

Концентрационные зависимости параметров ферромагнитного резонанса композитных пленок CoFeB/SiO₂ для различных углов между направлением магнитного поля и плоскостью пленок

© З.Н. Блинов¹, Л.Н. Котов¹, В.А. Устюгов¹, Д.В. Заварин¹, П.Д. Ковалев¹,
Ю.Е. Калинин², А.В. Ситников²

¹ Сыктывкарский государственный университет,
Сыктывкар, Россия

² Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия

E-mail: blinovzosim@gmail.com

Поступила в Редакцию 30 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 8 сентября 2025 г.

Принята к публикации 11 ноября 2025 г.

Получены концентрационные зависимости резонансного поля и ширины линии ферромагнитного резонанса (ФМР) при разных углах φ между направлением магнитного поля и плоскостью пленок для двух серий композитных пленок CoFeB/SiO₂, полученных при разных условиях напыления. Пленки первой серии имели в основном гранулированную структуру, а пленки второй серии имели гранулярно-перколяционную структуру, которая при больших концентрациях металлов x включала в себя полосовую магнито-металлическую структуру. Показано, что резонансное поле для пленок обеих серий, уменьшается с ростом концентрации x . Резонансное поле и ширина линии ФМР увеличиваются с ростом угла φ для пленок обеих серий с разной структурой. Продемонстрировано, что метод ФМР является структурно-чувствительным методом исследования композитных пленок.

Ключевые слова: композитные металл-диэлектрические пленки, концентрация металлов, структура, ферромагнитный резонанс.

DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62437.8044k-25

Композитные металл-диэлектрические пленки вызывают большой интерес у исследователей, поскольку их электрические, магнитные и электромагнитные свойства могут изменяться в очень широких пределах при изменении состава и условий напыления [1–5]. Композитные пленки могут применяться в качестве основы при создании датчиков и биосенсоров, благодаря их высокой чувствительности к электромагнитным полям [6–10]. В настоящей работе проведено изучение сверхвысоко-частотных (СВЧ) электромагнитных свойств и влияния на них структуры пленок с применением метода ферромагнитного резонанса (ФМР). В работе проведены исследования концентрационных зависимостей резонансного поля B_r и ширины линии ФМР ΔB при разных углах φ между направлением постоянного магнитного поля и плоскостью композитных пленок (CoFeB+SiO₂) с разной структурой.

Композитные пленки были получены методом ионной бомбардировки мишеней, состоящих из металлического сплава Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2} и диэлектрика SiO₂, с последующим осаждением выбитых частиц на лавсановый лист с размерами 210 × 290 мм² [1–3]. Были получены пленки двух серий при разных условиях напыления. Пленки I серии с суммарными концентрациями металлов Co, Fe $x = 31–48.7$ at.% были получены в атмосфере аргона с давлением 1.35 μPa и азота с давлением 0.2 μPa. Пленки II серии с концентрациями $x = 44.3–83.2$ at.%

были получены в атмосфере аргона с давлением 1.4 μPa. При напылении пленок обеих серий бомбардировка мишеней осуществлялась более легкими ионами аргона. Добавление азота в камеру при напылении пленок I серии позволяло получать гранулированные композитные пленки в широком интервале концентраций x , даже за областью перколяции для пленок II серии. Структура исследованных композитных пленок разделена на гранулированную (G), гранулярно-перколяционную (GP) с включением магнито-металлических полос (GPMP) [2]. В табл. 1, 2 приведены толщины d и концентрации элементов, суммарная концентрация металлов Co, Fe x в at.% и структура композитных пленок двух серий I и II. Для исследования пленок методом ФМР кусочки пленок с размерами 5 × 3 мм² вырезались из лавсанового листа с напыленным композитным слоем.

Для исследования поверхности пленок с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) из этого же листа нарезались образцы с размерами 2 × 2 мм² [1, 2]. Исследования рельефа и магнитного фазового контраста поверхности пленок проводились при помощи атомно-силового микроскопа NTEGRA Prima (NT-MDT, Россия) с кантилевером и магнитным зондом MFM10. Кремниевый зонд был покрыт магнитным сплавом CoCr толщиной 40 nm и радиусом закругления кончика зонда до 20 nm. Магнитные кантилеверы серии MFM10 имели силовую константу 1–5 N/m, а пространственное

Таблица 1. Составы, толщины и структура композитных пленок I серии

$d, \mu\text{m}$	x	Co	Fe	B	O	Si	N	Структура	№
1.51	31.0	17.3	13.7	1.7	44.2	14.7	8.9	G	1
2.15	32.2	18.0	14.2	2.7	43.3	14.3	8.5	G	2
1.85	38.0	21.4	16.6	4.3	37.8	12.4	8.4	GP	3
1.22	43.9	24.5	19.4	1.7	38.7	9.2	7.4	GP	4
1.55	46.2	26.2	20.0	5.8	33.1	9.7	7.7	GP	5
1.53	48.7	27.4	21.3	3.0	32.6	9.4	8.4	GP	6

Таблица 2. Составы, толщины и структура композитных пленок II серии

d, nm	x	Co	Fe	O	Si	Структура	№
514	44.3	23.6	20.7	38.2	17.5	GP	1
504	45.5	22.2	23.3	37.1	17.4	GP	2
524	49.3	26.3	23.0	34.3	16.4	GP	3
529	56.2	29.0	27.2	28.15	15.57	GPMP	4
534	63.7	34.0	29.7	24.1	12.3	GPMP	5
634	64.0	34.1	29.9	23.7	12.3	GPMP	6
733	67.3	36.3	32.0	21.0	11.2	GPMP	7
796	76.7	41.0	35.7	14.9	8.4	GPMP	8
859	80.7	43.2	37.5	12.2	7.2	GPMP	9
774	83.2	44.9	38.3	10.4	6.4	—	10

разрешение АСМ с такими кантилеверами составляло 30 nm. Частота колебаний внешней силы, действующей на кантилевер с зондом, подбиралась в интервале 47–90 kHz [2]. В микроскопе регистрировалась разность фаз $\Delta\beta$ колебаний кантилевера с зондом, которая изменялась в зависимости от силы взаимодействия магнитного зонда с магнитным полем, возникающим над поверхностью пленок. Притяжение и отталкивание зонда от участка поверхности пленки соответствовало разным знакам $\Delta\beta$. Зависимость $\Delta\beta$ от координат поверхности пленок, полученная при первой проходке магнитного зонда над поверхностью пленки, преобразовывалась в изображение рельефа, отображающем размеры и высоты однородных областей. Изображение магнитного фазового контраста (МФК), характеризующее индукцию магнитного поля над поверхностью пленки, создавалось после второй проходки магнитного зонда над поверхностью пленки и с вычетом значений $\Delta\beta$, отображающем рельеф поверхности пленки. На рис. 1 приведены изображения магнитно-фазового контраста композитных пленок I и II серии. Как видно из рис. 1, а пленка I серии при $x = 31$ at.% имеет гранулярную структуру, а пленка с $x = 48.7$ at.% имеет гранулярно-перколяционную структуру. Пленки II серии с $x = 44.1$ at.% имеют гранулярно-перколяционную структуру (рис. 1, с), а пленка с большой концентрацией металлов $x = 67.3$ at.% имеет магнито-металлические полосы длиной 3 μm и с шириной 0.2–0.3 μm , которые включали в себя гранулированную структуру.

Исследование параметров ФМР композитных пленок проводилось с помощью радиоспектрометра РЭ-1306 на частоте электромагнитного поля 9.36 GHz при разных углах φ между направлением переменного магнитного поля и плоскостью пленки, которые изменялись в интервале от 0 до 50° с шагом 10° [2]. Максимальная погрешность определения угла φ в экспериментах не превышала 10%. При углах, больших 50°, проведение экспериментов для композитных пленок II серии было затруднено, поскольку отсутствовали сигналы от образца, скорее всего, из-за сильного поглощения электромагнитного поля пленками. В процессе измерений спектров ФМР, приемник радиоспектрометра регистрировал сигнал, пропорциональный производной от магнитного поля поглощаемой образцом мощности. На основе записанных на самописце резонансных линий определялись значения положения линии (резонансного поля B_r) и ширины резонансной линии ΔB . Максимальная погрешность определения резонансного поля B_r и ширины линии ФМР ΔB не превышала 5%. При начальном угле $\varphi = 0^\circ$ постоянное и переменное магнитные поля были взаимно перпендикулярны между собой и лежали в плоскости пленки.

Проанализируем поведение концентрационных зависимостей параметров ФМР исследуемых образцов при малых углах $\varphi = 0$ –30°. Резонансное поле B_r для композитных пленок обеих серий, как можно видеть из рис. 2, уменьшается с ростом концентрации металлов x . С учетом скорости уменьшения B_r от концентрации металлов x , весь интервал концентраций можно разбить на две области. Первая область с быстрым уменьшением резонансного поля B_r с ростом концентрации x для пленок I серии составляет интервал $x = 32$ –44 at.%, а для пленок II серии этот интервал $x = 44$ –49 at.%. Для пленок I и II серии с такими x характерна гранулированная структура с малым объемом перколяционных или металлических областей (рис. 1, а, с). Вторая область концентраций x с более слабым изменением функции $B_r(x)$ для пленок I серии имеет интервал 44–49 at.%, а для пленок II серии этот интервал $x = 60$ –80 at.%. Необходимо отметить, что для композитных пленок I серии при таких x характерна гранулярно-перколяционная структура с большим объемом протяженных металлических областей (рис. 1, б), а для пленок II серии с $x > 64$ at.% металлические области представляют собой длинные металлические полосы (рис. 1, д). При больших углах $\varphi = 40^\circ, 50^\circ$ на зависимостях $B_r(x)$ для пленок I серии наблюдается максимум в интервале $x = 37$ –43 at.%. В композитных пленках при таких x увеличиваются размеры перколяционных (металлических) областей с ростом x . При увеличении угла φ от 0° до 50° резонансное поле B_r растет для пленок обеих серий для всего интервала x , но, особенно быстро поле B_r растет при $x = 38$ at.% для пленок I серии, и при $x = 58$ at.% для пленок II серии.

Обсудим поведение концентрационных зависимостей ширины резонансной линии ΔB для исследуемых композитных пленок. Как видно из рис. 3, при $\varphi = 0^\circ$

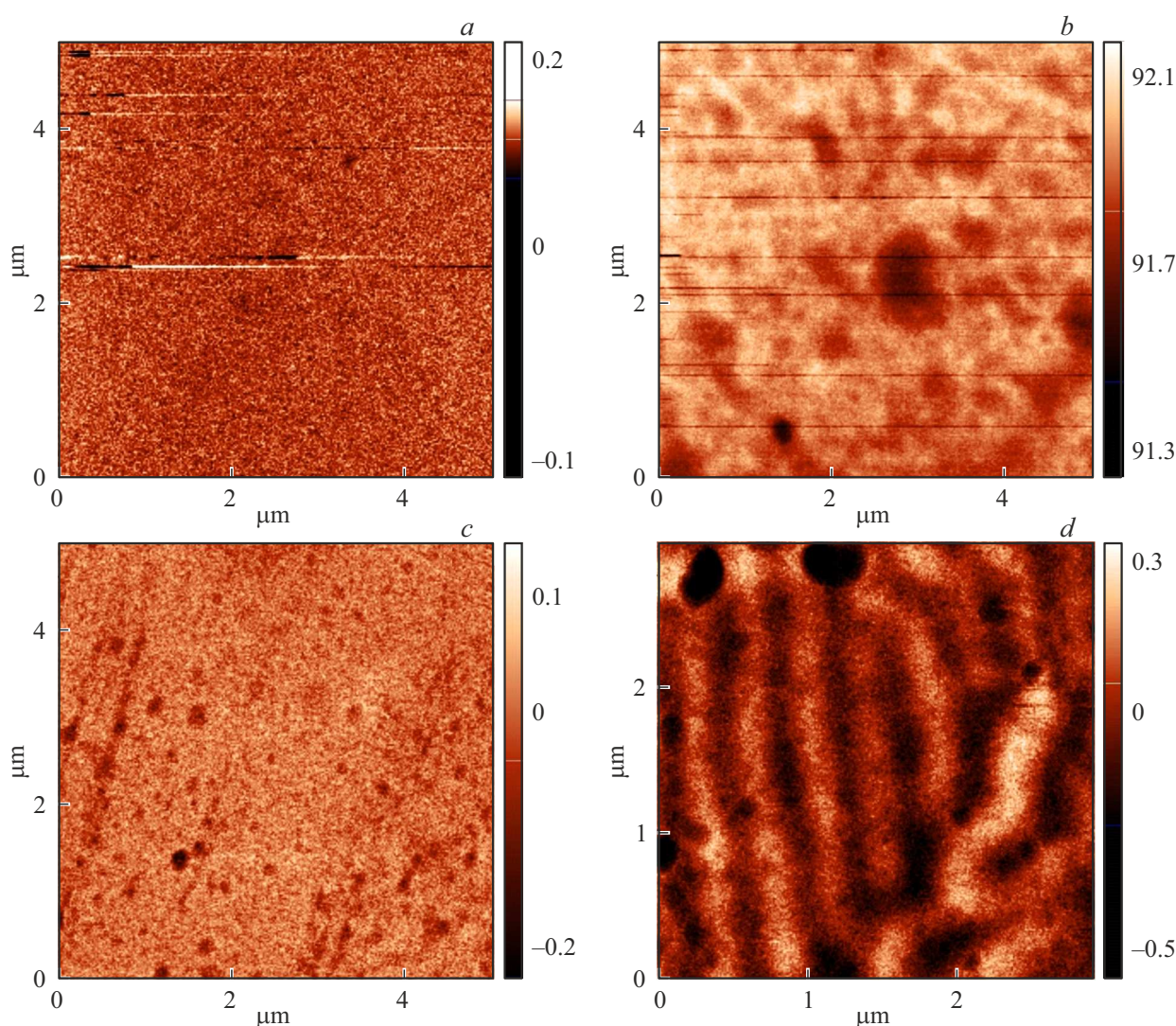


Рис. 1. Изображения магнитно-фазового контраста (МФК) композитных пленок I серии при $x = 31$ at.% (a), 48.7 (b) и II серии при $x = 44.3$ at.% (c), 67.3 (d). Справа от изображения МФК на цветовой шкале приведены значения разности фаз $\Delta\beta$ колебаний кантилевера.

для композитных пленок I серии с гранулированной структурой ширина линии ΔB растет при увеличении x от 31 до 35 at.%. При больших концентрациях металлов ширина линии ΔB с ростом x уменьшается для пленок I серии при $x = 36$ –49 at.% и при $x = 44$ –64 at.% для пленок II серии. Для пленок II серии с металлической полосовой структурой наблюдается участок роста ширины линии ΔB при увеличении x от 65 до 80 at.%. При больших углах $\varphi = 40^\circ, 50^\circ$ на концентрационных зависимостях $\Delta B(x)$ наблюдаются два широких максимума для композитных пленок обеих серий. Кроме того, при $\varphi = 40^\circ, 50^\circ$ на концентрационных зависимостях $\Delta B(x)$ для композитных пленок II серии наблюдается еще один максимум при малых $x = 46$ at.%. Как видно из рис. 2, 3, при увеличении угла φ от 0° до 50° значения резонансного поля B_r и ширины линии ΔB увеличиваются для всех композитных пленок с разными концентрациями металлов x и с разными структурами,

но скорость роста параметров ФМР от угла φ сильно зависит от концентрации x и структуры пленок. Например, для пленок I серии с гранулированной структурой при $x = 38$ at.% резонансное поле B_r увеличивается от 0.2 до 0.36 Т, а ширина линии ΔB увеличивается от 0.12 до 0.34 Т при увеличении угла φ от 0° до 50° . В то же время при увеличении угла φ от 0° до 50° для пленок II серии с полосовой магнито-металлической структурой при $x = 75$ at.% величина B_r увеличивается от 0.11 до 0.2 Т, а ширина линии ΔB увеличивается от 0.025 до 0.1 Т. Такие разные изменения резонансного поля B_r и ширины линии ΔB для пленок с разной структурой при одинаковом изменении угла φ от 0° до 50° свидетельствуют о том, что наряду с размагничивающими полями, обусловленными формой и размерами пленок, большую роль играет размагничивающее поле, обусловленное внутренней структурой пленок [3]. В случае, когда переменное магнитное поле лежит в

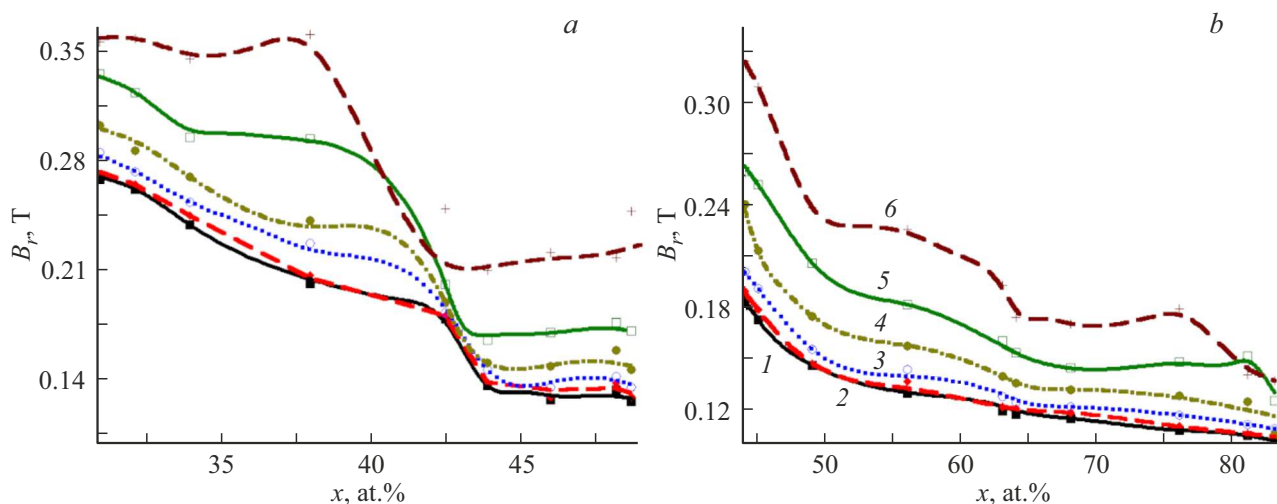


Рис. 2. Концентрационные зависимости резонансного поля B_r для композитных пленок I (a) и II серии (b) для углов $\varphi = 0^\circ$ — 1, 10° — 2, 20° — 3, 30° — 4, 40° — 5, 50° — 6. $T = 300$ K.

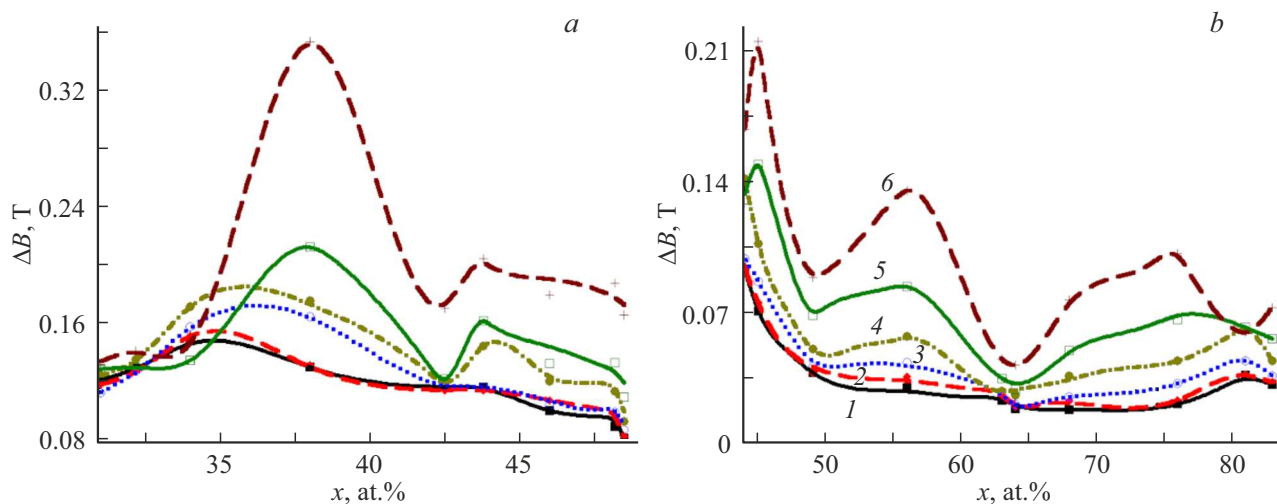


Рис. 3. Концентрационные зависимости ширины линии ΔB для композитных пленок I (a) и II серии (b) для углов $\varphi = 0^\circ$ — 1, 10° — 2, 20° — 3, 30° — 4, 40° — 5, 50° — 6. $T = 300$ K.

плоскости пленки ($\varphi = 0^\circ$), основной вклад в величину резонансного поля B_r и ширину линии ΔB дает размагничивающее поле, обусловленной внутренней структурой пленок. При больших углах $\varphi = 30^\circ - 50^\circ$ начинает преобладать вклад в величины B_r и ΔB размагничивающего поля, обусловленного формой и размерами композитных пленок.

Заключение

В ходе проведенных исследований были выявлены закономерности поведения резонансного поля B_r и ширины линии ферромагнитного резонанса (ФМР) ΔB в зависимости от суммарной концентрации металлов Co, Fe и структуры пленок, а также от угла между внешним постоянным магнитным полем и плоскостью

пленки. Полученные в работе результаты исследований показывают, что на параметры ФМР композитных металл-диэлектрических пленок значительное влияние оказывает структура и размеры перколяционных (металлических) областей. Состав пленок также влияет на параметры ФМР, но опосредованно, в основном через структуру пленок, поскольку состав и условия напыления задают структуру композитных пленок, в том числе и область концентраций x , при которых возникает явление перколяции при напылении пленок. Как показывает анализ результатов исследований параметров ФМР и структуры пленок, метод ФМР является структурно-чувствительным методом исследования электромагнитных свойств композитных пленок. Дальнейшие более детальные экспериментальные исследования параметров ФМР магнитных композитных пленок с помощью радиоспектрометра и нахождения функциональной связи меж-

ду параметрами ФМР и структурой пленок (размеров и формой гранул и перколяционных областей) позволят отработать методику получения изображений микро- и наноструктуры пленок.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-72-20063).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Устюгов, Л.Н. Котов, П.Д. Ковалёв, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников. ФТТ **66**, 12, 2148 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.12.59582.6516PA
- [2] L.N. Kotov, Z.N. Blinov, P.D. Kovalev, D.V. Zavarin, Yu.E. Kalinin, A.V. Sitnikov. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **88**, 1, 80 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1062873824708833>
- [3] Leonid Kotov, Vladimir Vlasov, Pavel Kovalev, Alexander Utkin, Yuri Kalinin, Alexander Sitnikov, Vladimir Ustygov. 2023 IEEE International Conference on Next Generation Electronics (NEleX 2023). | 979-8-3503-1908-8/23/\$31.00 ©2023 IEEE|. DOI: 10.1109/NELEX59773.2023.10420863
- [4] P.G. Baranov, A.M. Kalashnikova, V.I. Kozub, V.L. Korenev, Yu.G. Kusrayev, R.V. Pisarev, V.F. Sapega, I.A. Akimov, M. Bayer, A.V. Scherbakov, D.R. Yakovlev. UFN, **189**, 8, 849 (2019). DOI: 10.3367/ufne.2018.11.038486
- [5] B. Raneesh, P.M. Visakh. *Metal oxide nanocomposites. Synthesis and applications* (Wiley-Scrivener, NY, 2021), p. 303. DOI: 10.1002/9781119364726
- [6] B.A. Belyaev, V.V. Tyurnev. J. Exp. Theor. Phys. **127**, 4, 608 (2018). DOI: 10.1134/S1063776118100114
- [7] G.-D. Lu, H.-W. Zhang, X.-L. Tang. Chinese Physics Letters, **27**, 9, 097501 (2010). DOI: 10.1088/0256-307X/27/9/097501
- [8] G. Lu, X. Huang, H.-G. Piao, L. Pan. Journal of Alloys and Compounds. **668**, 107 (2016). DOI: 10.1088/0953-8984/28/47/476006
- [9] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. УФН **188**, 12, 1288 (2018). DOI: 10.3367/UFNe.2018.01.038279
- [10] I.G. Vazhenina, R.S. Iskhakov, V.Y. Yakovchuk. Phys. Metals Metallogr. **123**, 1084–1090, (2022). DOI: 10.1134/S0031918X2260124X

Редактор Т.Н. Василевская