

05,12

Нелинейность и гистерезис в продольном переносе тока в осажденных из лазерной плазмы слоях сплава CoSi/GaAs

© Е.С. Демидов, С.Н. Гусев, В.В. Подольский, В.П. Лесников, В.В. Сдобняков,
Л.И. Бударин, А.А. Тронов, Е.В. Скопин

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: Demidov@phys.unn.ru

(Поступила в Редакцию 14 января 2013 г.)

Исследовались электротранспортные свойства наноразмерных слоев сплава CoSi, осажденных при пониженной температуре (350°C) из лазерной плазмы на монокристаллический арсенид галлия. В продольном транспорте тока таких слоев обнаружены асимметрия ВАХ, свидетельствующая о спиновой поляризации носителей тока, существенные нелинейность (до 18%) и гистерезис (до 4%), как при комнатной температуре, так и при 77 К для сравнительно малых плотностей тока (до $5 \cdot 10^4$ А/см²). При 77 К в процессе повторения циклов измерений ВАХ наблюдались необратимые изменения электрических свойств слоев.

Работа поддержана грантами РФФИ № 05-02-17362, 08-02-01222а, 11-02-00855а, МНТЦ G1335, АВЦП РНП ВШ 2.1.1/2833, 2.1.1/12029, контрактом № 02.740.11.0672 с Министерством образования и науки РФ.

1. Введение

Переключаемые собственным током магнитные структуры с гистерезисными вольт-амперными характеристиками (ВАХ) интересны в связи с возможностью создания компактной магниторезистивной памяти, в которой в отличие от систем с управлением внешним магнитным полем нет надобности в дополнительных токовых шинах с медленным, спадающим с расстоянием по логарифмическому закону магнитным полем [1,2]. Нетрудно убедиться в том, что для перемагничивания магнитным полем собственного тока обычного (даже сравнительно магнитомягкого) ферромагнитного металла потребуются неприемлемая по величине плотность тока j свыше 10^8 А/см². Существенный прогресс в этом плане наметился в связи с идеей инжекции спин-поляризованных носителей тока в структурах спинового клапана (СК) — ферромагнетик/немагнитный проводник/ферромагнетик — или магнитного туннельного перехода (МТП) — ферромагнетик/диэлектрик/ферромагнетик [3,4]. Эффект переключения параллельной-антипараллельной ориентаций намагниченностей разделенных немагнитной прослойкой магнитных слоев и, следовательно, магнетосопротивления такой структуры при изменении направления тока был предсказан Берже и Слончевским [5,6], впервые наблюдался Кейтином и др. [7]. В первых экспериментах с металлическими структурами Co/Cu/Co для переключения током намагниченности требовалась слишком высокая плотность тока через структуру $\sim 10^7$ А/см². Авторам работы [8] удалось (правда, при гелиевых температурах) снизить на два порядка (до 10^5 А/см²) плотность тока переключения в полупроводниковой туннельной структуре GaMnAs/InGaAs/GaMnAs. В последнее время появились сообщения [9,10] о структурах СК и МТП с магнитными обкладками из сплавов Гейслера, в ко-

торых уже при комнатной температуре наблюдались гистерезисные ВАХ с плотностью тока переключения, сниженной до 10^6 А/см².

Настоящая работа посвящена поиску альтернативных вариантов реализации структур с гистерезисными ВАХ при исследовании нелинейности и гистерезиса в переносе тока в осажденных из лазерной плазмы однородных и неоднородных наноразмерных слоях новых магнитных материалов — разбавленных магнитных полупроводников на основе кремния и германия, легированных марганцем [11–14], или сплавов этих полупроводников с элементами группы железа. В [15] впервые был обнаружен высокотемпературный ферромагнетизм с точкой Кюри выше комнатной температуры и высокой коэрцитивной силой в осажденных из лазерной плазмы на подложки из монокристаллического кремния или арсенида галлия наноразмерных слоях сплава CoSi, не являющегося ферромагнитным при обычном сплавлении объемного кобальта и кремния. Ферромагнетизм слоев CoSi проявился при 77 и 293 К в ферромагнитном резонансе, гистерезисных аномальном эффекте Холла и магнитооптическом эффекте Керра. Вероятной причиной являются неоднородности, связанные с наноразмерными включениями кобальта или флуктуациями состава сплава. Неоднородность структуры может привести к неоднородной электропроводности и возможной концентрации плотности тока вблизи включений ферромагнитных фаз, возникновению повышенных локальных магнитных полей и, как следствие, перемагничиванию этих включений. Это в свою очередь скажется на изменении сопротивления в зависимости от величины и направления тока, что приведет к нелинейности и гистерезису ВАХ. Оказалось, что в лазерных слоях CoSi действительно проявились существенные нелинейность и гистерезис ВАХ при сравнительно малых величинах плотности тока (до $5 \cdot 10^4$ А/см²).

2. Методика эксперимента

Лазерное напыление слоев толщиной 40 nm производилось, как и в [15], на подогретые до 350°C пластины монокристаллического GaAs(100) на лазерной установке LQ 529 фирмы „Солар ЛС“ с активным элементом на основе YAG:Nd и возможностью испарения мишени излучением на второй гармонике. Содержание 3d-примеси контролировалось рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией и Оже-спектроскопией. Измерения продольного транспорта в слоях сплава CoSi/GaAs(100) проводились на образцах шириной 2–3 mm и длиной 5–6 mm по двухзондовой схеме с индиевыми контактами на анализаторе Agilent Technologies B1500. Мы убедились в пренебрежимо малом вкладе контактного сопротивления между металлическим индием и магнитным слоем. Измерения ВАХ образцов проводились в контакте с медным теплоотводом при комнатной температуре и в жидком азоте при 77 К. Для проверки воспроизводимости результатов измерений и выявления возможных необратимых изменений в магнитных слоях под воздействием тока проводилось несколько циклов записи ВАХ.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

По данным измерений электропроводности и эффекта Холла слои CoSi/GaAs(100) характеризуются полуметаллической дырочной проводимостью с концентрацией дырок $1.6 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ и сравнительно высокой их подвижностью $\sim 30 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Данные атомно-силовой микроскопии показали, что слои являются гладкими с неровностями в основном в пределах 5 nm, сплошными, без трещин или разрывов. Для проверки воспроизводимости результатов измерений ВАХ и выявления возможных необратимых изменений в магнитных слоях под воздействием тока проводилось несколько циклов записи зависимости напряжения U от тока I . В качестве меры нелинейности использовалась величина $[(dU/dI)_{\text{max}} - (dU/dI)_{\text{min}}]/R_0$ для одного полуцикла измерений ВАХ (прямого или обратного хода), а в качестве меры гистерезиса — максимальная разница между значениями относительного дифференциального сопротивления $R_{rd} = (dU/dI)/R_0$ для прямого и обратного хода ВАХ, где R_0 — среднее сопротивление образца. Результаты измерений относительного дифференциального сопротивления приведены на рис. 1–4. Явная на большинстве из этих рисунков асимметрия ВАХ образцов, в которых намеренно не создавались латеральные градиенты лигатуры, не может быть объяснена ни одним из известных обычных механизмов рассеяния носителей тока. По-видимому, эта асимметрия связана с участием в электротокке спин-поляризованных носителей заряда. При комнатной температуре образцы имели сопротивление около 205 Ω (рис. 1). В области сравнительно малых плотностей тока (до $5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$)

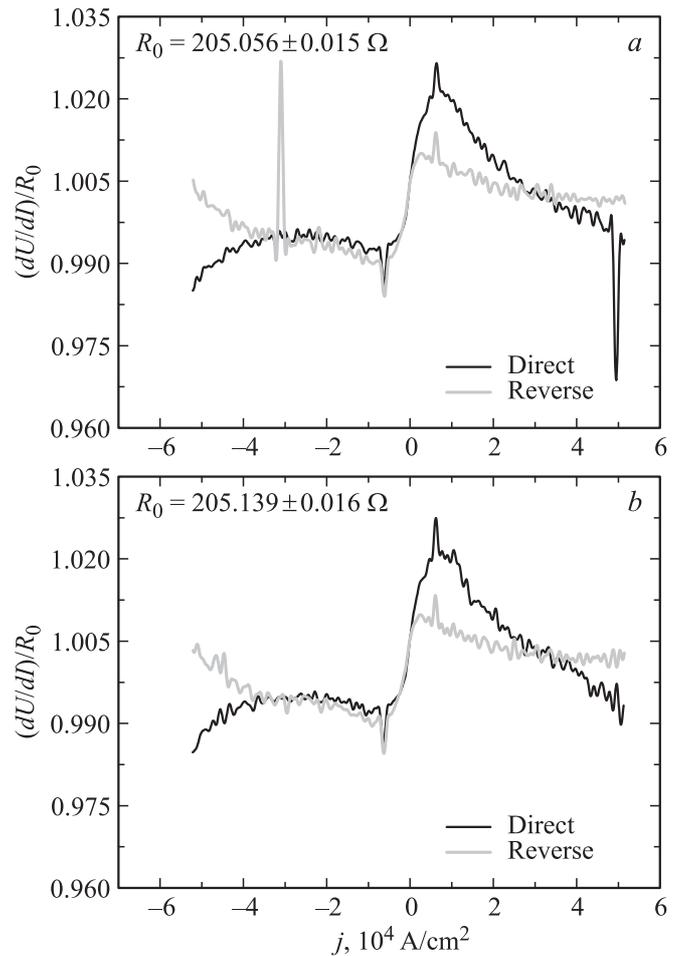


Рис. 1. Зависимость относительного дифференциального сопротивления от плотности тока при 293 К для слоя сплава CoSi толщиной 40 nm, осажденного из лазерной плазмы на подогретые до 350°C пластины монокристаллического GaAs с ориентацией (100). Первый (a) и второй (b) циклы измерения.

имеют место существенная нелинейность ($\sim 3\%$) и гистерезис ($\sim 1\%$) ВАХ при прямом и обратном ходе изменения тока. Нелинейность имеет интересный нечетный вид. Наблюдаются узкие выбросы величины сопротивления, причем эти ВАХ вместе с пиками сопротивления при $j \approx \pm 6 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ в основном воспроизводимы при повторении циклов измерений. Эти особенности ВАХ не могут быть связаны с перегревом, поскольку выделяемая мощность не превышала 20 mW и образец был плотно прижат к медному теплоотводу. Увеличение температуры с ростом плотности тока не может привести к нечетной зависимости отклонения сопротивления от его среднего значения R_0 . Пики сопротивления при $j = (3-5) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ исчезают при повторном цикле измерений. Это означает, что при таких плотностях тока начинаются необратимые изменения в магнитном слое.

Понижение температуры до 77 К, согласно рис. 2, приводит к уменьшению среднего сопротивления магнитного слоя на 5%. Повторение циклов регистрации ВАХ в интервале значений плотности тока

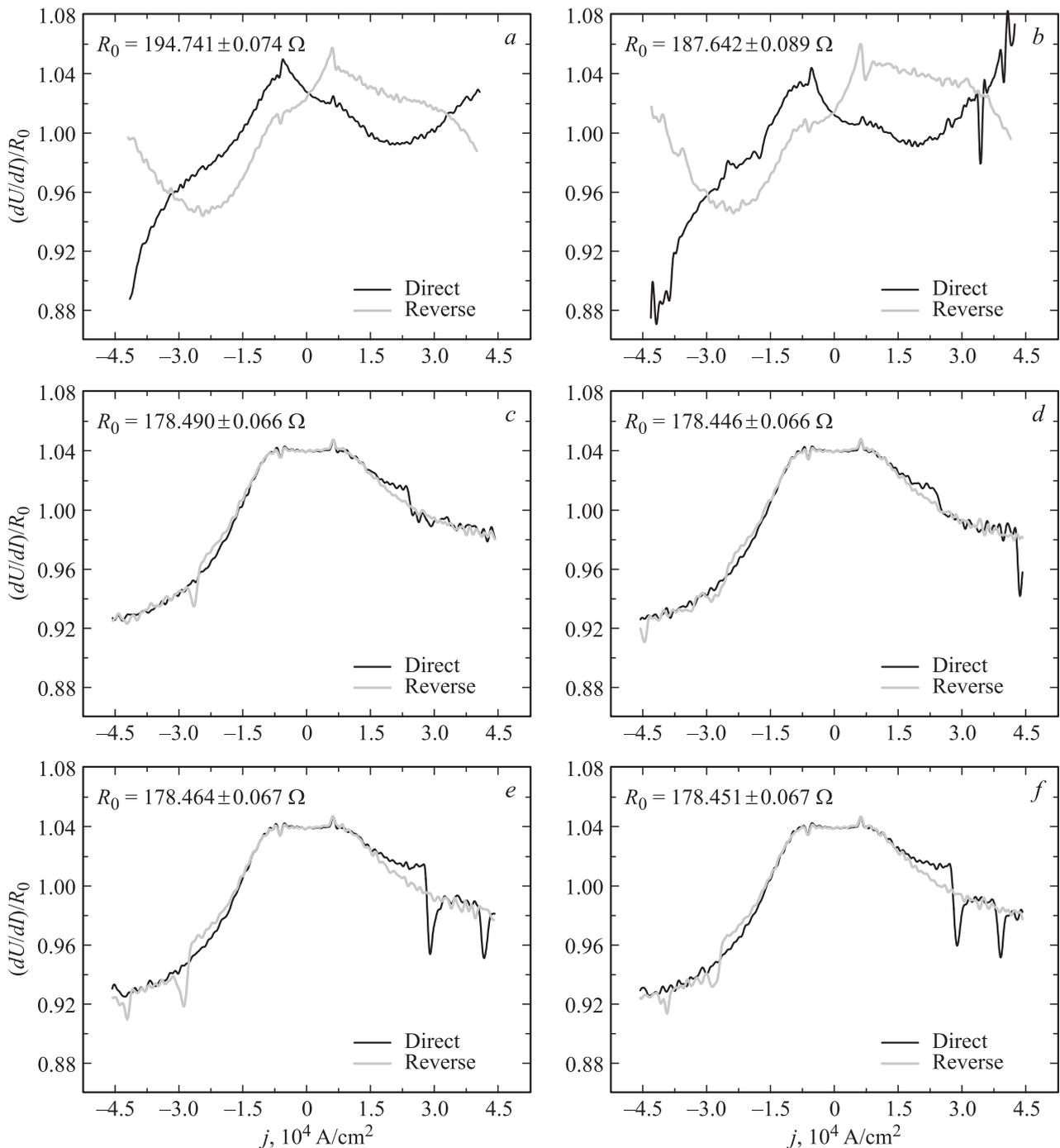


Рис. 2. Зависимости относительного дифференциального сопротивления от плотности тока для того же образца CoSi/GaAs(100), что на рис. 1, в условиях циклирования при 77 К. *a-f* — первый–шестой циклы измерения ВАХ соответственно.

$\pm 4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ вызывает понижение среднего сопротивления слоя еще на 8%. Вместе с тем процедура повторения циклов измерений при 77 К приводит к неожиданному, значительно большему, чем при комнатной температуре, необратимому изменению ВАХ, несмотря на еще более надежный теплоотвод. Первые два цикла измерений показывают значительную нелинейность ($\sim 18\%$) и гистерезис ($\sim 4\%$). Начиная с третьего цикла измерений ВАХ стабилизируется и

приобретает мало меняющуюся почти безгистерезисную асимметричную форму, в которой превалирует четная составляющая. Сохраняется нелинейность того же порядка ($\sim 12\%$). Гистерезис проявляется лишь в пиках сопротивления в узких диапазонах величины плотности тока. Как видно из зависимостей $(dU/dI)/R_0$ от j на рис. 2, эти пики повторяются для пятого и шестого циклов измерений. Интересно, что как при комнатной температуре на рис. 1, так и при 77 К во всех циклах

измерений повторяются небольшие пики дифференциального сопротивления при величинах плотности тока $j \approx \pm 6 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$.

Результаты повторных измерений при 293 К на рис. 3 после шести циклов при 77 К для того же образца CoSi/GaAs(100) показывают, что необратимые изменения свойств магнитной пленки в результате шести циклов изменений плотности тока в диапазоне $j = \pm 4.5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ при 77 К привели к исчезновению гистерезиса, но почти не изменили величину нелинейности ВАХ (3%) и ее вид при комнатной температуре. Так же как и ранее, превалирует нечетная составляющая формы нелинейности. Увеличились пики дифференциального сопротивления при величинах плотности тока $j = \pm 6 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$.

Наконец, измерения ВАХ того же образца CoSi/GaAs(100) снова при 77 К (рис. 4) показали практически ту же нелинейность, что и на рис. 2, с доминирующей четной составляющей. Величина нелинейности, если не учитывать пиковые выбросы дифференциального сопротивления, уменьшилась до

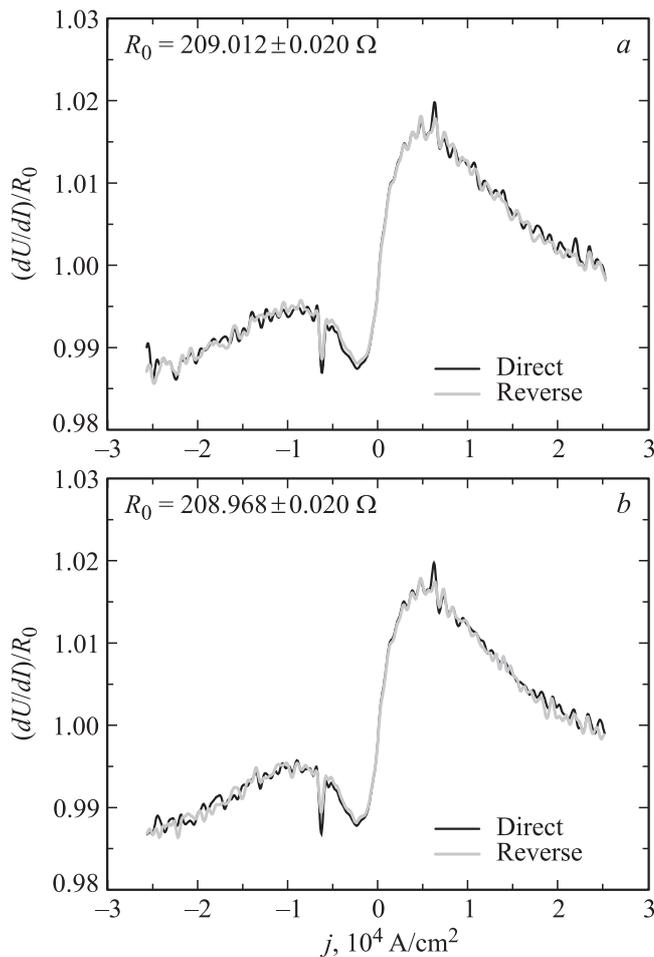


Рис. 3. Зависимость относительного дифференциального сопротивления от плотности тока при 293 К после циклических измерений ВАХ при 77 К (см. рис. 2). Первый (a) и второй (b) циклы измерения.

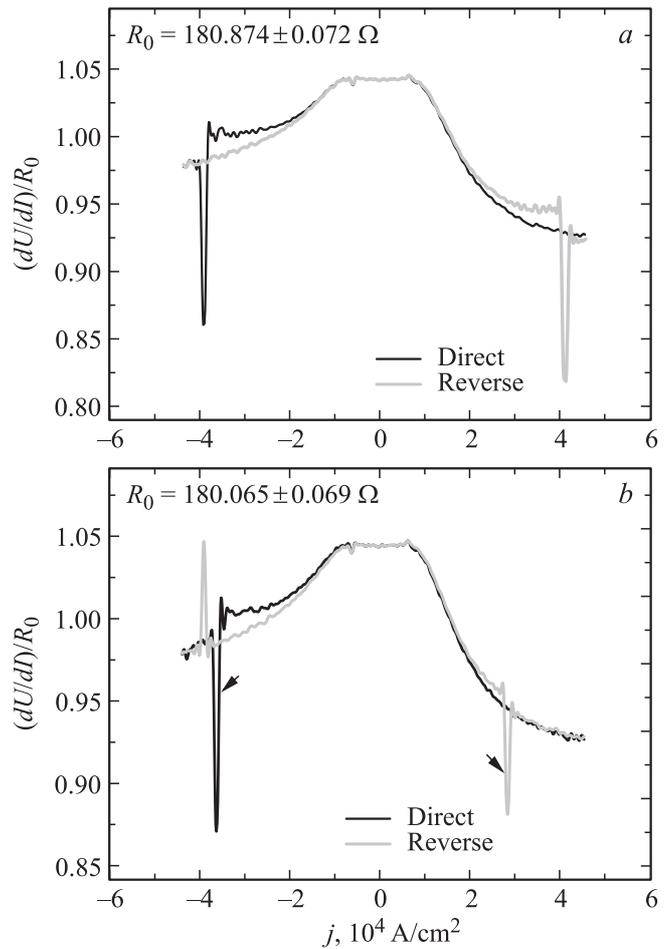


Рис. 4. Зависимость относительного дифференциального сопротивления от плотности тока для образца, вновь охлажденного до 77 К (см. рис. 3). Первый (a) и второй (b) циклы измерения.

10%. Гистерезис в основном проявляется в 10–15% пиках относительного изменения сопротивления при $j = \pm(3-4) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Сохранились слабые пики ВАХ при $j = \pm 6 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$.

4. Заключение

Таким образом, в результате исследования продольного транспорта тока в ферромагнитных слоях сплава CoSi/GaAs(100) обнаружены асимметрия ВАХ, свидетельствующая о спиновой поляризации носителей тока, существенная нелинейность (до 18%) и гистерезис (до 4%) дифференциального сопротивления ВАХ при сравнительно малых плотностях тока величиной до $5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Природа этих аномалий пока неясна. Она может быть связана с электрополевым разогревом носителей тока — дырок, определяющих спиновую упорядоченность 3d-атомов. Неожиданным оказалось, что при 77 К в процессе повторения циклов измерений наблюдались необратимые изменения электриче-

ских свойств слоев, возможно обусловленные тем, что при низкой температуре локализация плотности тока в неоднородном материале достигает такой величины, при которой происходит тепловое или электрополевоое перемещение атомов в магнитном слое. Пониженная температура способствует локализации как путей протекания тока, так и электрических полей, вызывающих необратимое влияние на распределение центров рассеяния носителей тока. Представляет интерес дальнейшее изучение диапазонов стабильности гистерезисных ВАХ таких слоев для разработки совместимых с кремниевой технологией переключаемых собственным током ячеек безмеханической магнитной памяти.

Список литературы

- [1] С.С. Аплеснин. Основы спинтроники. 2-е изд., испр. Лань, СПб. (2010). 288 с.
- [2] Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, А.А. Ежевский. Основы спинтроники. Учеб. пособие. Изд-во НГУ, Ниж. Новгород (2009). 173 с.
- [3] П.А. Грюнберг. УФН **178**, *12*, 1349 (2008).
- [4] А.Т. Ферг. УФН **178**, *12*, 1337 (2008).
- [5] L. Berger. Phys. Rev. B **54**, *13*, 9353 (1996).
- [6] J.C. Slonczewsk. J. Magn. Magn. Mater. **159**, *1-2*, L1 (1996).
- [7] J.A. Katine, F.J. Albert, R.A. Buhrman, E.B. Myers, D.C. Ralph. Phys. Rev. Lett. **84**, *14*, 3149 (2000).
- [8] M. Elsen, O. Boulle, J.-M. George, H. Jaffres, R. Mattana, V. Cros, A. Fert, A. Lemaitre, R. Giraud, G. Faini. Phys. Rev. B **73**, *3*, 035303 (2006).
- [9] X. Yao, H. Meng, Y. Zhang, J.-P. Wang. J. Appl. Phys. **103**, *7*, 07A717 (2008).
- [10] H. Sukegawa, S. Kasai, T. Furubayashi, S. Mitani, K. Inomata. Appl. Phys. Lett. **96**, *4*, 042508 (2010).
- [11] Е.С. Демидов, Ю.А. Данилов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников, А.И. Сучков. Письма в ЖЭТФ **83**, *12*, 664 (2006).
- [12] Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, М.В. Сапожников, Д.М. Дружнов, С.Н. Гусев, Б.А. Грибков, Д.О. Филатов, Ю.С. Степанова, С.А. Левчук. ЖЭТФ **133**, *132* (2008).
- [13] E.S. Demidov, B.A. Aronzon, S.N.Gusev, V.V. Karzanov, A.S. Lagutin, V.P. Lesnikov, S.A. Levchuk, S.N. Nikolaev, N.S. Perov, V.V. Podolskii, V.V. Rylkov, M.V. Sapozhnikov, A.V. Lashkul. J. Magn. Magn. Mater. **321**, *7*, 690 (2009).
- [14] Е.С. Демидов, В.В. Подольский, В.П. Лесников, С.А. Левчук, С.Н.Гусев, В.В. Карзанов, Д.О. Филатов. Письма в ЖЭТФ **90**, *12*, 852 (2009).
- [15] Е.С. Демидов, В.В. Подольский, Б.А. Аронзон, В.В. Рыльков, В.П. Лесников, В.В. Карзанов, М.В. Сапожников, С.Н. Гусев, С.А. Левчук. Изв. РАН. Сер. физ. **74**, *10*, 1450 (2010).