных пленок для пикосекундных лазерных импульсов при  $I = 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> может достигать довольно больших значений  $H_F > 10^5 - 10^6$  А/м. Перемагничивание за счет обратного эффекта Фарадея происходит для пленок с перпендикулярной анизотропией и при поляризации излучения, когда генерируемое магнитное поле направлено навстречу их намагниченности и его напряженность превышает значение коэрцитивной силы.

В пленке  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Al}_2\text{O}_3$  перемагничивание входного по ходу лазерного излучения нанослоя происходит по термомагнитному механизму, а также и за счет обратного эффекта Фарадея. В перемагничивании второго по ходу лазерного излучения нанослоя основную роль играет новый физический механизм, связанный со спиновым током, который возникает за счет фотонного давления лазерного излучения [4, 11]. Инжекция поляризованных электронов с первого магнитного слоя создает во втором слое неравновесное, магнитное поле, состоящее из магнитного поля электрического тока  $H_e$  и поля  $H_s$ , создаваемого суммарным магнитным моментом инжектированных спинов [1]. Поле  $H_e$  направлено в плоскости пленки, а поле  $H_s$ , направлено по направлению намагниченности первого магнитного слоя. Выполненные нами оценки напряженности магнитного поля, создаваемого спиновым током, возбужденным лазерным излучением [11],

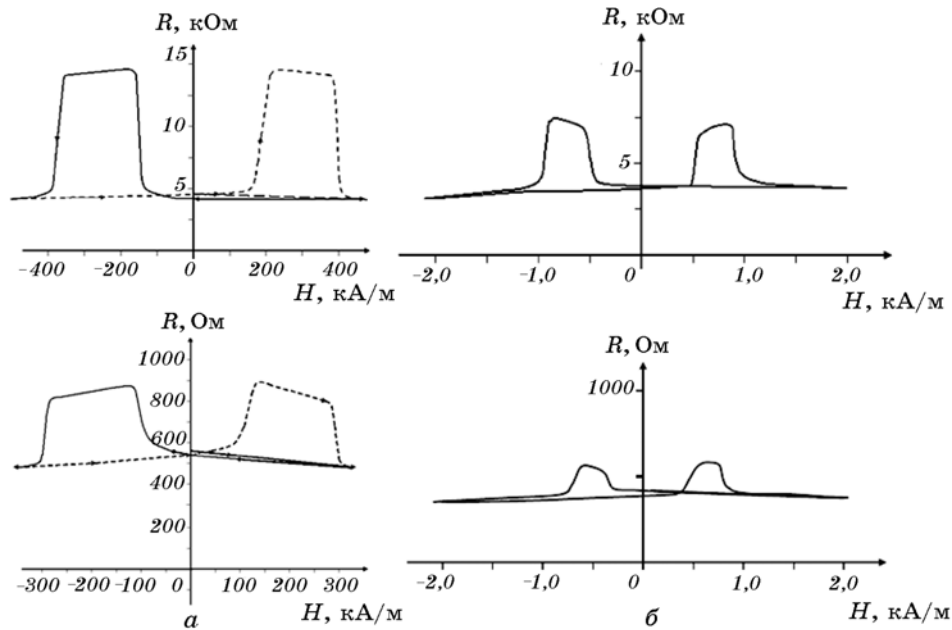
$$H_e = l_e \alpha (1 - R) I e r \frac{n_0 \tau_p \gamma \xi}{4\pi m_e c}, \quad H_s = l_s \alpha (1 - R) I \mu_B \mu \frac{n_0 \tau_p \tau_s \gamma \xi}{2\mu_0 h_1 m_e c} \quad (2)$$

показывают, что во втором магнитном слое по ходу лазерного излучения оно может достигать значительной величины. Даже при  $I = 100$  МВт/см<sup>2</sup> получаем  $H_e = 10^5 - 10^6$  А/м и  $H_s > 10^6$  А/м. В формуле

(2) использованы такие обозначения:  $\alpha$ ,  $R$  и  $n_0$  — коэффициент поглощения, отражения и показатель преломления лазерного излучения слоем TbCoFe;  $r$  — радиус лазерного пучка;  $h_1$  и  $m_e$  — толщина первого магнитного нанослоя и эффективная масса электрона в этом слое;  $\tau_i$ ,  $\tau_p$  и  $\tau_s$  — длительность лазерного импульса, время релаксации импульса и время спиновой релаксации;  $c$  — скорость света;  $\gamma < 1$ ,  $\eta < 1$  и  $\xi < 1$  — коэффициенты, характеризующие передачу импульса фотонов электронам в первом магнитном слое, степень поляризации электронов и эффективность прохождения электронов из первого магнитного слоя во второй слой;  $\mu_B$  — магнетон Бора;  $\mu$  — проницаемость среды;  $l_s$  — коэффициент пропорциональности.

Исследование микроконтактов  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  показало, что за счет возбужденного лазерным излучением спинового тока можно перемагничивать без внешнего магнитного поля и магнитных слоев с одноосной анизотропией в плоскости. В этих микроконтактах, как и в микроконтактах  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ , нами зафиксировано достаточно большое значение туннельного магнитосопротивления (ТМР) (рис. 1).

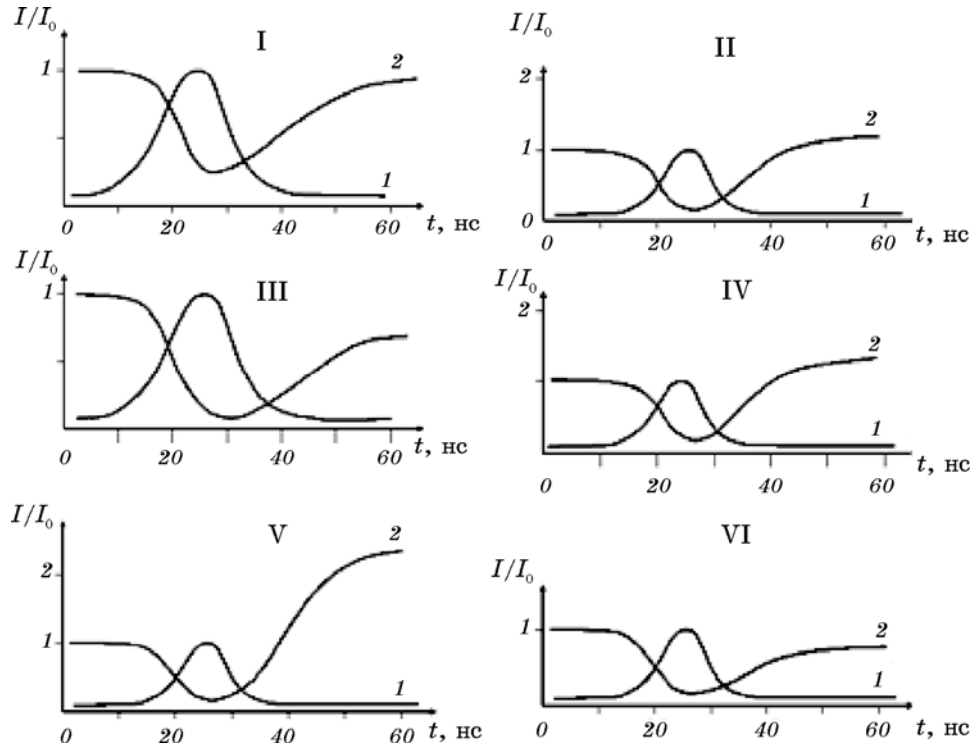
Под действием внешнего магнитного поля (рис. 2) в лучших образцах изменение сопротивления  $\Delta R$  по абсолютной величине достигает значений  $\Delta R/R_0 = 0,2$  при  $T = 300 \text{ К}$  и  $\Delta R/R_0 = 0,6$  при  $T =$



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

= 80 К в микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ , а в микроконтактах  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  —  $\Delta R/R_0 = 0,5$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R/R_0 = 1,4$  при  $T = 80$  К, что дает значения туннельного магнитосопротивления, определяемого как  $\text{TMR} = (R_{\max} - R_{\min})/R_{\min}$  [1], соответственно:  $\text{TMR} \approx 25\%$  при  $T = 300$  К и  $\text{TMR} \approx 100\%$  при  $T = 80$  К, а также  $\text{TMR} > 70\%$  при  $T = 300$  К и  $\text{TMR} > 240\%$  при  $T = 80$  К.

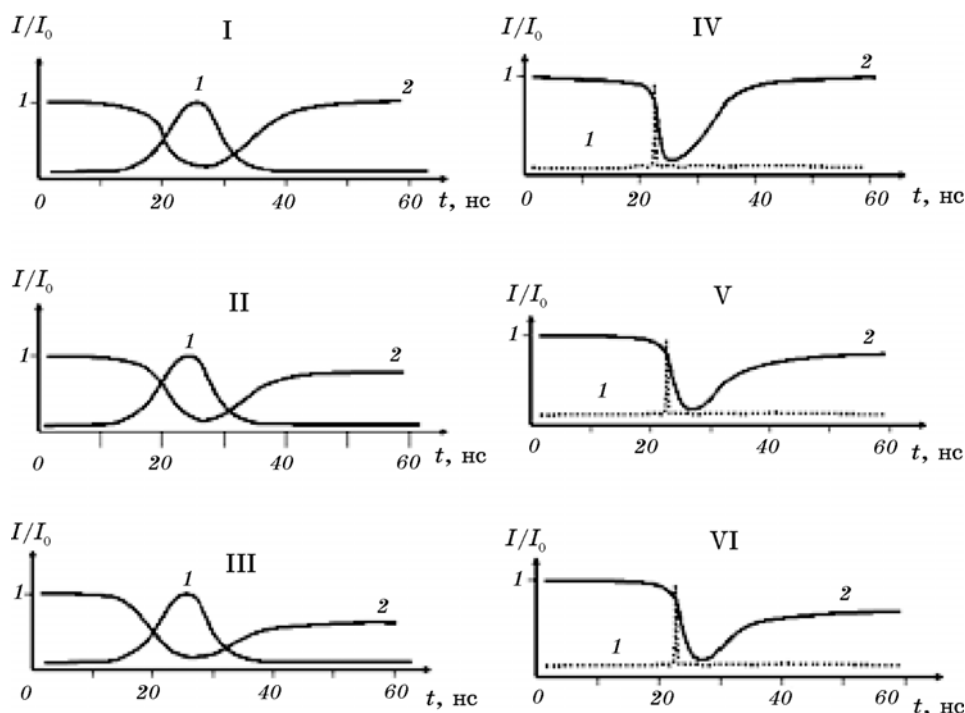
Более сложно получить изменения проводимости микроконтактов под действием лазерных импульсов при отсутствии внешнего магнитного поля. В микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  получить пере-



**Рис. 2.** Изменение сопротивления микроконтактов (кривая 2) при облучении со стороны низкоэрцитивного магнитного нанослоя линейно поляризованными импульсами Nd:YAG-лазера (кривая 1) в магнитном поле  $H$ , направленном навстречу намагниченности этого нанослоя: I — микроконтакт  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ , интенсивность лазерного излучения  $I_i = 100$  кВт/см<sup>2</sup>,  $H = 30$  кА/м,  $T = 300$  К; II — микроконтакт  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ,  $I_i \approx 1$  МВт/см<sup>2</sup>,  $H = 30$  кА/м,  $T = 300$  К; III — микроконтакт  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ,  $I_i \approx 1$  МВт/см<sup>2</sup>,  $H = 30$  кА/м,  $T = 300$  К; IV — микроконтакт  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ ,  $I_i \approx 10$  МВт/см<sup>2</sup>,  $H = 280$  А/м,  $T = 80$  К; V — микроконтакт  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ,  $I_i \approx 5$  МВт/см<sup>2</sup>,  $H = 50$  кА/м,  $T = 80$  К; VI — микроконтакт  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ ,  $I_i \approx 10$  МВт/см<sup>2</sup>,  $H = 280$  А/м,  $T = 80$  К.

ключение проводимости без внешнего магнитного поля под действием лазерных импульсов возможно только для микроконтакта с намагниченными в противоположных направлениях слоями  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . При этом лазерный импульс должен падать на микроконтакт со стороны высококоэрцитивного нанослоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  (рис. 3).

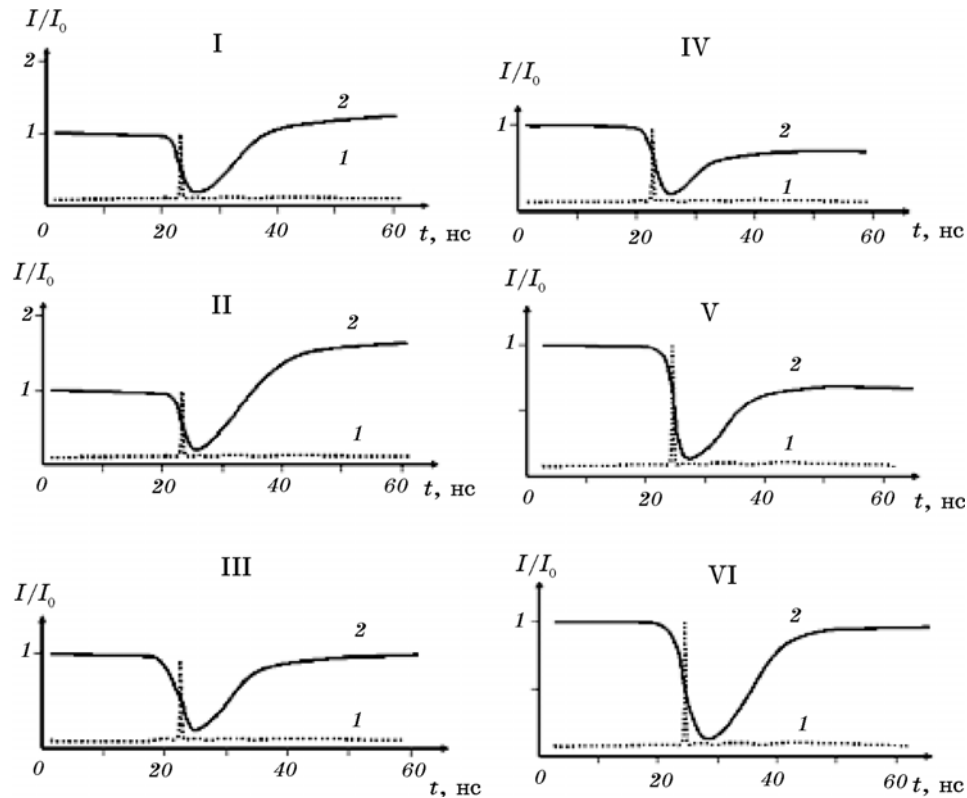
В туннельном микроконтакте  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  с намагниченными в одном направлении магнитными нанослоями, которые имеют одноосную анизотропию в плоскости, получить переключение проводимости при облучении лазерными импульсами без магнитного поля нельзя. 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 низкоом-



**Рис. 3.** Изменение сопротивления микроконтактов (кривая 2)  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  (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) под действием линейно поляризованных импульсов Nd:YAG-лазера (кривая 1) с интенсивностью излучения  $I_i$  без внешнего магнитного поля: I — импульс падает на микроконтакт со стороны слоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ ,  $I_i \approx 10 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ; II — импульс падает со стороны слоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ,  $I_i \approx 10 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ; III — импульс падает со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ,  $I_i \approx 1 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ; IV — импульс падает со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$ ,  $I_i \approx 1 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ; V — импульс падает со стороны слоя  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ ,  $I_i \approx 10 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ; VI — импульс падает со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$ ,  $I_i \approx 10 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ .

ное 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  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  (рис. 3).

При достижении некоторого уровня интенсивности излучения в лазерном импульсе сопротивление микроконтакта  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  после окончания лазерного импульса остается меньшим своего начального значения  $R_0$  на величину  $\Delta R_0$ , что свидетельствует о перемагничивании нанослоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  и переходе микроконтакта из состояния  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  в состояние  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . Перемагничивание нанослоя  $\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$  в этом случае происходит посредством магнитного поля спинового тока поляризованных электронов, инжектированных в этот слой из нанослоя



**Рис. 4.** Изменение сопротивления микроконтактов (кривая 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) при облучении циркулярно поляризованными пикосекундными импульсами Nd:YAG-лазера (кривая 1) со стороны слоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  без внешнего магнитного поля: I — интенсивность излучения  $I_i = 100 \text{ кВт/см}^2$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ; II —  $I_i \approx 1 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ; III —  $I_i \approx 1 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 300 \text{ К}$ ; IV —  $I_i \approx 10 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ; V —  $I_i \approx 5 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ ; VI —  $I_i \approx 10 \text{ МВт/см}^2$ ,  $T = 80 \text{ К}$ .



$\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  под действием фотонного давления лазерного излучения. При этом в эффективное поле перемагничивания  $H_0$  дает вклад как  $H_s$ , так и  $H_e$ :  $H_0 = k_s H_s + k_e H_e$ , где  $k_s$  и  $k_e$  — коэффициенты пропорциональности.

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, с помощью лазерных импульсов без внешнего магнитного поля можно получить переключение проводимости как из высокоомного состояния микроконтакта  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  в низкоомное состояние. 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 намагниченными в противоположном направлении слоями переключение проводимости в низкоомное состояние  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  достигается при облучении со стороны слоя  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}$  наносекундными и пикосекундными лазерными импульсами любой поляризации (рис. 3). Обратный переход туннельного микроконтакта из низкоомного состояния  $\text{Tb}_{22}\text{Co}_5\text{Fe}_{73}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\uparrow\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  в высокоомное состояние можно получить только при облучении контакта пикосекундными циркулярно-поляризованными лазерными импульсами при поляризации лазерного излучения, которое создает в магнитном нанослое  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  за счет обратного эффекта Фарадея магнитное поле, направленное навстречу его начальной намагниченности (рис. 4). 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.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные в данной работе результаты показывают, что эффекты перемагничивания магнитных нанослоев под действием наносекундных и пикосекундных лазерных импульсов можно использовать для быстродействующего управления спиновым током. 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  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$ . 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 сто-

роны 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  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$  под действием фотонного давления лазерного излучения.

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, 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 в 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 при перемагничивании низкокоэрцитивного нанослоя  $\text{Tb}_{19}\text{Co}_5\text{Fe}_{76}$  магнитным полем, создаваемым пикосекундными лазерными импульсами за счет обратного эффекта Фарадея. Причем, 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 переключении проводимости микроконтактов под действием только лазерного импульса без внешнего магнитного поля мы получили следующие изменения сопротивления: в микроконтактах  $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\uparrow/\text{Pr}_6\text{O}_{11}/\downarrow\text{Co}_{30}\text{Fe}_{70}$   $\Delta R/R_0 = 0,06$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R/R_0 = 0,25$  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  $\Delta R/R_0 = 0,7$  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 и  $\Delta R/R_0 = 0,7$  при  $T = 80$  К  $\Delta R/R_0 = 0,2$  при  $T = 300$  К и  $\Delta R/R_0 = 0,45$  при  $T = 80$  К.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. C. Slonczewski, *JMMM*, **159**: 1191 (1996).
2. J. Katine, F. Albert, R. Buhrman et al., *Phys. Rev. Lett.*, **84**: 3149 (2000).
3. Н. Н. Крупа, *ЖЭТФ*, **132**: 782 (2007).
4. М. М. Крупа and А. М. Korostil, *Int. J. Mod. Phys. B*, **21**: 2339 (2007).
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред* (Москва: Физматлит: 1984).
6. R. Hertel, *J. Magn. Mater.*, **303**: L1 (2006).
7. M. Komori, T. Nukata, K. Tsutsumi et al., *IEEE Trans. Magn.*, **20**: 1042 (1984).
8. Н. Н. Крупа, О. М. Кузьмак, В. Ю. Карасева, *Поверхность*, № 11: 92 (2001).
9. M. Julliere, *Phys. Lett. A*, **54**: 225 (1975).
10. P. Chen, J. Moser, Ph. Kotissek et al., *Phys. Rev. B*, **74**: 241302 (2006).
11. Н. Н. Крупа, *ЖЭТФ*, **135**: 981 (2009).