

УДК 538.955

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС И СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В БИСЛОЕ $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$

© 2024 г. А. Х. Кадикова^{1,*}, Б. Ф. Габбасов¹, И. В. Янилкин¹, А. И. Гумаров¹, Д. Г. Зверев¹,
А. Г. Киямов¹, Л. Р. Тагиров^{1,2}, Р. В. Юсупов¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет», Институт физики, Казань, Россия

²Казанский физико-технический институт имени Е. К. Завойского — обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Россия

*E-mail: anelyakadikova11@gmail.com

Поступила в редакцию 19.02.2024

После доработки 18.03.2024

Принята к публикации 29.03.2024

Представлены результаты исследований магнитостатических и магниторезонансных свойств тонкопленочной двухслойной структуры $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$, синтезированной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Данные магнитометрии и ферромагнитного резонанса свидетельствуют о магнитокристаллической анизотропии слоя Fe_3Al четвертого порядка в плоскости. В условиях спиновой накачки измерена зависимость от магнитного поля ЭДС, возникающей вследствие обратного спинового эффекта Холла, и оценена количественная характеристика спин-зарядового преобразования в платине — спиновый угол Холла $\theta_{SH} = 0.030 \pm 0.005$.

Ключевые слова: спиновый эффект Холла, угол Холла, ферромагнитный резонанс

DOI: 10.31857/S0367676524070135, **EDN:** PAXHPB

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее востребованных спинтронных устройств является спиновый вентиль — устройство, в простейшем случае состоящее из двух ферромагнитных (ФМ) слоев и работающее на эффекте гигантского магнитосопротивления (ГМС) [1, 2]. Спиновые вентили лежат в основе ячеек магниторезистивной памяти (MRAM — Magnetic Random Access Memory), состояния 0 и 1, в которых различаются магнитными конфигурациями (параллельным и антипараллельным направлениями намагниченностей слоев) и, соответственно, значением электрического сопротивления. Важнейшим преимуществом MRAM является энергонезависимость, то есть информация сохраняется при потере питания вычислительной системой. Для переключения ячейки между состояниями условных 0 и 1 изменяют направление намагниченности «подвижного» ФМ-слоя, в то время как намагниченность второго закреплена тем или иным способом. Классическое обращение намагниченности с использованием магнитного поля — процесс энергозатратный и, главное, медленный, поэтому важным представляется поиск явлений, с помощью которых можно переключать намагниченность одного из ФМ-слоев, не прикладывая магнитное поле.

Таким активно исследуемым эффектом сегодня служит прямой спиновый эффект Холла — явление, наблюдающееся в металлах и полупроводниках и состоящее в генерации спинового тока при протекании в них зарядового тока ([3–5], см. также обзор [6] и ссылки в нем). Как следствие, в многослойных структурах типа ФМ/НМ, где НМ — тяжелый нормальный металл, импульс зарядового тока в НМ-слое приводит к инжекции спин-поляризованных носителей в ФМ-слой [7], что может привести к преклонению намагниченности последнего.

Существует и обратный спиновый эффект Холла, который используется для детектирования спинового тока [6, 8, 9]. Количественной характеристикой спин-зарядовых преобразований в этих процессах является спиновый угол Холла $\theta_{SH} \propto j_z/j_c$, пропорциональный отношению зарядового и спинового токов (в реальности, в силу малости отношения токов, тангенс угла в первом приближении равен самому углу). Известно, что величина спинового угла Холла возрастает с увеличением спин-орбитального взаимодействия, а значит и с увеличением атомной массы. Наибольший спиновый угол Холла среди исследованных простых материалов наблюдается для Pt [10].

Один из способов создания спинового тока — так называемая спиновая накачка. Здесь величина генерируемого спинового тока зависит от параметра затухания Гильберта ферромагнитного слоя. Перспективным в этом плане сплавом является Fe_3Al — мягкий и достаточно сильный ферромагнетик при комнатной температуре. Данный материал отличается высокой однородностью, так как является интерметаллидным соединением, и характеризуется малым затуханием [11]. Также стоит отметить, что Fe_3Al является основой для сплавов Гейслера различных составов [12], которые могут служить спинтронными материалами, а также проявлять высокие термоэлектрические и магнитострикционные характеристики. Таким образом, предметом данной работы были синтез и исследования магнитных и магнитрезонансных свойств бислоя $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ на монокристаллической подложке MgO и идентификация проявления в ней спиновых эффектов Холла.

СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Образец синтезировался в камере молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ, SPESC, Berlin) методом соиспарения из высокотемпературных эффузионных ячеек. Двухслойная структура Fe_3Al (30 нм)/

Pt (15 нм) осаждалась на монокристалл MgO (001) при комнатной температуре подложки, вращавшейся со скоростью 6 градусов в секунду. Скорости осаждения железа и алюминия составляли соответственно $R_{\text{Fe}} \approx 76 \text{ \AA/час}$ и $R_{\text{Al}} \approx 28 \text{ \AA/час}$, для платины скорость составила $R_{\text{Pt}} \approx 5.5 \text{ \AA/час}$. Во избежание окисления поверхности после извлечения из вакуумной камеры, образец был закрыт слоем алюминия толщиной 3 нм. Эпитаксиальный характер слоя Fe_3Al установлен наблюдением четкой картины дифракции медленных электронов (ДМЭ). Слой Pt по данным ДМЭ эпитаксиальным не является. Была приготовлена также и пилотная одиночная пленка Fe_3Al на подложке MgO (001) при тех же условиях осаждения.

Исследование кристаллической структуры и определение типа эпитаксии проводились с помощью дифракции рентгеновских лучей. На дифрактограмме при сканировании по углу θ в геометрии Брэгга—Брентано (см. рисунок 1) на $2\theta = 65.0$ наблюдается пик, характерный для нескольких фаз (A2 , D0_3), возможных согласно фазовой диаграмме бинарной системы $\text{Fe}-\text{Al}$ [13, 14] для состава Fe_3Al . Однако отсутствие пиков, соответствующих сверхрешетке D0_3 , указывает на то, что пленка Fe_3Al кристаллизовалась в атомарно неупорядоченной A2 -фазе [13].

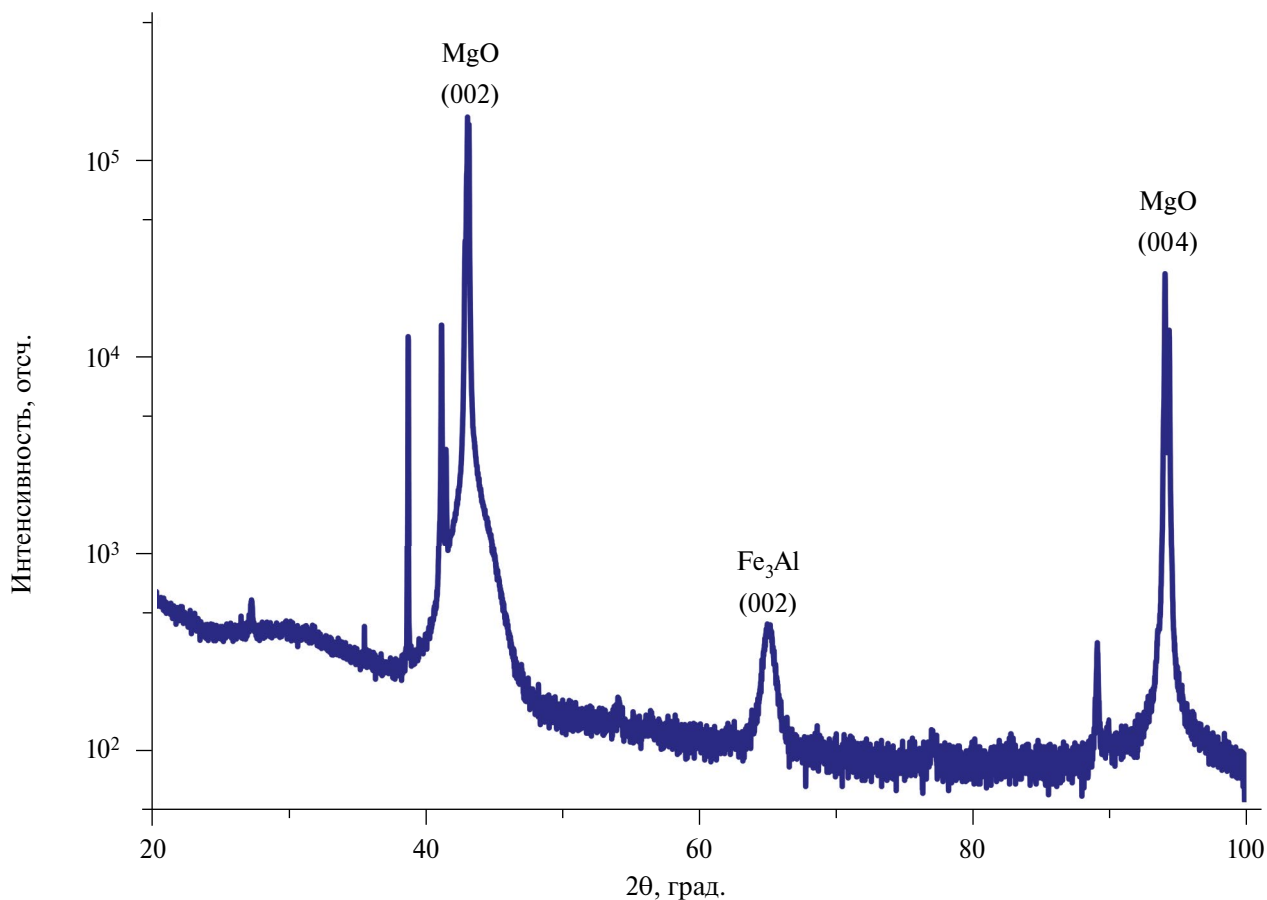


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма тонкой пленки Fe_3Al на подложке MgO (001) при сканировании по углу θ .

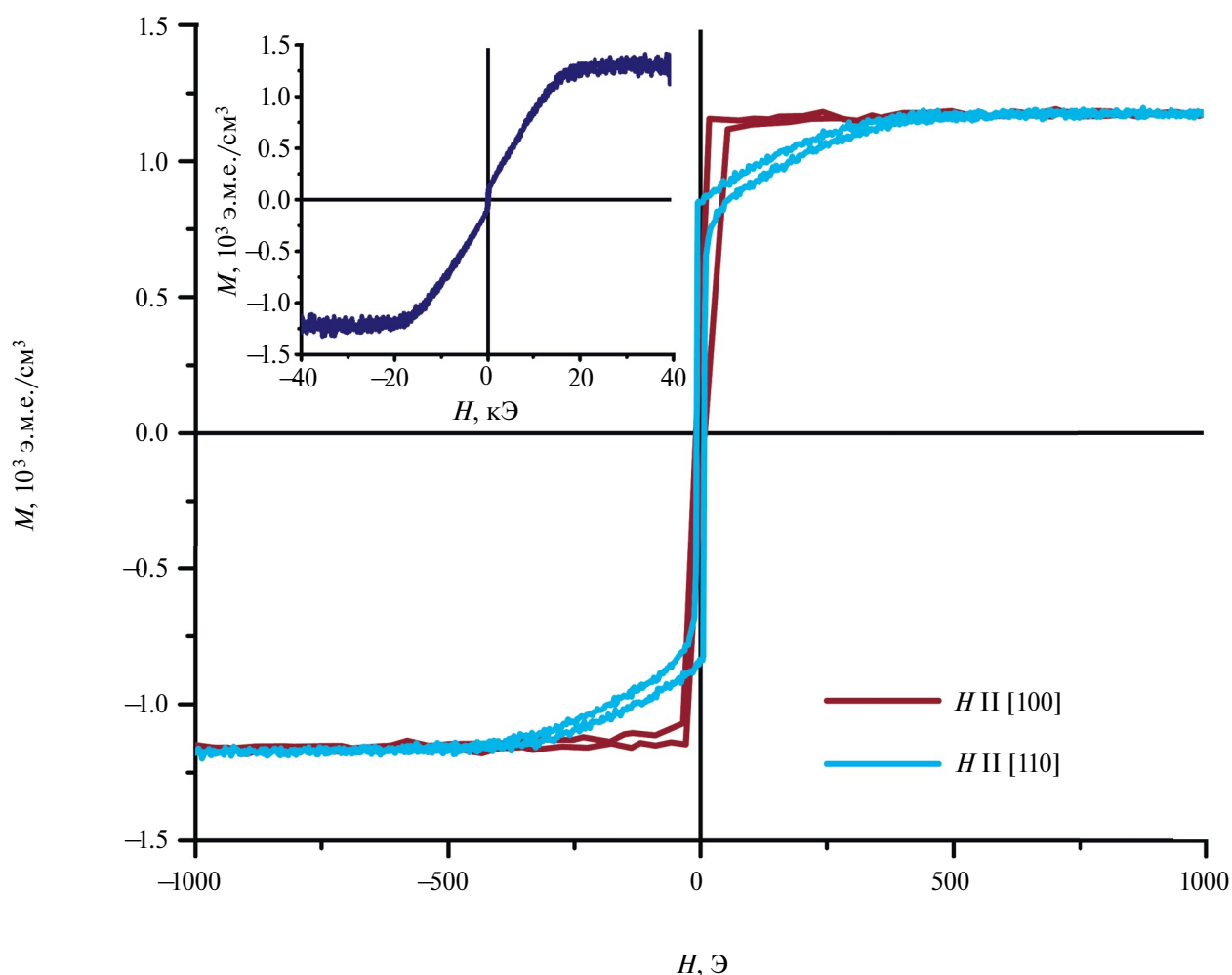


Рис. 2. Кривые перемагничивания с магнитным полем, лежащим в плоскости образцов: голубая линия — при $H \parallel [110]_{\text{Fe}_3\text{Al}}$, бордовая линия — при $H \parallel [100]_{\text{Fe}_3\text{Al}}$; на вставке представлена кривая намагничивания в магнитном поле, приложенном вдоль нормали к пленке, $H \parallel [001]_{\text{Fe}_3\text{Al}}$.

МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Исследование статических магнитных свойств пленки Fe_3Al и двухслойной структуры $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ проводилось методом вибрационной магнитометрии (ВМ, Quantum Design PPMS-9). Были получены кривые перемагничивания в плоскости образцов и в направлении нормали к плоскости (рис. 2). Обе системы обладают анизотропией типа «легкая плоскость». Кристаллографические направления $\langle 100 \rangle_{\text{Fe}_3\text{Al}}$ соответствуют осям легкого намагничивания и $\langle 110 \rangle_{\text{Fe}_3\text{Al}}$ — осям трудного намагничивания в плоскости пленок. Также установлено, что и пленка Fe_3Al , и бислой $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ являются магнитомягкими, с коэрцитивной силой ~ 9 Э и ~ 8 Э соответственно.

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Магниторезонансные свойства синтезированных образцов изучались при комнатной температуре.

На рисунке 3а представлены спектры ферромагнитного резонанса (ФМР) одиночной пленки Fe_3Al и двухслойной структуры Fe_3Al с платиной при направлении приложенного постоянного магнитного поля вдоль легкой оси в плоскости пленки. Спектры были аппроксимированы функцией, отвечающей форме линии Дайсона, характерной для проводящих образцов, откуда были определены резонансные поля и ширины линий. Результаты аппроксимации показаны на рис. 3а. Резонансное поле для одиночной пленки Fe_3Al равно $H_{\text{res}}(\text{Fe}_3\text{Al}) = 274.9 \pm 0.2$ Э, для бислоя $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ — $H_{\text{res}}(\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}) = 292.2 \pm 0.2$ Э. Значения ширины линии ФМР составили 29.6 ± 0.2 Э для пленки Fe_3Al и 36.6 ± 0.2 Э для бислоя с платиной. Наблюдается уширение резонансной линии двухслойной структуры $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ по сравнению с одиночной пленкой Fe_3Al на ~ 23 %. Такое наблюдение, на наш взгляд, указывает на возрастание джоулевых потерь в системе, связанных с генерацией зарядовых токов в платиновой компоненте в условиях спиновой накачки вследствие

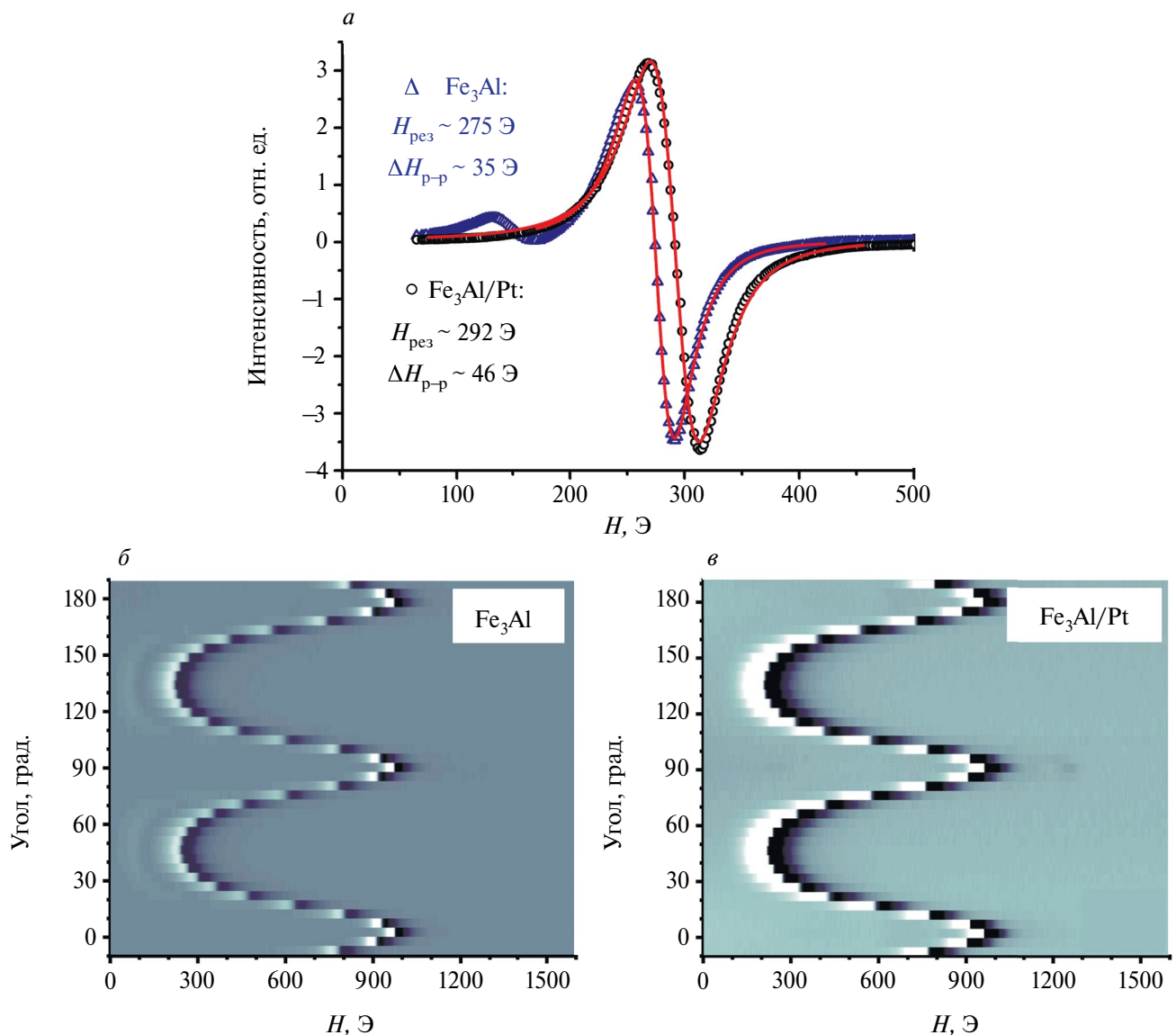


Рис. 3. Спектры ФМР одиночной пленки Fe₃Al (кружки) и Fe₃Al/Pt (треугольники) и результаты их аппроксимации (красные линии) (а); ориентационные зависимости спектров ФМР тонкой пленки Fe₃Al и двухслойной структуры Fe₃Al/Pt при вращении магнитного поля в плоскости пленок (б).

обратного спинового эффекта Холла, а также наличие стока намагниченности из слоя Fe₃Al в слой Pt.

Ориентационные зависимости резонансного поля согласуются с результатами ВМ и указывают на магнитокристаллическую анизотропию 4-го порядка в плоскости. На рисунке 3б представлены ориентационные зависимости в формате интенсивностной картины. На каждой из панелей представлено по 40 спектров, измеренных с шагом 5 градусов.

ОБРАТНЫЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Спиновая накачка является одним из способов генерации спинового тока в нормальном металле:

прецессия намагниченности в ФМ-слое двухслойной структуры перетекает в прилегающий к нему слой нормального металла [15]. Спин-орбитальное взаимодействие приводит к спин-зависимому рассеянию, которое может связывать зарядовые и спиновые токи в проводящих материалах (спиновые эффекты Холла).

На рисунке 4 представлен сигнал эдс, генерируемой в условиях спиновой накачки в двухслойной структуре Fe₃Al/Pt, в сопоставлении со спектром ФМР в той же ориентации образца. Напряжение, детектируемое на концах образца, имеющего форму полоски шириной 0.9 мм и длиной 5 мм, в ФМР-эксперименте можно записать как [16]

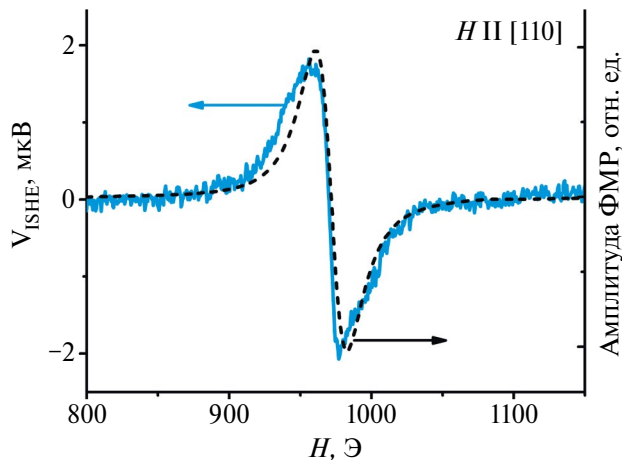


Рис. 4. Спин-холловская ЭДС, возникающая в условиях спиновой накачки из-за проявления обратного спинового эффекта Холла в двухслойной структуре $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ (сплошная линия). Прерывистой линией показан спектр ФМР, записанный в той же ориентации образца.

$$V_{ISHE} = \frac{w\theta_{SH}\lambda_{Pt}\tanh(d_{Pt}/2\lambda_{Pt})}{d_{Pt}\sigma_{Pt} + d_{\text{Fe}_3\text{Al}}\sigma_{\text{Fe}_3\text{Al}}}\left(\frac{2e}{\hbar}\right)j_s^{F/N}, \quad (1)$$

где λ_{Pt} — длина спиновой диффузии в Pt, w — ширина образца, $d_{\text{Pt}(\text{Fe}_3\text{Al})}$ — толщина слоя Pt (Fe_3Al), $\sigma_{\text{Pt}(\text{Fe}_3\text{Al})}$ — проводимость слоя Pt (Fe_3Al). Выражение для плотности спинового тока $j_s^{F/N}$, генерируемого в процессе спиновой накачки, следующее:

$$j_s^{F/N} = \frac{g_r^{\uparrow\downarrow}\gamma^2\hbar^2\left[4\pi M_s\gamma + \sqrt{(4\pi M_s)^2\gamma^2 + 4\omega^2}\right]}{8\pi\alpha^2\left[(4\pi M_s)^2\gamma^2 + 4\omega^2\right]}, \quad (2)$$

где $g_r^{\uparrow\downarrow}$ — реальная часть спин-миксинг-проводимости, $\hbar$ — амплитуда радиочастотного электромагнитного поля в ЭПР-спектрометре, γ — гиромагнитное отношение в ферромагнетике, α — параметр затухания Гильберта, M_s — намагниченность насыщения. Согласно [17], реальную часть спин-миксинг-проводимости можно найти как

$$g_r^{\uparrow\downarrow} = \frac{\hbar}{e^2} \frac{1}{\rho_{Pt}\lambda_{Pt}}. \quad (3)$$

Используя выражения (1), (2) и (3), можно оценить спиновый угол Холла платины. Значения проводимостей σ_{Pt} и $\sigma_{\text{Fe}_3\text{Al}}$ были измерены методом Ван дер Пау и составили $6.76 \cdot 10^5 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ и $6.0 \cdot 10^5 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ соответственно. Параметр затухания Гильберта определялся как $\alpha = \gamma W/2\omega$, где W — ширина линии ФМР на полувысоте. В расчетах использовалось значение длины спиновой диффузии $\lambda_{Pt} = 10$ нм. Полученное значение спинового угла Холла составило $\theta_{SH}^{Pt} = 0.030 \pm 0.005$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В синтезированной двухслойной структуре $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ была обнаружена магнитокристаллическая анизотропия ФМ-слоя Fe_3Al четвертого порядка в плоскости. Определены направления легких и трудных осей намагничивания. Обратный спиновый эффект Холла в бислое $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Pt}$ проявился в уширении резонансной линии, а также в сигнале эдс в условиях спиновой накачки. На базе полученных экспериментальных данных оценен спиновый угол Холла в платине. Полученное значение $\theta_{SH}^{Pt} = 0.030 \pm 0.005$ хорошо согласуется с приведенной в работе [10] зависимостью угла Холла от длины спиновой диффузии.

Работа была поддержана программой стратегического академического лидерства Казанского федерального университета («Приоритет-2030»). Работа Гумарова А. И. выполнена за счет субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету в рамках темы государственного задания на научные исследования № FZSM-2023-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ферм А.* // УФН. 2008. Т. 178. № 12. С. 1336; *Fert A.* // Phys. Usp. 2008. V. 51. P. 1336.
2. *Грюнберг П.А.* // УФН. 2008. Т. 178. № 12. С. 1349; *Gruenberg P.A.* // Phys. Usp. 2008. V. 51. P. 1349.
3. *Kato Y.K., Myers R.C., Gossard A.C. et al.* // Science. 2004. V. 306. No. 5703. P. 1910.
4. *Wunderlich J., Kaestner B., Sinova J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. No. 4. Art. No. 047204.
5. *Valenzuela S.O., Tinkham M.* // Nature. 2006. V. 442. No. 7099. P. 176.
6. *Sinova J., Valenzuela S.O., Wunderlich J. et al.* // Rev. Mod. Phys. 2015. V. 87. No. 4. P. 1213.
7. *Трушин А.С., Кичин Г.А., Звездин К.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 1. С. 105; *Trushin A.S., Kichin G.A., Zvezdin K.A.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 1. P. 88.
8. *Saitoh E., Ueda M., Miyajima H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. No. 18. Art. No. 182509.
9. *Sandweg C.W., Kajiwara Y., Ando K. et al.* // App. Phys. Lett. 2010. V. 97. No. 25. Art. No. 252504.
10. *Wang Y., Deorani P., Qiu X. et al.* // App. Phys. Lett. 2014. V. 105. No. 15. Art. No. 152412.
11. *Wei Y., Zhang W., Lv B. et al.* // Sci. Advances. 2021. V. 7. No. 4. Art. No. eabc5053.
12. *Костенко М.Г., Лукоянов А.В., Шредер Е.И.* // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. № 1–2. С. 128; *Kostenko M.G., Lukoyanov A.V., Shreder E.I.* // JETP Lett. 2018. V. 107. No. 2. P. 126.
13. *Ikeda O., Ohnuma I., Kainuma R. et al.* // Intermetallics. 2001. V. 9. No. 9. P. 755.
14. *Матюнина М.В., Соколовский В.В., Загребин М.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 7. С. 927;

- Matyunina M.V., Sokolovskiy V.V., Zagrebin M.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 7. P. 844.
15. *Tserkovnyak Y., Brataas A., Bauer G.E.W. // Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. No. 11. Art. No. 117601.
16. *Ando K., Takahashi S., Ieda J. et al. // J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. No. 10. Art. No. 103913.
17. *Dubowik J., Graczyk P., Krysztofik A. et al. // Phys. Rev. Appl.* 2020. V. 13. No. 5. Art. No. 054011.

Ferromagnetic resonance and the spin Hall effect in the Fe₃Al/Pt bilayer

A. Kh. Kadikova^{1, *}, B. F. Gabbasov¹, I. V. Yanilkin¹, A. I. Gumarov¹, D. G. Zverev¹,
A. G. Kiiamov¹, L. R. Tagirov^{1, 2}, R. V. Yusupov¹

¹ Kazan Federal University, Institute of Physics, Kazan, 420008, Russia

² Zavoisky Physical-Technical Institute, Federal Research Center Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, 420029, Russia

*e-mail: anelyakadikova11@gmail.com

We presented the results of studies of the magnetostatic and magnetic resonance properties of a Fe₃Al/Pt thin-film bilayer structure synthesized by the molecular beam epitaxy method. Magnetometry and ferromagnetic resonance data indicate four-fold in-plane magnetocrystalline anisotropy of the Fe₃Al layer. Under spin pumping conditions, the magnetic field dependence of the voltage signal arising due to the inverse spin Hall effect was measured, and the quantitative characteristic of the spin-charge transformation, the spin-Hall angle, in platinum was assessed as $\theta_{SH} = 0.030 \pm 0.005$.

Keywords: Spin-Hall effect, Hall angle, ferromagnetic resonance