DOI: 10.17725/rensit.2021.13.479

Спиновый ток и спиновое магнитосопротивление границы гетероструктуры иридат/манганит

¹Овсянников Г.А., ¹Константинян К.И., ¹Шмаков В.А., ²Шадрин А.В., ¹Кислинский Ю.В., ³Андреев Н.В., ³Милович Ф.О., ¹Орлов А.П., ¹Лега П.В. ¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, http://www.cplire.ru/

Москва 125009, Российская Федерация

²Московский физико-технический институт, http://www.mipt.ru/

Долгопрудный 141701, Московская область, Российская Федерация

³Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", https://misis.ru/

Москва 119049, Российская Федерация

E-mail: gena@hitech.cplire.ru, karen@hitech.cplire.ru, shmakov-va@hitech.cplire.ru, shadrinant@mail.ru, yulii@hitech.cplire.ru, andreevn.misa@gmail.com, filippmilovich@mail.ru, orl@cplire.ru, lega_peter@list.ru

Поступила 20.10.2021, рецензирована 27.10.2021, принята 08.11.2021 Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Аннотация: Спин-орбитальное взаимодействие, присутствующее в ряде 5d-окислов переходных металлов (ОПМ), является слабым в 3d-ОПМs. В последнее время граница раздела между 3d- и 5d-ОПМ привлекает повышенный интерес из-за возможности нарушения топологической симметрии и возникновения достаточно сильных магнитоэлектрических эффектов. В данной работе мы приводим результаты изготовления и измерения структуры, а также спинового сопротивления границы 3d- и 5d-ОПМs в двуслойной гетероструктуре SrIrO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃.

Ключевые слова: спин-орбитальное взаимодействие, гетероструктуры, переходные металлы, топологическая симметрия, магнитоэлектрические эффекты

PACS: 75.47.Lx, 75.25.-j

Благодарностии: Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и РФФИ №19-07-00143. Для проведения исследований было использовано оборудование Уникальной научной установки #352529 "Криоинтеграл", развитие которой поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-667. Структурные исследования проводились на оборудовании центра коллективного пользования "Материаловедение и металлургия" при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (№075-15-2921-696). Авторы благодарны В.В. Демидову, А.М. Петржику, К.Л. Станкевичу, Т.А. Шайхулову за помощь и полезное обсуждение экспериментальных результатов.

Для цитирования: Овсянников Г.А., Константинян К.И., Шмаков В.А., Шадрин А.В., Кислинский Ю.В., Андреев Н.В., Милович Ф.О., Орлов А.П., Лега П.В. Спиновый ток и спиновое магнитосопротивление границы гетероструктуры иридат/манганит. *РЭНСИТ: Радиоэлектроника.* Наносистемы. Информационные технологии, 2021, 13(4):479-486. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.479.

Spin current and spin magnetoresistance of the heterostructure iridate/manganite interface

Gennady A. Ovsyannikov, Karen Y. Constantinian, Vladislav A. Shmakov, Yulii V. Kislinski, Andrey P. Orlov, Peter V. Lega

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, http://www.cplire.ru/ Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: gena@hitech.cplire.ru, karen@hitech.cplire.ru, shmakov-va@hitech.cplire.ru, yulii@hitech.cplire.ru, orl@ cplire.ru, lega_peter@list.ru

480 ОВСЯННИКОВ Г.А., КОНСТАНТИНЯН К.И., ШМАКОВ В.А., ШАДРИН А.В., КИСЛИНСКИЙ Ю.В., АНДРЕЕВ Н.В., МИЛОВИЧ Ф.О., ОРЛОВ А.П., ЛЕГА П.В.

НАНОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ІТ

Anton V. Shadrin

Moscow Institute of Physics and Technology, https://mipt.ru/ Dolgoprudny 141701, Moscow Region, Russian Federation *E-mail: shadrinant@mail.ru* **Nikolay V. Andreev, Filipp O. Milovich** National Research Technological University "MISiS", https://misis.ru/

Moscow 119049, Russian Federation *E-mail: andreevn.misa@gmail.com, filippmilovich@mail.ru* Received Oktober 20, 2021, peer-reviewed Oktober 27, 2021, accepted November 08, 2021

Abstract: The paper presents the results of fabrication and structural study of $SrIrO_3/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ heterostructures. The results of experimental studies of the spin current arising in the regime of ferromagnetic resonance are presented. The spin-orbit interaction present in 5d-oxides of transition metals, which is $SrIrO_3$, provides an effective conversion of spin current to charge current due to the inverse spin Hall effect. The angular dependence of spin magnetoresistance makes it possible to determine the angle of the spin Hall effect.

Keywords: spin-orbit interaction, heterostructures, transition metals, topological symmetry, magnetoelectric effects

PACS: 75.47.Lx, 75.25.-j

Acknowledgments: This work was carried out within the framework of the state task of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences and Russian Foundation for Basic Research No.19-07-00143. The study was carried out using the Unique Science Unit "Cryointegral" (USU #352529), which was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia (Project No. 075-15-2021-667). Structural investigations were carried out using the equipment of the Center "Material Science and Metallurgy" with the financial support of Ministry of Education and Science of Russian Federation (No 075-15-2921-696).

For citation: Gennady A. Ovsyannikov, Karen Y. Constantinian, Vladislav A. Shmakov, Anton V. Shadrin, Yulii V. Kislinski, Nikolay V. Andreev, Filipp O. Milovich, Andrey P. Orlov, Peter V. Lega. Spin current and spin magnetoresistance of the heterostructure iridate/manganite interface. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies*, 2021, 13(4):479-486. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.479.

Содержание

- 1. Введение (480)
- 2. Гетероструктуры манганит/иридат (481)
- 3. Спиновый ток (482)
- 4. Спиновое магнитосопротивление (484)
- 5. Заключение (485)
- ЛИТЕРАТУРА (485)

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс микроэлектроники в области информатики в последнее время обусловлен использованием зарядовых свойств электронов. Использование спинов электронов открывает новые возможности микроэлектроники, особенно в области отвода тепла от элементов субмикронных размеров. Элементы спинтроники позволяют решить проблему теплоотвода, поскольку перенес спинов (спиновый ток) не связан с тепловыделением.

Детектирование и генерация спинового тока требуют совершенно иного подхода к задаче, целью которой является конвертация спинового тока в зарядовый, который используется в современных системах. При этом используется спиновый эффект Холла, который обеспечивает конвертацию спинового тока в зарядовый и обратно в парамагнитных металлах [1]. Эффективность

конвертации определяется параметром – углом спинового эффекта Холла θ_{sH} , который может быть определен как отношение спинового сопротивления Холла к зарядовой проводимости парамагнитного металла И получен И3 нелокальных магнитотранспортных измерений (см., например, [2]).

Наиболее распространённым методом является использование спиновой накачки в режиме ферромагнитного резонанса (ФМР) в гетероструктуре парамагнитный металл/ ферромагнетик [3-6]. Однако большое число параметров, определяющих величину спинового тока, не позволяет определить с хорошей точностью величину спинового тока. В результате наблюдается большой экспериментально разброс полученных значений $\theta_{_{\rm SH}}$ для одого и того же материала. Число параметров в соотношении между $\theta_{_{\rm SH}}$ и спиновым магнитосопротивлением значительно меньше. В результате спинового измерений сопротивления удается определить величину $\theta_{\rm sh}$ с большей точностью.

В данной работе представлены результаты изготовления и структурного исследования SrIrO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃, гетероструктур экспериментальных результаты исследований спинового тока, возникающего в режиме ферромагнитного магнитосопротивления. резонанса, И Обсуждаются влияние анизотропного магнитосопротивления Рашба И параметра на спин-зависимые параметры гетероструктур.

2. ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ МАНГАНИТ/ ИРИДАТ

Тонкие плёнки иридата стронция $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_{3}$ SrIrO, И манганита нанометровой осаждались ТОЛЩИНЫ на монокристаллические (110)подложки NdGaO₂. Рост эпитаксиальных плёнок осуществлялся магнетронного методом



Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма бреговского отражения Pt/SrIrO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/NdGaO₃. Звездочкой отмечены отражения от платиновой пленки.

напыления при температурах подложки 770-800°С в смеси газов Ar и O_2 с давлением 0.3 mBar [5,6].

Кристаллическая структура полученных гетероструктур была исследована с помощью методов рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Мы будем описывать кристаллическую решетку SrIrO₃ и La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ как искаженный псевдокуб с параметрами решетки $a_{SIO} = 0.396$ nm и $a_{LSMO} = 0.389$ nm соответственно [6].

На Рис. 1 представлена дифрактограмма полученной гетероструктуры. Можно наблюдать кратные отражения OT плоскости (001) иридата стронция SrIrO₃, отражения (110)подложки NdGaO, совпадающие с отражениями от плоскости (001) $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$, а также отражения от платинового электрода. Таким образом, можно сделать вывод, что рост гетероструктуры осуществляется по механизму "куб на куб" со следующими соотношениями: (001) $SrIrO_{3} | | (001)La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_{3} | | (110)NdGaO_{3}$ и [100] SrIrO₃ | [100]La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ | [001] $NdGaO_{3}[6].$

На **Рис. 2** представлено ПЭМ изображение поперечного среза гетероструктуры, полученного с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 на



Рис. 2. ПЭМ изображение поперечного среза гетероструктуры Pt/SrIrO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/NdGaO₃ (Pt/SIO/LSMO/NGO), покрытой толстым слоем платины для стекания заряда. Справа показана дифракция электронов от областей подложки NdGaO₃ и пленки La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃.

200 kV. Элементный анализ проводился рентгеновской дисперсионной системой OXFORD Instruments, INCA Energy. Пластинка поперечного среза образца для просвечивающей электронной микроскопии использованием была изготовлена С фокусированного ионного пучка в растровом электронно-ионном микроскопе CrossBeam 40 EsB, производства компании Neon Carl Zeiss, имеющего автоэмиссионную электронную и галлиевую ионную пушку с разрешением 1 и 7 нм. Установка оснащена микроманипулятором и газовой инжекционной системой для локального осаждения газов-прекурсоров (Pt, W и т.п.). Для защиты от повреждений на поверхности образца формировался слой металлической маски (Pt) толщиной до 2 мкм. Для получения среза и его утонышения (полировки) использовались ионы Ga⁺ с энергией 30 кэВ с постепенным уменьшением тока травления от 5 нА до 5 пА. Для удаления аморфного слоя на финальной стадии энергия ионов понижалась до 5 кэВ.

Предположительно во время приготовления образца для ПЭМ, верхний слой SrIrO₃был поврежден – аморфизовался при взаимодействии с пучком ионов галия.



Рис. 3. Поверхность пленки La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃, снятая на атомно-силовом микроскопе.

При La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ остался ЭТОМ слой Ha изображении неповрежденным. высокого разрешения мы можем наблюдать чётко выраженную ровную границу между слоем $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ и подложкой NdGaO₂. Следовательно, наблюдается эпитаксиальное соответствие между слоем и подложкой. На вставке к рисунку приведены Фурье изображения от областей соответствующих подложке и рисунка, слою La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃, также подтверждающие эпитаксиальный рост. На Рис. 3 показано поперечное сечение поверхности La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ пленки, полученное с помощью атомно-силового микроскопа. Неровности по вертикали 1-2 nm не превышают толщину верхней пленки SrIrO₃. По горизонтали размеры неровности 50-70 nm.

3. СПИНОВЫЙ ТОК

Ширина линии ферромагнитного резонанса характеризует (ΦMP) ΔH затухание спиновой прецессии. В гетероструктуре ферромагнетик/нормальный металл наблюдается увеличение ΔH , вызванное генерацией спинового тока через границу [7]. При СВЧ воздействии в режиме ФМР в плёнке ферромагнетика через границу протекает спиновый ток ј_с, который спиновой проводимостью определяется границы $g^{\uparrow\downarrow}$ и амплитудой прецессии магнитного момента *m*, вызванного СВЧ магнитным полем [4,8,9]

$$j_s = \frac{h}{8\pi} (mdm / dt)^2.$$
⁽¹⁾

Величина спиновой проводимости

спиновый ток и спиновое магнитосопротивление 483 ГРАНИЦЫ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ИРИДАТ/МАНГАНИТ

обычно определяется увеличения И3 вызванного спинового затухания, протеканием спинового тока. В нашем спиновой случае выражение ДЛЯ SrIrO₂/ проводимости границы La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ имеет вид

$$g^{\uparrow\downarrow} = \frac{4\pi\gamma_g M_s t_{LSMO}}{g\mu_B \omega_f} (\Delta H_{SIO/LSMO} - \Delta H_{LSMO}), \qquad (2)$$

где намагниченность плёнки La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ *M*_c = 300 Oe, определённой из величины резонансного магнитного поля ФМР, $t_{\rm LSMO}$ = 12 nm толщина плёнки $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_{3}$, μ_{B} = 9.274·10⁻²¹ erg/G – магнетон Бора, $g = 2, \gamma_{g} =$ $17.605 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}\text{G}^{-1}$ – гиромагнитное отношение для свободных электронов и $\omega_f = 2\pi \cdot 9.51 \cdot 10^9$ s⁻¹ – частота СВЧ воздействия. При комнатной температуре увеличение ширины ΦMP $\Delta H_{SIO/LSMO} - \Delta H_{LSMO} = 20$ Oe, что даёт $g_{e\!f\!f}^{\uparrow\downarrow}$ = 1·10¹⁸ m⁻² для SrIrO₃/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ гетероструктруы. Отметим, что $g_{eff}^{\uparrow\downarrow} = 1.3 \cdot 10^{18}$ m⁻² было получено в [10] для гетероструктуры SrIrO₃/La₀₇Sr₀₃MnO₃, полученной методом лазерной абляции.

Для детектирования СПИНОВОГО тока используется обратный спиновый эффект Холла [3,8]. При этом отношение спинового и зарядового токов определяется безразмерным параметром – спиновым углом Холла $\theta_{\rm SH}$:

$$\vec{j}_{ISHE} = \theta_{SH} \frac{e}{\hbar} \Big[\vec{n} \times \vec{j}_s^0 \Big], \tag{3}$$

где *n* – единичный вектор направления спинового момента.

Измеряется зависимость напряжения на верхней плёнке V(H) при свипировании магнитного поля вблизи резонансного значения ФМР. На **Рис. 4** показана магнитнополевая зависимость напряжения на плёнке SrIrO₃ в условиях ферромагнитного резонанса на частоте 2.6 GHz. Экспериментальная зависимость хорошо аппроксимируется ниже приведённой формулой с учетом влияния спинового тока и вклада от анизотропного магнитосопротивления (AMR) [11,12]:



Рис. 4. Спектр напряжения, вызванного спиновым током, f = 2.6 GHz, T = 300 К. Закрашенные круги — экспериментальные точки, красная кривая аппроксимация линией Лоренца и антисимметричной составляющей анизотропного магнитосопротивления, СИНЯЯ кривая антисимметричная часть анизотропного магнитосопротивления, зеленая кривая — сумма симметричной части анизотропного магнитосопротивления и сигнала спинового тока.

$$V = \left[V_{AMR}^{S} L(H) + V_{AMR}^{A} L'(H) \right] \sin 2\varphi_{0} \sin \varphi_{0} + V_{O} L(H) \cos \varphi_{0},$$
(4)

 $r_{Ae} L(H) = \Delta H^2 / [(H - H_0)^2 + \Delta H^2]$ симметричная часть функции Лоренца, $L'(H) = \Delta H(H - H_0) / [(H - H_0)^2 + \Delta H^2]$ –антисимметричная часть функции V^{S}_{AMR} V^A_{AMR} Лоренца, амплитуды И симметричной и асимметричной частей вклада AMR, $V_{\Omega}(H)$ – напряжение на пленке SrIrO₃, вызванное протеканием спинового тока через границу, φ_0 – угол между направлением внешнего магнитного поля и нормалью к направлению напряжения, вызванного током обратного спинового эффекта Холла. Для $\varphi_0 = 45^\circ$, предполагая, что отношение $V_{AMR}^A / V_{AMR}^S = -\text{tg}\varphi_I \approx -1$ [11], где φ_{1} – разность фаз между СВЧ током и СВЧ намагниченностью, из амплитуды V^A_{AMR} получаем, что вклад от спинового тока V_{o} составляет менее 10% от величины V^{S}_{AMR}

4. СПИНОВОЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ

Магнитно-полевая зависимость изменения нормированного магнитосопротивления (MC) гетероструктуры показана на **Рис. 5.** Нормировка приведена на сопротивление при H = 0. Направления изменения магнитного поля указано стрелками. Виден гистерезис изменения магнитосопротивления. Максимальное значения изменения MC составляет 0.032%. Поле было направлено перпендикулярно направлению протекания тока (угол $\varphi = 90^{\circ}$ на Рис. 5*a*).

Полевая зависимость МС следует кривой намагниченности манганита



Рис. 5. (a) - топология измерений $SrIrO_3/La_{0,7}Sr_{0,3}MnO_3$. (b) - магнитно-полевая зависимость изменения нормированного магнитосопротивления гетероструктуры. Нормировка приведена на сопротивление при H = 0. Направления изменения магнитного поля указаны стрелками.

[13]. Малое значения ширины петли гистерезиса вероятно вызвано эффектом близости (проникновением магнитного параметра порядка из $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ пленки в SrIrO₃).

Следуя теории [14], с учетом проводимости ферромагнетика La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ плёнки выражение для спинового сопротивления (SMR) выглядит следующим образом [15]

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\theta_{SH}^2 \lambda_S g_R \tanh^2(t_{SIO} / 2\lambda_S)}{(1+\eta) t_{SIO} [1+g_R \coth(t_{SIO} / \lambda_S)]},$$
(5)

где $\theta_{_{SH}}$ и $\lambda_{_{S}}$ - спиновый угол и длина спиновой диффузии в SrIrO₃ плёнке. $\eta = \rho_{SIO} t_{LSMO} /$ $\rho_{\text{LSMO}} t_{\text{SIO}} = 0.33$ определяются удельными сопротивлениями иридата и манганита р_{SIO} = $3.10^{-4} \ \Omega$ ст и $\rho_{\rm LSMO}$ = $1.1.10^{-3} \ \Omega$ ст, а также толщинами этих пленок $t_{LSMO} = 12 \text{ nm}$ и $t_{SIO} =$ 10 nm, $g_{\rm R} = {\rm h}\rho_{\rm SIO}\lambda_{\rm S} g^{\uparrow\downarrow} / e^2$. Используя данные для величины спинового сопротивления границ [6] $g^{\uparrow\downarrow} = 10^{18} \text{ m}^{-2}$ и величину $\lambda_s =$ 1 nm, получаем $g_{\rm R} = 0.12$. При условии $t_{sio} >> \lambda_{s}$ соотношение (5) упрощается. Подставляя вычисленные выше параметры получаем, что $\theta_{sH} \approx 0.2$. Предполагая, что анизотропное магнитосопротивление (AMP) аддитивный даёт вклад сопротивление гетероструктуры наряду со спиновым током, получаем, что величину $\theta_{_{SH}}$ необходимо уменьшить в корень из отношения амплитуды симметричного сигнала АМР и сигнала от спинового тока режиме ферромагнитного резонанса $\sqrt{V_O / V_{AMR}^S} = 0.3$ [6].

Заметим, что наряду CO СПИНОВЫМ магнитосопротивлением, существует Рашба-Эдельштейн магнитосопротивление, из-за которое возникает процессов, возникающих на границе с нарушенной симметрией инверсии [16-18]. Недавно этот эффект был исследован экспериментально Ві/Ад/ферромагнетик многослойке [19], вызванный неравновесной спиновой аккумуляцией спинов на границе.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлены и исследованы структурные гетероструктуры SrIrO_/ параметры $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$. Ha просвечивающем наблюдался электронном микроскопе плёнок эпитаксиальный рост двух NdGaO₃, И3 который на подложке подтверждался рентгеноструктурными измерениями. Двумя методами по прямому измерению напряжения, индуцированному возникающим в режиме ферромагнитного резонанса спиновым током, И измерению СПИНОВОГО сопротивления определена величина спинового угла Холла. Наблюдалось сильное влияние анизотропного магнитосопротивления на параметры спинового транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Zhang S. Spin Hall Effect in the Presence of Spin Diffusion. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85:393.
- Mihajlovic G, Pearson JE, Garcia MA, Bader SD, and Hoffmann A. Negative Nonlocal Resistance in Mesoscopic Gold Hall Bars: Absence of the Giant Spin Hall Effect. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103:166601.
- Saitoh E, Ueda M, Miyajima H, and Tatara G. Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:182509.
- Mosendz O, Vlaminck V, Pearson JE, Fradin FY, Bauer GEW, Bader SD, and Hoffmann A. Detection and quantification of inverse spin Hall effect from spin pumping in permalloy/normal metal bilayers. *Phys. Rev.* B, 2010, 82:214403.
- 5. Shaikhulov TA, Ovsyannikov GA, Demidov VV, Andreev NV. Magnetic and Resistive Properties of Magnetite/Iridate Heterostructures. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2019 129:112.
- 6. Ovsyannikov GA, Shaikhulov TA; Stankevich

KL, Khaydukov Yu, Andreev NV. Magnetism at an iridate/manganite interface: Influence of strong spin-orbit interaction. *Phys. Rev. B*, 2020, 102:144401.

- 7. Shaikhulov TA, Ovsyannikov GA. Attenuation of Spin Precession in Manganite/Normal Metal Heterostructures. *Physics of the Solid State*, 2018, 60:2231.
- Tserkovnyak Ya, Brataas A, Bauer G E W. Enhanced Gilbert damping in thin ferromagnetic films. *Phys. Rev. Lett*, 2002, 88:117601.
- Fengyuan Yang and P. Chris Hammel. FMRdriven spin pumping in Y₃Fe₅O₁₂-based structures. J. Phys. D: Appl. Phys., 2018, 51:253001.
- 10. Crossley S, Swartz AG, Nishio K, Hikita Y, and Hwang HY. All-oxide ferromagnetic reso-nance and spin pumping with SrIrO₃. *Phys. Rev B*, 2019, 100:115163.
- 11. Azevedo A, Vilela-Leao LH, Rodriguez-Suarez RL, Lacerda Santos AF, Rezende SM. Spin pumping and anisotropic magnetoresistance voltages in magnetic bilayers: Theory and experiment. *Phys.Rev. B*, 2011, 83:144402.
- 12. Atsarkin VA, Borisenko IV, Demidov VV, Shaikhulov TA. Temperature dependence of pure spin current and spin-mixing conductance in the ferromagneticnormal metal structure. J. Phys. D, 2018, 51:245002.
- Ovsyannikov GA, Petrzhik AM, Borisenko IV, Klimov AA, Ignatov YA, Demidov VV, Nikitov SA. Magnetotransport characteristics of strained La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ epitaxial manganite films. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2009, 108:48.
- 14. Chen Y-T, Takahashi S, Nakayama H, Althammer M, Goennenwein STB, Saitoh E, and Bauer GEW. Theory of spin Hall magnetoresistance. *Phys. Rev. B*, 2013, 87:144411.

- 15. Du Ye, Takahashi Saburo and Nitta Junsaku. Spin current related magnetoresistance in epitaxial Pt/Co bilayers in the presence of spin Hall effect and Rashba-Edelstein effect. *Phys. Rev. B*, 2021, 103: 094419.
- 16. Manchon A, Koo HC, Nitta J, Frolov SM, and Duine RA. New perspectives for Rashba spin-orbit coupling. *Nat. Mater.*, 2015, 14:871.
- 17. Emori Satoru, T Nanianxiang, Belkessam Amine M, Wang Xinjun, Matyushov Alexei D Babroski, Christopher J, Gao Yuan, LinHwaide, and Sun Nian X. Interfacial spin-orbit torque without bulk spin-orbit coupling. *Phys. Rev. B*, 2016, 93:18040.
- 18. Akio Asami, Hongyu An, Akira Musha, Makoto Kuroda, and Kazuya Ando. Spin absorption at a ferromagnetic-metal/ platinum-oxide interface. *Physical Review B*, 2019, 99:024432.
- 19. Kim J, Chen Y-T, Karube S, Takahashi S, Kondou K, Tatara G, and Otani Y. Evaluation of bulk-interface contributions to Edelstein magnetoresistance at metal/oxide interfaces. *Phys.Rev.B*, 2017, 96:140409(R).

Овсянников Геннадий Александрович д.ф.-м.н. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия gena@hitech.cplire.ru Константинян Карен Иванович к.ф.-м.н. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия karen@hitech.cplire.ru Шмаков Владислав Алексеевич инженер ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия shmakov-va@hitech.cplire.ru Шадрин Антон Викторович к.ф.-м.н. Московский физико-технический институт Долгопрудный 141701, Моск. обл., Россия shadrinant@mail.ru Кислинский Юлий Вячеславович к.ф.-м.н. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия yuli@hitech.cplire.ru Андреев Николай Валерьевич к.ф.-м.н. Нац. иссл. технологич. университет МИСиС 4, Ленинский просп., Москва 119991, Россия andreevn.misa@gmail.com Милович Филипп Олегович к.ф.-м.н. Нац. иссл. технологич. университет МИСиС 4, Ленинский просп., Москва 119991, Россия filippmilovich@mail.ru Орлов Андрей Петрович к.ф.-м.н. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия orl@cplire.ru Лега Петр Викторович М.Н.С. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 11/7, ул. Моховая, Москва 125009, Россия lega_peter@list.ru.