

ФИЗИКА МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ/PHYSICS OF MAGNETIC PHENOMENA

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.21>

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР МЕТОДОМ МАНДЕЛЬШТАМ-БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Научная статья

Мурзина М.С.^{1,*}, Телегин А.В.², Бессонов В.Д.³, Макарова М.В.⁴, Теплов В.С.⁵

² ORCID : 0000-0001-7209-4307;

³ ORCID : 0000-0002-7837-4366;

⁴ ORCID : 0000-0002-2826-3844;

⁵ ORCID : 0000-0002-3986-4768;

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

^{1, 2, 3, 4, 5} Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (murzina.m.s[at]yandex.ru)

Аннотация

В работе с помощью Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии сделана оценка и изучена эволюция антисимметричного обменного взаимодействия Дзялошинского-Мории в тонкопленочных наноструктурах Pt/Co с промежуточным аморфным сплавом $Pt_{1-x}Co_x$. Максимальная величина ВДМ -0.6 мДж/м² получена для трехслойной структуры со сплавами $Pt_{1-x}Co_x$ разного состава. Получено, что, варьируя толщину, состав слоёв и типа интерфейсов тонкопленочной наноструктуры, можно эффективно моделировать энергию взаимодействия Дзялошинского-Мории. Таким образом, контроль качества и типов интерфейсов позволяет эффективно управлять спин-орбитально связанными эффектами в таких структурах. Кроме того, показано, что величина взаимодействия Дзялошинского-Мории для трехслойной наноструктуры слабо зависит от температуры, что согласуется с поведением намагниченности Co.

Ключевые слова: Мандельштам-Бриллюэновская спектроскопия, взаимодействие Дзялошинского-Мории, наноструктуры, тонкие пленки, интерфейс.

STUDY OF METALLIC NANOSTRUCTURES USING MANDELSTAM-BRILLOUIN SPECTROSCOPY

Research article

Murzina M.S.^{1,*}, Telegin A.V.², Bessonov V.D.³, Makarova M.V.⁴, Teplov V.S.⁵

² ORCID : 0000-0001-7209-4307;

³ ORCID : 0000-0002-7837-4366;

⁴ ORCID : 0000-0002-2826-3844;

⁵ ORCID : 0000-0002-3986-4768;

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

^{1, 2, 3, 4, 5} M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (murzina.m.s[at]yandex.ru)

Abstract

In this work, using Mandelstam-Brillouin spectroscopy, the evolution of the antisymmetric Dzyaloshinski-Moriya exchange interaction in thin-film Pt/Co nanostructures with an intermediate amorphous $Pt_{1-x}Co_x$ alloy was evaluated and studied. The maximum value of VDM -0.6 mJ/m² was obtained for a three-layer structure with $Pt_{1-x}Co_x$ alloys of different compositions. It was found that by varying the thickness, composition of the layers, and type of interfaces of the thin-film nanostructure, it is possible to effectively model the Dzyaloshinski-Moriya interaction energy. Thus, controlling the quality and types of interfaces allows effective management of spin-orbital coupled effects in such structures. In addition, it is shown that the value of the Dzyaloshinski-Moriya interaction for a three-layer nanostructure is weakly dependent on temperature, which is consistent with the behaviour of the magnetisation of Co.

Keywords: Mandelstam-Brillouin spectroscopy, Dzyaloshinski-Moriya interaction, nanostructures, thin films, interface.

Введение

Необходимость совершенствования средств хранения и обработки информации вызывается непрерывно растущим потоком информации (Big Data), цифровизацией всех сфер деятельности человека (IoT), нехваткой энергоресурсов и конкурентным спросом на скорость обработки данных. Исследования на стыке топологического магнетизма и спинтроники открывают возможности создания сверхбыстрых наноразмерных устройств передачи и обработки данных, функционирующих на СВЧ и ТГц частотах [1], [2], [3]. Среди множества магнитных материалов тонкопленочные металлические наноструктуры обладают уникальными магнитными, спин-транспортными свойствами и технологическими характеристиками [4], [5]. Например, с наличием сильного спин-орбитального эффекта, антисимметричного взаимодействия Дзялошинского-Мории (ВДМ) [6] в многослойных наноструктурах типа тяжелый металл/ферромагнетик связано спонтанное, либо параметрическое зарождение киральных спиновых текстур

— скирмионов [1], [7], [8], [9], которые являются альтернативными перспективными носителями информации и могут быть использованы для создания новых элементов памяти и спинтронных устройств. Однако есть сложности: например, до сих пор неясны механизмы передвижения и стабильной фиксации скирмионов, нет четкого понимания механизмов интерфейсного ВДМ и роли интерфейсов в таких нано-структурах, какие материалы или структуры являются оптимальными для практической реализации скирмионики и т. д.

В данной работе проведено исследование эволюции ВДМ в многослойных тонкопленочных наноструктурах Pt/Co разной конфигурации, в т. ч. с промежуточным аморфным сплавом $Pt_{50}Co_{50}$ и без. В последнем случае структурная инверсионная симметрия нарушается по толщине исключительно за счет заданного градиента состава внутри пленки. Таким образом, в таких «метаматериалах» контролируемый состав позволяет манипулировать распределением векторов ВДМ в трех измерениях, что важно для проектирования устройств спинтроники на основе скирмионов.

Методы исследования и образцы

Наноструктуры Pt/Co в виде многослойных поликристаллических пленок изготавливались методом магнетронного распыления при постоянном токе в среде чистого Ag при давлении $5 \cdot 10^{-9}$ Торр при комнатной температуре. Металлы осаждались на полированные пластины оксидированного кремния. Для всех структур использовался буферный слой Ta на подложке для улучшения кристаллическости слоя Pt и крышка из Ta для защиты от окисления. После синтеза образцы отжигались в вакууме при 300°C в течение 1 часа. Магнитные параметры оценивались на вибрационном магнетометре Lakeshore 7400.

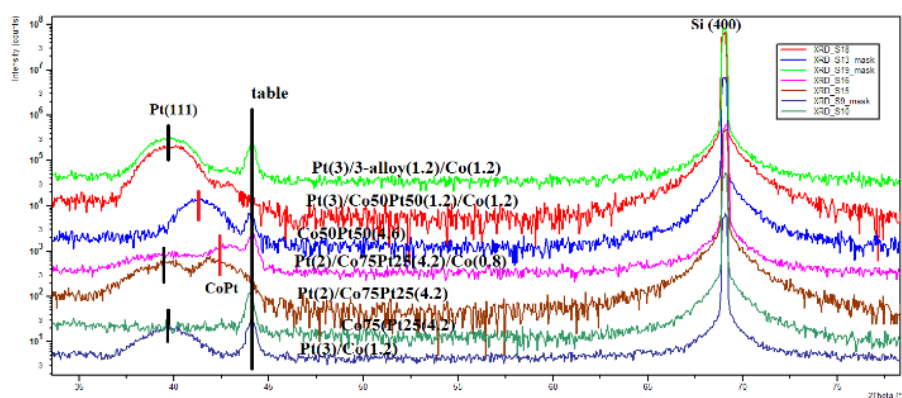


Рисунок 1 - Малоугловая рентгеновская дифракция образцов наноструктур Co/Pt
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.21.1>

Примечание: вертикальной линией указан пик от держателя образцов

Качество слоистой структуры, толщины слоёв и степень несовершенства межслойных границ были оценены на основании данных малоугловой рентгеновской дифракции на дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 в Cu излучении с длиной волны $1,54 \text{ \AA}$ в геометрии параллельного пучка (рисунок 1). Обработку рефлектограмм проводили с помощью коммерческой программы PANalytical X'Pert Reflectivity. На первичном пучке использовали параболическое зеркало на основе сверхрешетки W/Si, обеспечивающее, помимо формирования параллельного пучка, подавление линии $\text{Cu K}\beta$ излучения. На вторичном пучке использовали плоскопараллельный коллиматор с плоским графитовым монохроматором и коллимирующей щелью. Из Таблицы 1 видно, что фактические толщины практически совпадают с номинальными. Среднеквадратичная шероховатость также везде меньше толщины слоя структуры. Из анализа полученных рентгеноструктурных данных был сделан вывод, что для всех образцов сформированы сплошные слои Ta, Pt, и Co. Кроме того, на поверхности верхнего слоя наноструктур (крышки из Ta) образуется достаточно толстый оксидный слой Ta_2O_5 толщиной порядка $2,5 \text{ нм}$ с шероховатостью порядка $0,2\text{--}0,3 \text{ нм}$.

Таблица 1 - Толщины (t) и среднеквадратичная шероховатость (σ) в нанометрах слоёв наноструктур Pt/Co, полученных из обработки рефлектограммDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.21.2>

| № | Структура | Ta | | Pt | | CoPt | | Co | | Ta | | Ta ₂ O ₃ | |
|----|---|----------|---------------|----------|---------------|-------------------|-----------------|----------|---------------|----------|---------------|--------------------------------|---------------|
| | | t , нм | σ , нм | t , нм | σ , нм | t , нм | σ , нм | t , нм | σ , нм | t , нм | σ , нм | t , нм | σ , нм |
| S1 | Si/Ta(2)/ Pt(3)/ Co(1.2)/Ta(2) | 2 | 0,2 | 2,7 | 0,4 | - | - | 1,1 | 0,9 | 1,0 | 0,1 | 2,6 | 0,3 |
| S2 | Si/Ta(2)/ Pt(2.4)/ Co ₅₀ Pt ₅₀ (1.2)/ Co(0.6)/ Ta(2) | 2,0 | 0,5 | 2,8 | 0,3 | 1,1 | 0,35 | 1,0 | 0,2 | 1,0 | 0,3 | 2,6 | 0,3 |
| S3 | Ta(2)/ Pt(3)/ Pt ₇₅ Co ₂₅ (0,4)/ Pt ₅₀ Co ₅₀ (0,4)/ Pt ₂₅ Co ₇₅ (0,4)/ Co(1,2)/ Ta(2) | 2 | 0,4 | 3,1 | 0,4 | 0,4 0,2 0,2 | 0 0,2 0,2 | 1,2 | 0,4 | 2 | 0,4 | 3,1 | 0,3 |

Для определения величины ВДМ используется несколько методов [10]. В данной работе был использован спин-волновой метод, связанный с Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопией рассеянного света (МБРС) [11], [12]. МБРС представляет собой низкоэнергетические процессы рассеяния света на термодинамических флуктуациях плотности или намагниченности среды с изменением частоты падающего фотона. Рассеяние может происходить, как на колебаниях решетки — фононах, так и на магнонах, или их коллективизированных состояниях — спиновых волнах. В результате процессов рассеяния фотон может поглотить (Стоксовое состояние, f_s) или испустить (анти-Стоксовое состояние, f_{as}) квант возбуждения и таким образом изменить энергию (частоту) и направление своего движения. По аналогии с комбинационным (Рамановским) рассеянием в спектрах МБРС эти процессы проявляются в виде максимумов, симметрично сдвинутых в положительную и отрицательную область по частоте относительно основного Релеевского пика. Фиксируя разницу частот пиков $\Delta f = f_s - f_{as}$ (частотный сдвиг) рассеянных фотонов, можно понять, какая частота (энергия) соответствовала поглощённым или излученным квазичастицам: фононам или магнонам. Таким образом, используя МБРС, можно изучать различные термические или параметрически возбужденные состояния в магнитных средах. Положение Стоксовых и анти-Стоксовых пиков в спектрах МБРС многослойных наноструктур не всегда симметрично. Частотный сдвиг Δf пиков определяется вкладами поверхностной анизотропии ферромагнитных слоёв, дипольного взаимодействия и энергией антисимметричного обменного взаимодействия Дзялшинского-Мория (ВДМ) [13]. Согласно [10], [13], зная частотный сдвиг Δf и намагниченность насыщения M_s , константу ВДМ образца можно выразить из дисперсионного соотношения [14]:

$$D = \frac{\Delta f \pi M_s}{2\gamma k} \quad (1)$$

где $\gamma = 1,9 \cdot 10^{11}$ Гц/Тл — гиромагнитное соотношение для кобальта [13], k — волновой вектор.

Исследования МБРС производились с помощью шестипроходного интерферометра Фабри-Перо (Scientific Instruments) TFP-I. В качестве источника света использовался одномодовый твердотельный лазер Excelsior (Spectra Physics) EXLSR-532-200-CDRH с длиной волны 532 нм и шириной линии 8 МГц. Диаметр сфокусированного на поверхности образца пятна составлял примерно 25 мкм. Мощность падающего лазерного излучения 20 мВт недостаточна для термического нагрева и изменения свойств измеряемого образца. Важно отметить, что эффективная глубина проникновения лазерного луча составляет до 100 нм, что превышает суммарную толщину слоев стандартно исследуемых металлических наноструктур. Таким образом, данные, полученные методом МБРС, обусловлены суммарным вкладом всех слоев структуры.

Измерения МБРС в наноструктурах проводились в геометрии Даймона-Эшбаха (рисунок 2) [13, 15] и конфигурация обратного рассеяния света, т.е. постоянное внешнее поле H_0 до 1.2 Т направлено в плоскости пленки взаимно перпендикулярно волновому вектору спиновых волн и плоскости падения света. Измерения проводились в СВЧ-интервале от -40 ГГц до $+40$ ГГц с шагом 125 МГц при комнатной температуре и угле падения лазерного луча $q = 30^\circ$, что соответствует проекции волнового вектора света $k = 11,8 \text{ мкм}^{-1}$.

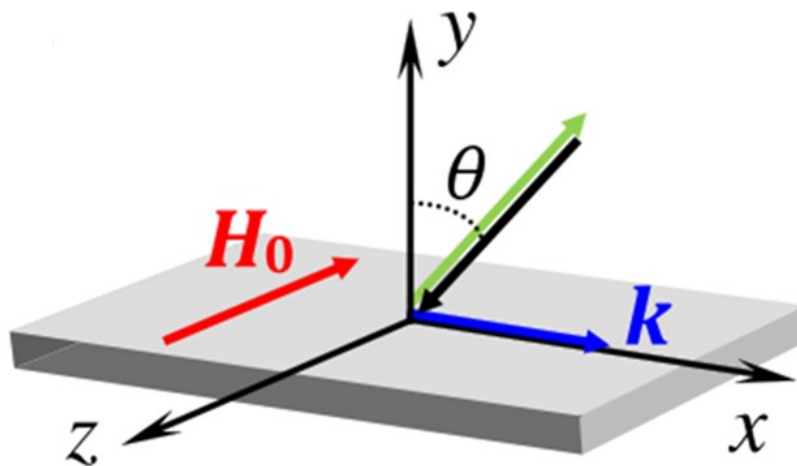


Рисунок 2 - Геометрия эксперимента МБРС (схема Даймона-Эшбаха) для наблюдения магнитостатических спиновых волн

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.21.3>

Основные результаты

В ходе экспериментов МБРС были измерены спектры МСВ для трёх образцов наноструктур со сплавом S1-S3 (см. таблицу 1). Спектры МБРС для наноструктур, измеренные в поле, равном полю насыщения намагниченности плёнок, представлены на рисунке 3. Так как ширина линии резонансных пиков в спектрах МБРС пропорциональна ширине линии ферромагнитного резонанса, то достаточно узкие симметричные линии пиков для наноструктур свидетельствуют о высокой структурной и магнитной однородности образцов наноструктур со сплавом $\text{Pt}_{50}\text{Co}_{50}$,

сравнимой с образцом S1 с монослоём Co. Это позволяет рассматривать полученные образцы как объекты для дальнейших исследований с помощью методов СВЧ спектроскопии.

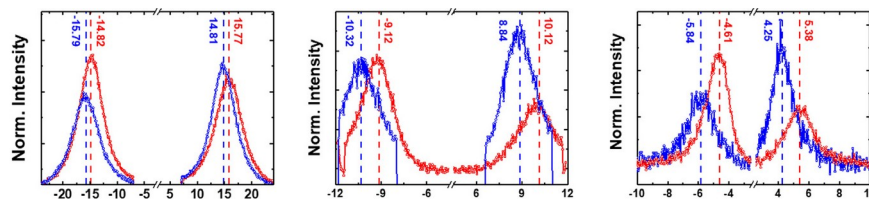


Рисунок 3 - Спектры МБРС для образцов S1 (а), S2 (б) и S3 (в) в поле насыщения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.21.4>

Примечание: красная и синяя кривая отвечают разной полярности внешнего магнитного поля

Полученные экспериментальные кривые МБРС были обработаны с помощью функции Лоренца для определения параметров максимумов. Далее согласно выражению (1), и, используя данные по намагниченности и толщине структур, были рассчитаны значения постоянной ВДМ для всех образцов. Отметим, что при изменении направления внешнего магнитного поля симметрия спектров МБРС меняется зеркально. При этом форма пиков и частотный сдвиг сохраняются, но незначительно варьируется величина сдвига (рисунок 3).

Максимальная величина энергии ВДМ была получена для структуры с тремя аморфными сплавами Pt_xCo_x разного состава общей толщиной 1,2 нм, помещенных между отдельными слоями Pt и Co (рисунок 3). Величина D такой структуры составила $-0,82$ мДж/м². Таким образом, был обнаружен вклад интерфейсного ВДМ в аморфном сплаве. С уменьшением шероховатости и количества интерфейсов растет величина интерфейсного ВДМ в наноструктурах. Аналогичное поведение магнитных свойств и усиление энергии ВДМ также наблюдалось в контрольных образцах наноструктур со сплавом $Pt_{1-x}Co_x$, где оно связывалось в первую очередь с увеличением плотности интерфейсов, ответственных за ВДМ, а также большей атомной плотностью в аморфном сплаве по сравнению со структурой с монослоями [16].

Получено, что величина сдвига, частоты и полуширина резонансных линий коррелируют с изменением параметров слоев наноструктуры: для монослоя Co величина D составила $-0,44$ мДж/м². Замена слоя Co на сплав Pt_xCo_x разного состава, но той же суммарной толщиной приводит к почти трехкратному росту для структуры S3 с $D = -0,56$ мДж/м² (рисунок 4а).

На рисунке 4б приведена температурная зависимость разности частот Df в трёхслойной наноструктуре S3, которая по формуле (1) отражает величину и знак константы ВДМ. Отметим, что наблюдался слабый, практически линейный ход зависимости $D(T)$ от 80 К до 350 К. Такое поведение согласуется с температурным поведением намагниченности, а также может быть связано с дополнительным влиянием температурной зависимости константы двуионной анизотропии, то есть отражает вклады различных типов анизотропии в формирование намагниченности и ВДМ в ультратонких металлических пленках, что требует дополнительных исследований.

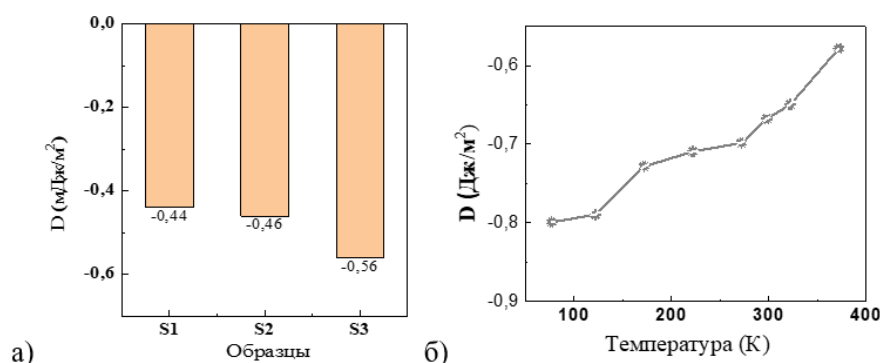


Рисунок 4 - Значения коэффициента интерфейсного ВДМ (D) для образцов S1-S3 (а) и температурная зависимость константы D для образца S3 (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.21.5>

Заключение

Таким образом, впервые был изучен вклад интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мории не только на четко выраженных границах слоев наноструктур Pt/Co, но и в аморфном сплаве. Показано, что, варьируя толщину слоёв и состав слоя наноструктуры, можно моделировать величину ВДМ, а также ширину линии ферромагнитного

резонанса в структуре Pt/Co, что важно для проектирования СВЧ-устройств. Использование многослойных наноструктур позволило усилить вклад взаимодействия Дзялошинского-Мории. Наблюдаемое усиление в образцах наноструктур со сплавом можно связать с увеличением количества границ и плотности интерфейсов, ответственных за взаимодействия Дзялошинского-Мории, а также, возможно, с влиянием эффекта магнитной близости в Pt за счет большей атомной плотности в аморфном сплаве по сравнению со структурой, содержащей монослой ферромагнитного Co. Кроме того, наноструктуры с усиленным интерфейсным взаимодействием перспективны для изучения различных спин-зависящих эффектов и скирмионов.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-72-20160.

Благодарности

Авторы благодарят проф. Y.K. Kim (Korea university, S.Korea) и проф. А.С. Самардака (СахГУ) за предоставленные образцы и помощь в исследованиях.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-72-20160.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to Prof. Y.K. Kim (Korea University, South Korea) and Prof. A.S. Samardaka (Sakha State University) for providing samples and assisting in the research.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zhang X. Skyrmion-electronics: writing, deleting, reading and processing magnetic skyrmions toward spintronic applications. / X. Zhang, Y. Zhou, K.M. Song // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2020. — Vol. 32, № 14. — P. 143001.
2. Fert A. Spintronics, from giant magnetoresistance to magnetic skyrmions and topological insulators. / A. Fert, F.N. Van Dau // Comptes Rendus. Physique. — 2019. — Vol. 20, № 7-8. — P. 817–831.
3. Zhang Y. Ferrimagnets for spintronic devices: From materials to applications. / Y. Zhang, X. Feng, Zh. Zheng // Applied Physics Reviews. — 2023. — Vol. 10, № 1. — DOI: 10.1063/5.0104618
4. Ognev A.V. Spintronics: physical principles, devices, and prospects. / A.V. Ognev, A.S. Samardak // Bulletin of FEB of RAS. — 2006. — № 4. — P. 70–80.
5. Telegin A.V. Growth of thin-film magnetic nanostructures promising for spintronics applications. / A.V. Telegin, Zh. Zh. Namsaraev, V.D. Bessonov // Modern Electronic Materials. — 2024. — Vol. 10, № 1. — P. 51–57.
6. Kang W. A comparative cross-layer study on racetrack memories: Domain wall vs skyrmion. / W. Kang, B. Wu, X. Chen // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems. — 2019. — Vol. 16, № 1. — P. 1–17.
7. Wei W.S. Dzyaloshinsky-Moriya interaction (DMI)-induced magnetic skyrmion materials. / W.S. Wei, Zh.D. He, Zh. Qu et al. // Rare Metals. — 2021. — Vol. 40, № 11. — P. 3076–3090.
8. Samardak A.S. Topologically Nontrivial Spin Textures in Thin Magnetic Films. / A.S. Samardak, A.G. Kolesnikov, A.V. Davydenko // Physics of Metals and Metallography. — 2022. — Vol. 123, № 3. — P. 238–260.
9. Everschor-Sitte K. Perspective: Magnetic skyrmions — Overview of recent progress in an active research field. / K. Everschor-Sitte, J. Masell, R.M. Reeve et al. // Journal of Applied Physics. — 2018. — Vol. 124, № 24. — DOI: 10.1063/1.5048972
10. Kuepferling M. Measuring interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction in ultrathin magnetic films. / M. Kuepferling, A. Casiraghi, G. Soares // Reviews of Modern Physics. — 2023. — Vol. 95, № 1. — P. 015003.
11. Kargar F. Advances in Brillouin–Mandelstam light-scattering spectroscopy. / F. Kargar, A.A. Balandin // Nature Photonics. — 2021. — Vol. 15, № 10. — P. 720–731.
12. Koplak O. Dzyaloshinskii–Moriya interaction determined from spin wave nonreciprocity and magnetic bubble asymmetry in Pt/Co/Ir/Co/Pt synthetic ferrimagnets. / O. Koplak, A. Bezverkhniy, A. Sadovnikov // Journal of Physics: Condensed Matter. — 2021. — Vol. 34, № 8. — P. 085803.
13. Stashkevich A.A. Experimental study of spin-wave dispersion in Py/Pt film structures in the presence of an interface Dzyaloshinskii–Moriya interaction. / A.A. Stashkevich, M. Belmeguenai, Y. Roussigné // Physical Review B. — 2015. — Vol. 91, № 21. — P. 214409.
14. Belmeguenai M. Interfacial Dzyaloshinskii–Moriya interaction in perpendicularly magnetized Pt/Co/AlO_x ultrathin films measured by Brillouin light spectroscopy. / M. Belmeguenai, J.-P. Adam, Y. Roussigné // Physical Review B. — 2015. — Vol. 91, № 18. — P. 180405.
15. Hrabec A. Measuring and tailoring the Dzyaloshinskii–Moriya interaction in perpendicularly magnetized thin films. / A. Hrabec, N.A. Porter, A. Wells // Physical Review B. — 2014. — Vol. 90, № 2. — P. 020402.
16. Park J. Compositional gradient induced enhancement of Dzyaloshinskii–Moriya interaction in Pt/Co/Ta heterostructures modulated by Pt–Co alloy intralayers. / J. Park, T. Kim, G.W. Kim // Acta Materialia. — 2022. — Vol. 241. — P. 118383.