

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.635:537.611.44

### ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СПИНОВОЙ НАКАЧКИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ Ru/Pt, Ru/W

© 2024 г. А. С. Пахомов<sup>a, b, \*</sup>, П. Н. Скирдков<sup>b, c</sup>,  
В. В. Юрлов<sup>a, b</sup>, А. И. Чернов<sup>a</sup>, К. А. Звездин<sup>b</sup>

<sup>a</sup>МФТИ, Физтех, Центр двумерных материалов и фотоники,  
Институтский переулок, 9, Долгопрудный, 141701 Россия

<sup>b</sup>ООО “Новые спинтронные технологии”, Большой бульвар, 30, стр.1, Москва, 121205 Россия

<sup>c</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
ГСП-1, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: a.pakhomov@nst.tech

Поступила в редакцию 05.09.2023 г.

После доработки 16.12.2023 г.

Принята к публикации 22.12.2023 г.

Исследованы сплошные пленки гетероструктур Ru/Pt, Ru/W методом ферромагнитного резонанса. Получены температурные зависимости параметра затухания Гильберта и напряжения обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ) в температурном диапазоне 5–290 К. Обнаружено аномальное увеличение параметра затухания Гильберта в районе 50 К и изменение напряжения ОСЭХ. Сделан вывод о том, что увеличение параметра затухания Гильберта имеет спин-орбитальную природу.

**Ключевые слова:** ферромагнитный резонанс, спинтроника, спиновая накачка, обратный спиновый эффект Холла (ОСЭХ), параметр затухания Гильберта

**DOI:** 10.31857/S0015323024050022, **EDN:** XXVXRV

#### ВВЕДЕНИЕ

Возможность контроля динамики намагниченности является критически важной характеристикой передовых магнитных материалов современной спинтроники [1]. Благодаря возможности управлять динамикой намагниченности сегодня существует ряд различных спинтронных устройств, таких как SOT-MRAM [2–4], оптически переключаемая сверхбыстрая память [5, 6], а также большое количество магнанных устройств [7, 8]. В таких устройствах динамику намагниченности обычно характеризует феноменологический параметр затухания Гильберта  $\alpha$  [9], который определяет быстродействие устройства, критический ток переключения и потребление энергии.

Существует несколько механизмов, объясняющих затухание динамики намагниченности. С одной стороны, затухание всегда зависит от характеристик самого материала, таких как рассеяние спин-поляризованных электронов проводимости на намагниченности [10], спиновое рассеяние на дефектах решетки [11, 12],

электрон-электронное и электронно-примесное рассеяние [13], двухмагннное рассеяние на дефектах, поверхностях, границах раздела [14] и др. Величину затухания оценивали как теоретически [15–17], так и определяли экспериментально [18, 19] для переходных металлов и сплавов. Были продемонстрированы материалы с рекордно низким затуханием, такие как железо-иттриевые гранаты [20–22], сплавы Гейслера [23–25] и железо, легированное ванадием [26–28]. Все упомянутые материалы достаточно сложны в изготовлении, что позволяет сплавам переходных металлов, таким как пермаллой Ru или CoFeB, оставаться самыми распространенными в приложениях. С другой стороны, угловой момент намагниченности подвержен влиянию спиновых токов, что также влияет на характеристики затухания. В спинтронных гетероструктурах типа ферромагнетик/материал с большим спин-орбитальным взаимодействием одним из самых эффективных методов генерации спинового тока является спиновая накачка. Во время ферромагнитного резонанса, когда резонансная частота прецессии намагниченности совпадает

с частотой внешнего переменного магнитного поля, начинает течь спиновый ток из ферромагнитного слоя в прилегающий слой. Таким образом изменяется магнитный момент свободного слоя, что может приводить к изменению ширины резонансной линии.

Спиновый ток можно также измерить с помощью обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ). Благодаря ОСЭХ спиновый ток преобразуется в зарядовый ток вследствие спин-орбитального взаимодействия. В то же время наличие зарядового тока может приводить к возникновению спинового тока — данное явление называется спиновым эффектом Холла.

В настоящей работе нами был проведен эксперимент по спиновой накачке в широком температурном диапазоне (5–300 К) для образцов гетероструктур  $\text{Ru}(20 \text{ нм})/\text{W}(5 \text{ нм})$  и  $\text{Ru}(20 \text{ нм})/\text{Pt}(5 \text{ нм})$ . Были определены значения параметра затухания Гильберта  $\alpha$  и эффективной намагниченности насыщения  $M_{\text{eff}}$  для упомянутых выше структур. Также было измерено напряжение ОСЭХ в том же температурном диапазоне.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Набор образцов изготавливали с помощью магнетронного напыления на установке АТС-2200-UNV. На сапфировую подложку сначала напыляли слой тяжелого металла, а затем слой ферромагнетика. Для лучшего качества интерфейса тяжелый металл/ферромагнетик слой напыляли методом *in situ*. Толщины образцов определяли с помощью рентгеновского дифрактометра Thermo ARL X'TRA. Толщина слоя тяжелого металла (Pt, W) составила  $5 \pm 0.2$  нм, толщина слоя пермаллоя составила  $20 \pm 0.2$  нм.

Набор образцов исследовали методом ферромагнитного резонанса в криостате замкнутого цикла Cryotrade CFSG-400. Для возбуждения прецессии намагниченности в ферромагнитном слое образец располагали на полосковом копланарном волноводе, подключенном к векторному анализатору цепей (ВАЦ) Keysight P5004A через коаксиальные кабельные сборки. Чтобы не было электрического контакта между сигнальной линией плоска и образцом, между ними располагали пленку политетрафторэтилена толщиной 5 мкм. Характеристики волновода были рассчитаны таким образом, чтобы его импеданс равнялся 50 Ом. Далее полосковую линию с образцом помещали на холодном пальце криостата.

Параметр  $S_{21}$  (отношение мощности на порте приемнике к мощности на порте излучателе в ВАЦ) измеряли на фиксированной частоте в диапазоне 5–16 ГГц в зависимости от внешнего

магнитного поля  $H$ . Магнитное поле создавали электромагнитом, подключенным к источнику питания, управляемым с компьютера, и варьировали в диапазоне 4000–100 Э. Затем экспериментальные данные аппроксимировали выражением (1) — суммой двух Лоренцианов, где  $k_s$  — коэффициент при симметричной части,  $k_{AS}$  — коэффициент при несимметричной части,  $\Delta H$  — ширина резонансной линии на полувысоте,  $H_{\text{res}}$  — положение резонансного пика [29, 30]. Для определения параметра затухания Гильберта зависимость ширины резонансной линии от частоты аппроксимировали выражением (2) [30]. Данную операцию проводили для каждой температуры.

$$S_{21}(H) = k_s \frac{\Delta H^2}{\Delta H^2 + 4(H - H_{\text{res}})^2} + k_{AS} \frac{\Delta H(H - H_{\text{res}})}{\Delta H^2 + 4(H - H_{\text{res}})^2}; \quad (1)$$

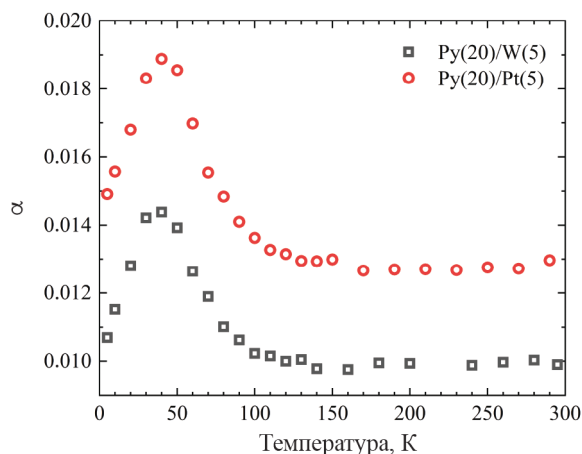
$$\Delta H = \frac{4\pi\alpha f}{\gamma_e}. \quad (2)$$

Напряжение ОСЭХ измеряли на том же стенде, но с небольшими доработками. В тракт был добавлен СВЧ-усилитель с малым уровнем собственных шумов. На образец подавали мощность 60 мВт. К образцу были подведены контакты, для детектирования изменения напряжения. Напряжение ОСЭХ детектировали с помощью нановольтметра Keithley 2182A. Полученные данные затем аппроксимировали выражением (3), в котором  $V_s$ , коэффициент при симметричной части Лорениана, отвечает за напряжение ОСЭХ,  $V_{AS}$ , коэффициент при антисимметричной части, относится к напряжению аномального эффекта Холла,  $\Delta H$  и  $H_{\text{res}}$  являются шириной резонансной линии и резонансным полем соответственно [30]:

$$V(H) = V_s \frac{\Delta H^2}{\Delta H^2 + 4(H - H_{\text{res}})^2} + V_{AS} \frac{\Delta H(H - H_{\text{res}})}{\Delta H^2 + 4(H - H_{\text{res}})^2}. \quad (3)$$

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

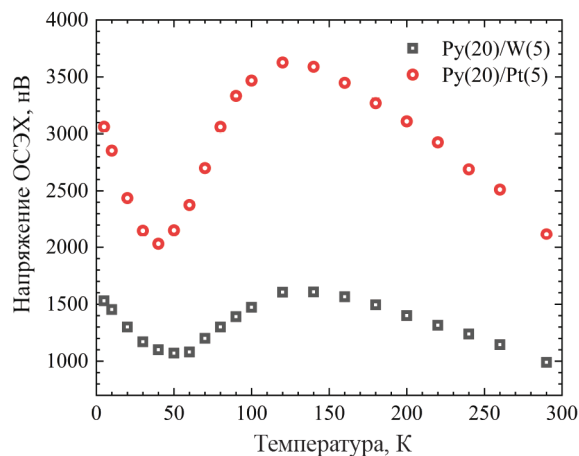
Температурная зависимость параметра затухания Гильберта представлена на рис. 1. Из графика видно, что наличие слоя тяжелого металла (W, Pt) ведет к увеличению  $\alpha$  во всём температурном диапазоне в сравнении с чистой пермаллоевой пленкой толщиной 20 нм, где  $\alpha$  принимает значения в районе 0.007 в том же температурном диапазоне [29, 30].



**Рис. 1.** Зависимость параметра затухания Гильберта для образцов Py/W (черные полые квадраты), Py/Pt (красные полые круги). Отчетливо наблюдается увеличение параметра Гильберта при уменьшении температуры от 100 К до 50 К, далее вплоть до 5 К идет уменьшение параметра.

В нашем случае в диапазоне температур от 295 до 100 К параметр Гильберта равен 0.01 для образца Py/W и 0.013 для структуры Py/Pt. Далее с уменьшением температуры для обоих образцов наблюдается характерное увеличение  $\alpha$  до значений 0.014 (Py/W) и 0.019 (Py/Pt) при 50 К, затем наблюдается спад параметра вплоть до значений 0.011 (Py/W) и 0.015 (Py/Pt). Ранее на подобных структурах наблюдали схожее поведение температурных зависимостей, которое связывают с дополнительным слагаемым в суммарном затухании системы, которое возникает из влияния шероховатости поверхности образца и интерфейса тяжелый металл/ферромагнетик [29, 30, 31]. В случае с тонкими пленками пермаллоя также наблюдали максимум на температуре 50 К, но на образцах с меньшей толщиной пермаллоя (3 и 5 нм). В этом случае такое поведение системы объясняли тем, что имеет место спиновый переориентационный переход на поверхности пленки при низкой температуре [29]. В случае наших структур, где есть слой с материалом с большим спин-орбитальным взаимодействием (Pt, W), вышеупомянутый пик имеет большую амплитуду. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что увеличение параметра затухания Гильберта в указанном температурном диапазоне имеет спин-орбитальный характер. Для подтверждения этой гипотезы нами был проведен эксперимент по измерению напряжения ОСЭХ.

В данной геометрии измеренное напряжение будет определяться не только ОСЭХ, но и так называемым спин-выпрямительным эф-



**Рис. 2.** Зависимость напряжения ОСЭХ для образцов Py/W (черные полые квадраты), Py/Pt (красные полые круги). Наблюдается увеличение напряжения ОСЭХ с уменьшением температуры от комнатной до ~130 К. Далее вплоть до 50 К идет уменьшение напряжения. Затем наблюдается резкий подъем.

фектом (СВЭ). СВЭ возникает вследствие синхронизации индуцированных поверхностных токов, текущих в образце, и колебаний магнетосопротивления, вызванных переменным высокочастотным магнитным полем. Разделение этих двух эффектов является довольно трудной задачей, в которой важную роль играет размер образцов, их толщины и взаимные ориентации слоев. В нашем случае размеры и толщина образцов одинаковы, различие только в материале тяжелого металла. Стоит учесть, что расстояние от центральной линии волновода до образца сравнительно велико (5 мкм) и образец отделен от сигнальной линии слоем диэлектрика (ПТФЭ). Принимая во внимание все вышеупомянутые факторы, мы считаем, что вклад от спин-выпрямительного эффекта в нашем случае минимален. На рис. 2 представлена температурная зависимость напряжения ОСЭХ для образцов Py/W и Py/Pt. Здесь мы видим увеличение напряжения ОСЭХ в обоих образцах от комнатной температуры до ~130 К. Далее наблюдается спад напряжения до значений комнатной температуры при 50 К, что совпадает положением пика по температуре в  $\alpha$ , и затем вплоть до 5 К напряжение ОСЭХ снова начинает увеличиваться. Такое поведение может быть связано с тем, что в нашей системе помимо упомянутых выше ОСЭХ и СВЭ присутствует еще напряжение, связанное с аномальным эффектом Нернста (АЭН), которое имеет противоположный знак. В диапазоне температур от 50 до 5 К начинает существенно расти градиент температур по толщине образца, за счет теплопередачи от копланарной линии к

образцу, вследствие чего и возникает АЭН. Таким образом, при низких температурах АЭН начинает играть доминирующую роль, что приводит к снижению измеряемого напряжения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы гетероструктуры  $\text{Ru}(20 \text{ нм})/\text{W}(5 \text{ нм})$  и  $\text{Ru}(20 \text{ нм})/\text{Pt}(5 \text{ нм})$  методом ферромагнитного резонанса с температурным разрешением 5–295 К. Обнаружено характерное увеличение параметра затухания Гильберта в области 50 К. Данное поведение имеет спин-орбитальный характер.

Измерено напряжение обратного спинового эффекта Холла с разрешением по температуре, и обнаружен спад напряжения в области 50 К. Данное поведение мы связываем с наличием аномального эффекта Нернста, который начинает доминировать в области температур ниже 50 К.

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за финансирование работ в рамках Соглашения № 075-11-2022-046.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azzawi S., Hindmarch A., and Atkinson D. Magnetic Damping Phenomena in Ferromagnetic Thin-films and Multilayers // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. No. 473001.
2. Khvalkovskiy A.V., Apalkov D., Watts S., Chepulsii R., Beach R.S., Ong A., Tang X., Driskill-Smith A., Butler W.H., Visscher P.B. Basic Principles of STT-MRAM cell operation in memory arrays // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. No. 074001.
3. Apalkov D., Khvalkovskiy A., Watts S., Nikitin V., Tang X., Lottis D., Moon K., Luo X., Chen E., Ong A., Driskill-Smith A., Krounbi M. Spin-transfer torque magnetic random access memory (STT-MRAM) // ACM J. Emerging Technologies in Computing Systems. 2013. (JETC) 9. 1.
4. Ramaswamy R., Lee J.M., Cai K., Yang H. Recent advances in spin-orbit torques: Moving towards device applications // Appl. Phys. Rev. 2018. V. 5. No. 031107.
5. Kirilyuk A., Kimel A.V. and Rasing T. Ultrafast optical manipulation of magnetic order // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. No. 2731.
6. Polley D., Pattabi A., Chatterjee J., Mondal S., Jhuria K., Singh H., Gorchon J., Bokor J. Progress toward picosecond on-chip magnetic memory // Appl. Phys. Letters. 2022. V. 120. No. 140501.
7. Kruglyak V., Demokritov S., and Grundler D. Magnonics // J. Phys. D: Applied Physics, 2010. V. 43. No. 264001.
8. Chumak A.V., Vasyuchka V.I., Serga A.A., and Hillebrands B. Magnon Spintronics // Nature Phys. 2015. V. 11. No. 453.
9. Gilbert T.L. A Lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetization field // Phys. Rev. 1955. V. 100. No. 1243.
10. Zhang S. and Li Z. Roles of Nonequilibrium Conduction Electrons on the Magnetization Dynamics of Ferromagnets // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. No. 127204.
11. Kune's J. and Kambersky V. First-principles investigation of the damping of fast magnetization precession in ferromagnetic 3d metals // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. No. 212411.
12. Kambersky V. Spin-orbital Gilbert damping in common magnetic metals // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. No. 134416.
13. Hankiewicz E.M., Vignale G., and Tserkovnyak Y. Inhomogeneous Gilbert damping from impurities and electron-electron interactions // Phys. Rev. B. 2008. V. 78. No. 020404.
14. Arias R. and Mills D.L. Extrinsic contributions to the ferromagnetic resonance response of ultrathin films // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. No. 7395.
15. Ebert H., Mankovsky S., K'odderitzsch D. and Kelly P.J. Ab Initio Calculation of the Gilbert Damping Parameter via the Linear Response Formalism // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. No. 066603.
16. Gilmore K., Idzerda Y.U., and Stiles M.D. Identification of the Dominant Precession-Damping Mechanism in Fe, Co, and Ni by First-Principles Calculations // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. No. 027204.
17. Mankovsky S., K'odderitzsch D., Woltersdorf G., and H. Ebert. First-principles calculation of the Gilbert damping parameter via the linear response formalism with application to magnetic transition metals and alloys // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. No. 014430.
18. Schoen M.A.W., Thonig D., Schneider M.L., Silva T.J., Nembach H.T., Eriksson O., Karis O., Shaw J.M. Ultra-low magnetic damping of a metallic ferromagnet // Nature Physics. 2016. V. 12. No. 839.
19. Schoen M.A.W., Lucassen J., Nembach H.T., Silva T.J., Koopmans B., Back C.H. and Shaw J.M. Magnetic properties in ultrathin 3d transition-metal binary alloys. II. Experimental verification of quantitative theories of damping and spin pumping // Phys. Rev. B. 2017. V. 95. No. 134411.
20. Chang H., Li P., Zhang W., Liu T., Hoffmann A., Deng L., Wu M. Nanometer-Thick Yttrium Iron Garnet Films with Extremely Low Damping // IEEE Magnetics Letters. 2014. V. 5. No. 1.
21. Emori S., Yi D., Crossley S., Wissner J.J., Balakrishnan P.P., Khodadadi B., Shafer P., Klewe C., N'Diaye A.T., Urwin B.T., Mahalingam K., Suzuki Y. Ultralow Damping in Nanometer-Thick Epitaxial Spinel Ferrite Thin Films // Nano Letters. 2018. V. 18. No. 4273.
22. Jermain C.L., Paik H., Aradhya S.V., Buhrman R.A., Schlom D.G., Ralph D.C. Low-damping sub-10-nm thin films of lutetium iron garnet grown by molecular-beam epitaxy // Appl. Phys. Letters. 2016. V. 109. No. 192408.

23. *Andrieu S., Neggache A., Hauet T., Devolder T., Hallal A., Chshiev M., Bataille A.M., Fevre P.L., Bertran F.* Direct evidence for minority spin gap in the  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  Heusler compound // *Phys. Rev. B*. 2016. V. 93. No. 094417.
24. *Oogane M., McFadden A. P., Fukuda K., Tsunoda M., Ando Y., Palmstrom J.* Low magnetic damping and large negative anisotropic magnetoresistance in half-metallic  $\text{Co}_{2-x}\text{Mn}_{1+x}\text{Si}$  Heusler alloy films grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Letters*. 2018. V. 112. No. 262407.
25. *Guillemard C., Petit-Watelot S., Pasquier L., Pierre D., Ghanbaja J., Rojas-Sanchez J.-C., Batasille A., Rault J., Le Fevre P., Bertran F. and Andrieu S.* Ultra-low magnetic damping in  $\text{Co}_2\text{Mn}$ - based Heusler compounds: promising materials for spintronic // *Phys. Rev. Appl.* 2019. V. 11. No. 064009.
26. *Scheck C., Cheng L., Barsukov I., Frait Z., Bailey W.E.* Low Relaxation Rate in Epitaxial Vanadium-Doped Ultrathin Iron Films // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. No. 117601.
27. *Devolder T., Tahmasebi T., Eimer S., Hauet T., Andrieu S.* Compositional dependence of the magnetic properties of epitaxial  $\text{FeV/MgO}$  thin films // *Appl. Phys. Letters*. 2013. V. 103. No. 242410.
28. *Arora M., Delczeg-Czirjak E. K., Riley G., Silva T.J., Nembach H.T., Eriksson O., Shaw J.M.* Magnetic damping in polycrystalline  $\text{Fe-V}$  thin film alloys // *Phys. Rev. Appl.* 2021. V. 15. No. 054031.
29. *Zhao Y., Song Q., Yang S.-H., Su T., Yuan W., Parkin S.S.P., Shi J. and Han W.* Experimental Investigation of Temperature-Dependent Gilbert Damping in Permalloy Thin Films // *Sci. Reports*. 2016. V. 6. No. 1.
30. *Martin-Rio S., Pomar A., Balcells L., Bozzo B., Frontera C., Martinez B.* Temperature dependence of spin pumping and inverse spin Hall effect in permalloy/Pt bilayers // *J. Magn. Magn. Mater.* 2020. V. 500. No. 166319.
31. *Barati E., Cinal M., Edwards D.M. and Umerski A.* Gilbert damping in magnetic layered systems // *Phys. Rev. B*. 2014. V. 90. No. 014420.

## THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF SPIN PUMPING IN Py/W AND Py/Pt BILAYERS

**A. S. Pakhomov<sup>1,2,\*</sup>, P. N. Skirdkov<sup>2,3</sup>, V. V. Yurlov<sup>1,2</sup>, A. I. Chernov<sup>1</sup>, K. A. Zvezdin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Phystech, Center for Two-Dimensional Materials and Photonics, Dolgoprudny, 141701 Russia*

<sup>2</sup>*LLC New Spintronic Technologies, Moscow, 121205 Russia*

<sup>3</sup>*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: a.pakhomov@nst.tech*

The solid thin films of Py/Pt and Py/W heterostructures have been studied using the ferromagnetic resonance method. The temperature dependences of the Gilbert damping parameter and voltage of the the inverse spin Hall effect (ISHE) have been obtained in the 5–290 K temperature range. An anomalous increase in the Gilbert damping parameter in the vicinity of 50 K and a change in the voltage of ISHE has been found. It has been concluded that an increase in the Gilbert damping parameter is of spin-orbital nature.

**Keywords:** ferromagnetic resonance, spintronics, spin pumping, inverse spin Hall effect (ISHE), Gilbert damping parameter