

УДК 537.9

## СПИНОВОЕ МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР ИЗ МАНГАНИТА И МАТЕРИАЛА С СИЛЬНЫМ СПИН-ОРБИТАЛЬНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

© 2023 г. Г. Д. Ульев<sup>a, b, \*</sup>, К. И. Константиныч<sup>a</sup>, И. Е. Москаль<sup>b</sup>,  
Г. А. Овсянников<sup>a</sup>, А. В. Шадрин<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

<sup>b</sup> Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,  
ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000 Российская Федерация

<sup>c</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141701 Российская Федерация

\*E-mail: gdulev@edu.hse.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Представлены результаты экспериментального определения спинового угла Холла в двухслойной структуре металл/ферромагнетик Pt/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>, полученные из угловых зависимостей продольного и поперечного спинового магнетосопротивления в конфигурации планарного эффекта Холла. Определенная из продольного магнетосопротивления величина спинового угла Холла составила  $\theta_{Hx} \approx 0.016$ , а из поперечного  $\theta_{Hy} \approx 0.018$ , в то время как для гетероструктур SrIrO<sub>3</sub>/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> отношение величин поперечного спинового угла Холла к продольному оказалось значительно выше,  $\theta_{Hy}/\theta_{Hx} \approx 9$ , что вызвано, скорее всего, образованием слоя с высокой проводимостью на границе SrIrO<sub>3</sub>/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>.

DOI: 10.31857/S0033849423100194, EDN: DMYCRX

### ВВЕДЕНИЕ

Функциональные параметры устройств спинтроники напрямую связаны с эффективностью генерации чистого спинового тока [1–5]. Одним из перспективных способов генерации спинового тока в структурах ферромагнетик–металл с высоким атомным весом (далее – Ф/М) является использование спинового эффекта Холла (СЭХ), благодаря которому зарядовый ток  $I_3$  преобразуется в поперечный спиновый ток  $I_C$  из-за спин-орбитального взаимодействия (СОВ) в М-материале [1, 2]. Не менее важным является обратный процесс – преобразование спинового тока в зарядовый за счет обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ). Наиболее эффективно генерация спинового тока в Ф/М-структурах обеспечивается при ферромагнитном резонансе (ФМР), а зарядовый ток  $I_3$  возникает на М-пленке за счет ОСЭХ (см., например, [5, 6]). Наиболее просто величину спинового угла Холла  $\theta_H$  [7] можно определить из измерений спинового магнетосопротивления (СМС) Ф/М-структуры [6], измеряя зависимость СМС от угла между током и намагниченностью ферромагнетика [6, 7].

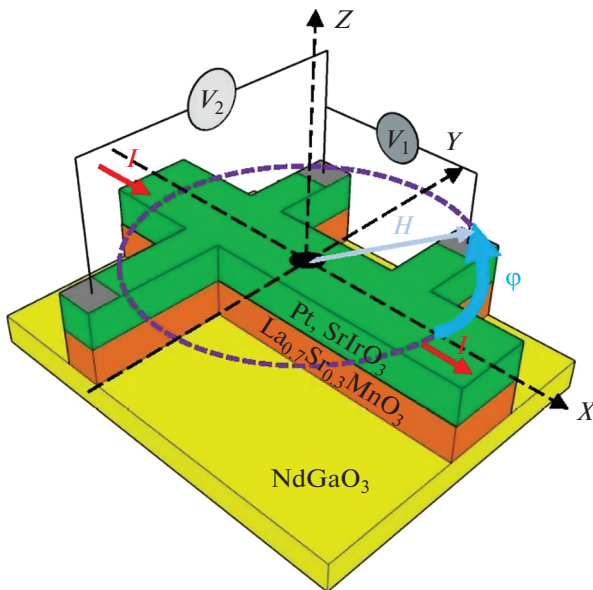
В настоящее время большой интерес высывают оксидные Ф/М-гетероструктуры, в которых

эпитаксиальный рост Ф- и М-пленок происходит без разрыва вакуума, (см., например, работы [7–12]). На границе раздела SrIrO<sub>3</sub>/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> образуется переходный слой [10, 12] с высокой проводимостью [12], который шунтирует величину магнетосопротивления. В случае нанесения поликристаллической пленки Pt поверх La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> такого шунтирования не обнаружено [13], а влияние напряженности манганитной пленки на величину анизотропного магнетосопротивления в ней рассмотрено в работе [12].

В данной работе приведены первые экспериментальные результаты по спиновомагнетосопротивлению двухслойной структуры Pt/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>, выращенной на подложке NdGaO<sub>3</sub>, и проведено сравнение с параметрами гетероструктур, полученных при замене пленки Pt на оксидную пленку SrIrO<sub>3</sub>.

### 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Тонкопленочные структуры нанометровой толщины Pt/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> (далее – Pt/LSMO) и SrIrO<sub>3</sub>/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> (далее – SIO/LSMO) были изготовлены на подложке из (110) NdGaO<sub>3</sub> (NGO) методом радиочастотного магнетронного распы-

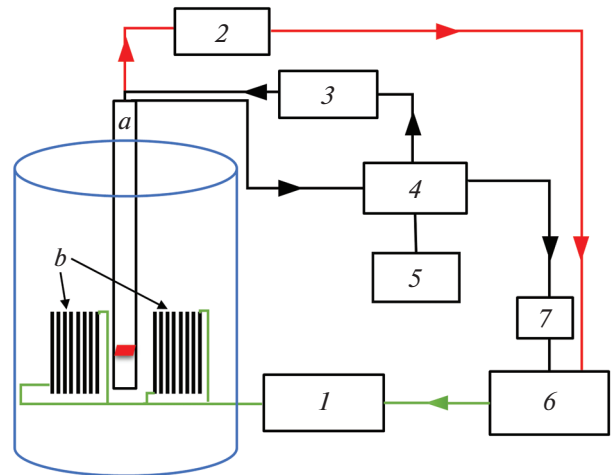


**Рис. 1.** Схематичное изображение Ф/М-структур Pt//LSMO или SiO/LSMO на подложке (110) NdGaO<sub>3</sub> и четырехточечная схема измерения.

ления в атмосфере смеси аргона и кислорода при высокой температуре, 700...800°C [8, 14].

На рис. 1 представлена планарная холловская геометрия структур, изготовленных с помощью фотолитографии и ионного травления. Четырехточечная схема использовалась для измерения продольного и поперечного магнетосопротивлений, пропорциональных напряжениям  $V_1$  и  $V_2$  соответственно. Измерительный ток задавался в М-пленку вдоль оси  $X$  через полоску шириной 100 мкм, а расстояние между контактами по напряжению составляло 1.5 мм. Внешнее магнитное поле лежало в плоскости подложки. Угол  $\phi$  между направлениями магнитного поля  $H$  и измерительного тока  $I$  задавался вращением подложки вокруг нормали к плоскости подложки (см. рис. 1, плоскость  $X$ – $Y$ ). Для определения продольного  $R_x = V_1/I$  и поперечного  $R_y = V_2/I$  сопротивления напряжение  $V_1$  и  $V_2$  регистрировали при пошаговом изменении поля  $H$  вдоль направления задания тока  $I$  с выводов  $V_1$  и  $V_2$  соответственно.

Измерения магнетосопротивления проводились малошумящим синхронным фазочувствительным частотно-избирательным усилителем на частоте  $F$  вблизи 1 кГц (не кратной 50 Гц), добротность избирательного фильтра выбиралась  $Q = 5$ , постоянная интегрирования  $\tau = 30$  мс. Амплитуда тока через образец (0.5 мА на частоте  $F$ ) задавалась напряжением на внутреннем генераторе синхронного усилителя и преобразователем «напряжение–ток». Магнитное поле  $H$  через катушки Гельмгольца определяли с помощью управляемого источника задания тока до  $I_T = 5$  А, позволяющего пошагово изменять  $H$  от 0 до  $+H_M$  и обратно от  $H = +H_M$  до

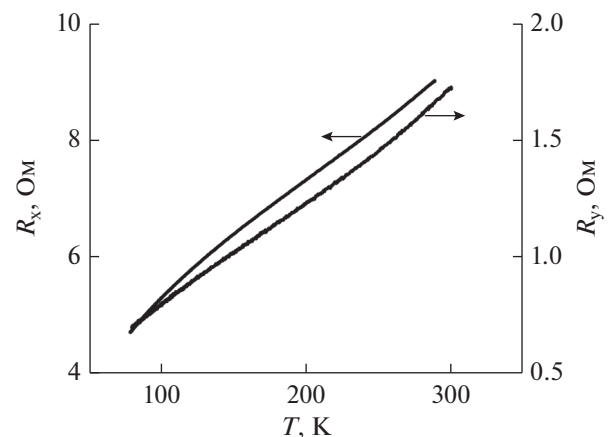


**Рис. 2.** Блок-схема измерительной установки: а – держатель образца, б – катушки Гельмгольца, 1 – источник задания тока на катушки, 2 – измеритель температуры, 3 – преобразователь напряжения в ток, 4 – синхронный усилитель со встроенным генератором, 5 – осциллограф, 6 – ЭВМ, 7 – аналого-цифровой преобразователь; диапазон поля  $H$  от  $-110$  до  $110$  Э, ток  $I = 300...500$  мкА.

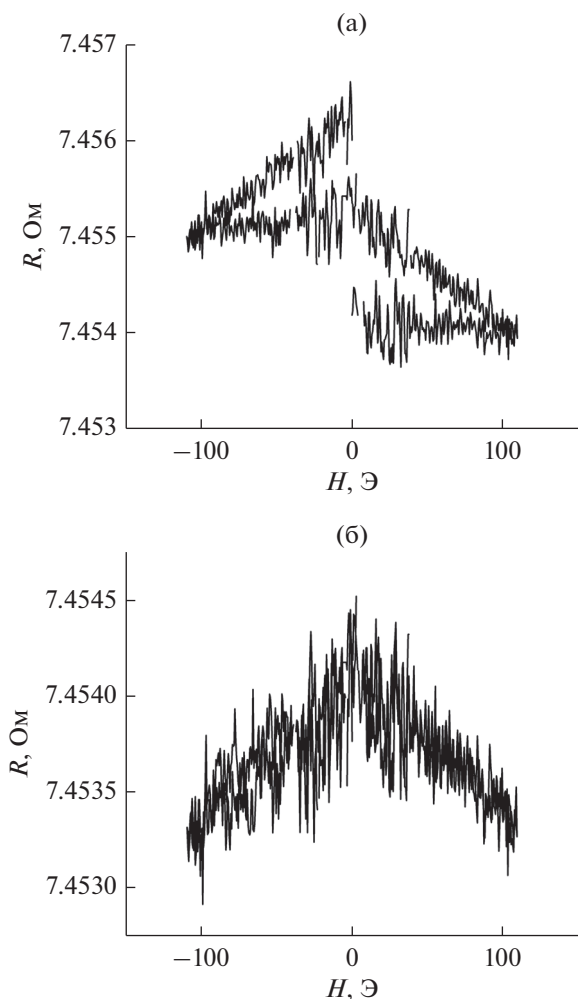
$H = -H_M$  с возвратом к  $H = 0$ . Шаг по магнитному полю  $\Delta H = H_M/N$  задавался ЭВМ в пределах  $N = 200...1500$ . Автоматизированной системой записи параметров одновременно с магнитным полем и напряжением на структуре (либо  $V_1$ , либо  $V_2$ ) фиксировалась температура образца. Блок-схема эксперимента приведена на рис. 2.

## 2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены температурные зависимости сопротивлений  $R_x(T)$  и  $R_y(T)$  структуры



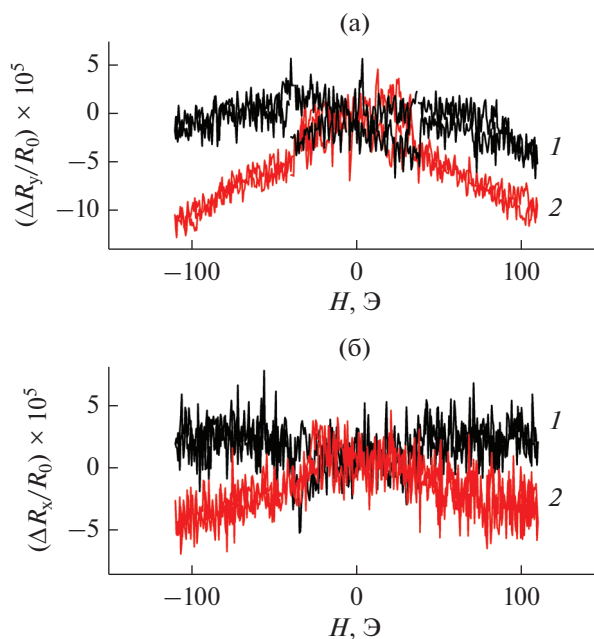
**Рис. 3.** Температурные зависимости при  $H = 0$  продольного  $R_x(T)$  и поперечного  $R_y(T)$  сопротивлений Pt/LSMO с толщинами пленок 10 нм для платины и 30 нм для манганита.



**Рис. 4.** Температурный сдвиг  $\Delta R_Y(T)$  до корректировки (а) и после нее (б); интервал изменения фиксируемой температуры  $T = 319.225...319.339$  К (отметим, что здесь важно относительное изменение  $T$ , а не абсолютное значение).

Pt/LSMO, измеренные при  $H = 0$ . Гладкие зависимости  $R_0(T)$  и малая разность температур  $\Delta T = 0.1...0.3$  К позволили исключить влияние нагрева образца катушками Гельмгольца по каждому шагу  $\Delta H$ . При этом величину  $T$  измеряли с относительной точностью до пятого значащего знака, что позволило скорректировать итоговые зависимости  $R(H)$  по значению сопротивления  $R_0$  при  $H = 0$ . На рис. 4 приведены зависимости  $R(H)$  до и после корректировки.

Для определения спинового угла Холла регистрировались зависимости  $\Delta R_Y/R_0(H)$  и  $\Delta R_X/R_0(H)$  при фиксированном угле  $\varphi$ . На рис. 5 приведены эти зависимости при углах  $\varphi$ , соответствующие максимальному и минимальному изменению СМС от  $H$  при комнатной температуре. На рис. 5а приведены зависимости изменения поперечного СМС  $\Delta R_Y = R_Y(H) - R_0$ , на рис. 5б — для поперечного



**Рис. 5.** Нормированные поперечные  $\Delta R_Y/R_0$  (а) и продольные  $\Delta R_X/R_0$  (б) зависимости изменения СМС Pt/LSMO от поля  $H$  при  $T = 300$  К,  $R_0 = R(H = 0)$  при  $\varphi = 70$  (1) и 0 град (2).

$\Delta R_X = R_X(H) - R_0$ . Нормировка для продольного и поперечного случаев проводилась на значение СМС  $R_0$  при  $H = 0$ .

Для определения  $\theta_H$  через зависящие от угла  $\varphi$  параметры  $R_X$  и  $R_Y$  использовались следующие выражения для Ф/М-структур [6]:

$$\left(\frac{\Delta R_X}{R_0}\right) = -\theta_H^2 \frac{2\lambda}{d} + \frac{1}{2} r_1 (1 + \cos 2\varphi), \quad (1)$$

$$r_1 = \theta_H^2 \frac{\lambda}{d} \operatorname{Re} \frac{2\lambda\rho (\operatorname{Re} G^{\uparrow\downarrow} + i \operatorname{Im} G^{\uparrow\downarrow})}{1 + 2\lambda\rho (\operatorname{Re} G^{\uparrow\downarrow} + i \operatorname{Im} G^{\uparrow\downarrow})}, \quad (2)$$

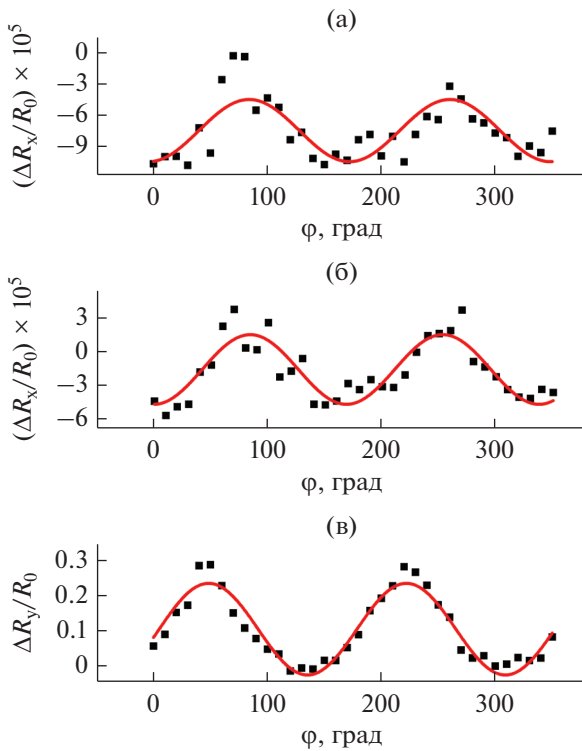
$$\left(\frac{\Delta R_Y}{R_0}\right) = \frac{r_1}{2} \sin 2\varphi, \quad (3)$$

где  $d$  — толщина,  $\rho$  — удельное сопротивление  $\lambda$  — длина спиновой диффузии для М-пленки,  $\operatorname{Re} G^{\uparrow\downarrow}$  и  $\operatorname{Im} G^{\uparrow\downarrow}$  — реальная и мнимая части спиновой проводимости границы. Для реальной части спиновой проводимости границы было использовано упрощенное соотношение [16]

$$\operatorname{Re} g^{\uparrow\downarrow} = \operatorname{Re} G^{\uparrow\downarrow} / (h/e^2) \approx (h/e^2) / (\rho\lambda),$$

а для мнимой  $\operatorname{Im} g^{\uparrow\downarrow}$  — данные из работы [17], а данные для  $\lambda$  — из работ [18, 19]. В случае Pt/LSMO получаем  $\operatorname{Re} g^{\uparrow\downarrow} \gg \operatorname{Im} g^{\uparrow\downarrow}$ , а для SiO/LSMO  $\operatorname{Re} g^{\uparrow\downarrow} \approx \operatorname{Im} g^{\uparrow\downarrow}$  [14].

Аналогичный подход для определения спинового угла Холла был применен для гетероструктур



**Рис. 6.** Угловые зависимости нормированных значений СМС, полученные при поле  $H_{\max} = 100$  Э при  $T = 300$  К: (а) поперечное  $\Delta R_y/R_0$  для Pt/LSMO; (б) продольное  $\Delta R_x/R_0$  для Pt/LSMO; (в) поперечное  $\Delta R_y/R_0$  для гетероструктуры SIO/LSMO (образец TS-2); точки – эксперимент, сплошная линия  $\sim \sin 2\varphi$  – аппроксимация.

SIO/LSMO [20]. На рис. 6 приведены угловые зависимости для поперечного и продольного СМС для Pt/LSMO, а также для сравнения для поперечного SIO/LSMO. В табл. 1 приведены сравнительные данные по трем исследованным структурам: образцы TS-2, TS-12 Ф/М-гетероструктур

SIO/LSMO и образец Т0-63 Pt/LSMO. Величины спинового угла Холла  $\theta_H$ , определенного из изменений продольного СМС приведены с индексом X, а из поперечного – с индексом Y.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из угловых зависимостей поперечного и продольного спинового магнетосопротивления получены оценки спинового угла Холла  $\theta_H$  при  $T = 300$  К для тонкопленочной структуры Pt/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> на подложке NdGaO<sub>3</sub>. Обнаружено, что в отличие от случая SrIrO<sub>3</sub>/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> величины продольного и поперечного спинового магнетосопротивления в случае применения Pt в качестве М-материала соизмеримы и не превосходят  $\theta_H < 0.02$ . Благодаря значительно более сильному спин-орбитальному взаимодействию в иридатах стронция для гетероструктур SrIrO<sub>3</sub>/La<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> величины  $\theta_H$  оказались значительно выше, что указывает на перспективность их более подробного изучения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Т.А. Шайхулову за изготовление эпитаксиальных пленок, а также В.А. Шамакову, Ю.В. Кислинскому и А.М. Петржику за помощь в работе и полезные замечания.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-00010). В работе использовано оборудование уникальной научной установки #352529 “Криоинтеграл” (соглашение № 075-15-2021-667 Министерства образования и науки Российской Федерации).

**Таблица 1.** Сравнительные данные исследованных структур SIO/LSMO и Pt/LSMO

Параметр	SIO/LSMO TS-12	SIO/LSMO TS-2	Pt/LSMO T0-63
$d_{\Phi}$ , нм	30	5	30
$d_M$ , нм	10	30	10
$L/W$	13	15	13
$R_0$ , Ом	979	3400	9
$\Delta R_x/R_0$	$4.7 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-5}$
$\Delta R_y/R_0$	$0.5 \times 10^{-2}$	0.15	$4 \times 10^{-5}$
$\lambda$ , нм	$\sim 1.4$ [18]	$\sim 1.4$ [18]	$\sim 2$ [19]
$\theta_{Hx}$	$0.04 \pm 0.01$	$0.054 \pm 0.02$	$0.016 \pm 0.005$
$\theta_{Hy}$	$0.35 \pm 0.06$	$0.95 \pm 0.07$	$0.018 \pm 0.001$

Примечание:  $d_{\Phi}$ ,  $d_M$  – толщина Ф- и М-пленки,  $L$  – длина,  $W$  – ширина мостиковой структуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hirsch J.E.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. № 9. P. 1834.
2. *Zhang S.F.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. № 2. P. 393.
3. *Miron I.M., Garello K., Gaudin G. et al.* // Nature. 2011. V. 476. P. 189.
4. *Jungwirth T., Wunderlich J., Olejn K. et al.* // Nat. Mater. 2012. V. 11. P. 382.
5. *Sinova J., Valenzuela S.O., Wunderlich J. et al.* // Rev. Mod. Phys. 2015. V. 87. P. 1213.
6. *Chen Y.-T., Takahashi S., Nakayama H. et al.* // J. Phys.: Condens. Matt. 2016. V. 28. № 10. Article No. 103004.
7. *Saitoh E., Ueda M., Miyajima H., Tatara S.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. № 18. Article No. 182509.
8. *Константинян К.И., Овсянников Г.А., Шадрин А.В. и др.* // ФТТ. 2022. Т. 64. № 10. С. 1429.
9. *Huang X., Sayed S., Mittelstaedt J. et al.* // Adv. Mater. 2021. V. 33. Article No. 2008269.
10. *Yoo M.-W., Tornos J., Sander A. et al.* // Nature Comm. 2021. V. 12. P. 3283.
11. *Perna P., Maccariello D., Ajejas F. et al.* // Adv. Funct. Mater. 2017. V. 27. № 17. Article No. 1700664.
12. *Ovsyannikov G.A., Shaikhulov T.A., Stankevich K.L. et al.* // Phys. Rev. B 2020. V. 102. № 14. Article No. 144401.
13. *Lee H.K., Barsukov I., Swartz A.G. et al.* // AIP Advances. 2016. V. 6. № 5. Article No. 055212.
14. *Овсянников Г.А., Константинян К.И., Калачев Е.А., Климов А.А.* // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. № 12. С. 44.
15. *Tserkovnyak Ya., Brataas A., Bauer G.E.W.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. № 11. Article No. 117601.
16. *Dubowik J., Graczyk P., Krysztofik A. et al.* // Phys. Rev. Appl. 2020. V. 13. № 5. Article No. 054011.
17. *Wang Y., Deorani P., Qiu X. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. № 15. Article No. 152412.
18. *Nan T., Anderson T.J., Gibbons J. et al.* // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2019. V. 116. P. 6186.
19. *Marmion S.R., Ali M., McLaren M. et al.* // Phys. Rev. B. 2014. V. 89. № 22. Article No. 220404(R).
20. *Константинян К.И., Ульев Г.Д., Овсянников Г.А. и др.* // Труды XXVII Междунар. симп. "Нанопизика и наноэлектроника". Н. Новгород: ИПФ РАН, 2023. Т. 1. С. 221.