08

Концентрационные зависимости параметров ферромагнитного резонанса композитных пленок CoFeB/SiO_2 для различных углов между направлением магнитного поля и плоскостью пленок

© З.Н. Блинов[1], Л.Н. Котов[1], В.А. Устюгов[1], Д.В. Заварин[1], П.Д. Ковалев[1], Ю.Е. Калинин[2], А.В. Ситников[2]

[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/SiO_2, 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 сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных свойств и влияния на них структуры пленок с применением метода ферромагнитного резонанса (ФМР). В работе проведены исследования концентрационных зависимостей резонансного поля Br и ширины линии ФМР ΔB при разных углах φ между направлением постоянного магнитного поля и плоскостью композитных пленок (CoFeB+SiO_2) 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 SiO_2, с последующим осаждением выбитых частиц на лавсановый лист с размерами $210\times290\,mm^2$ [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 $1.35\,\mu$Pa и азота с давлением $0.2\,\mu$Pa. Пленки II серии с концентрациями $x = 44.3-83.2$ at.% были получены в атмосфере аргона с давлением $1.4\,\mu$Pa. 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 $5\times3\,mm^2$ 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 $2\times2\,mm^2$ [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, μm	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, *a* 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, *c*), 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 $\varphi = 0°$ 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, *a, c*). 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, *b*), а для пленок *II* серии с $x > 64$ at.% металлические области представляют собой длинные металлические полосы (рис. 1, *d*). При больших углах $\varphi = 40°$, 50° 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 $\varphi = 0°$

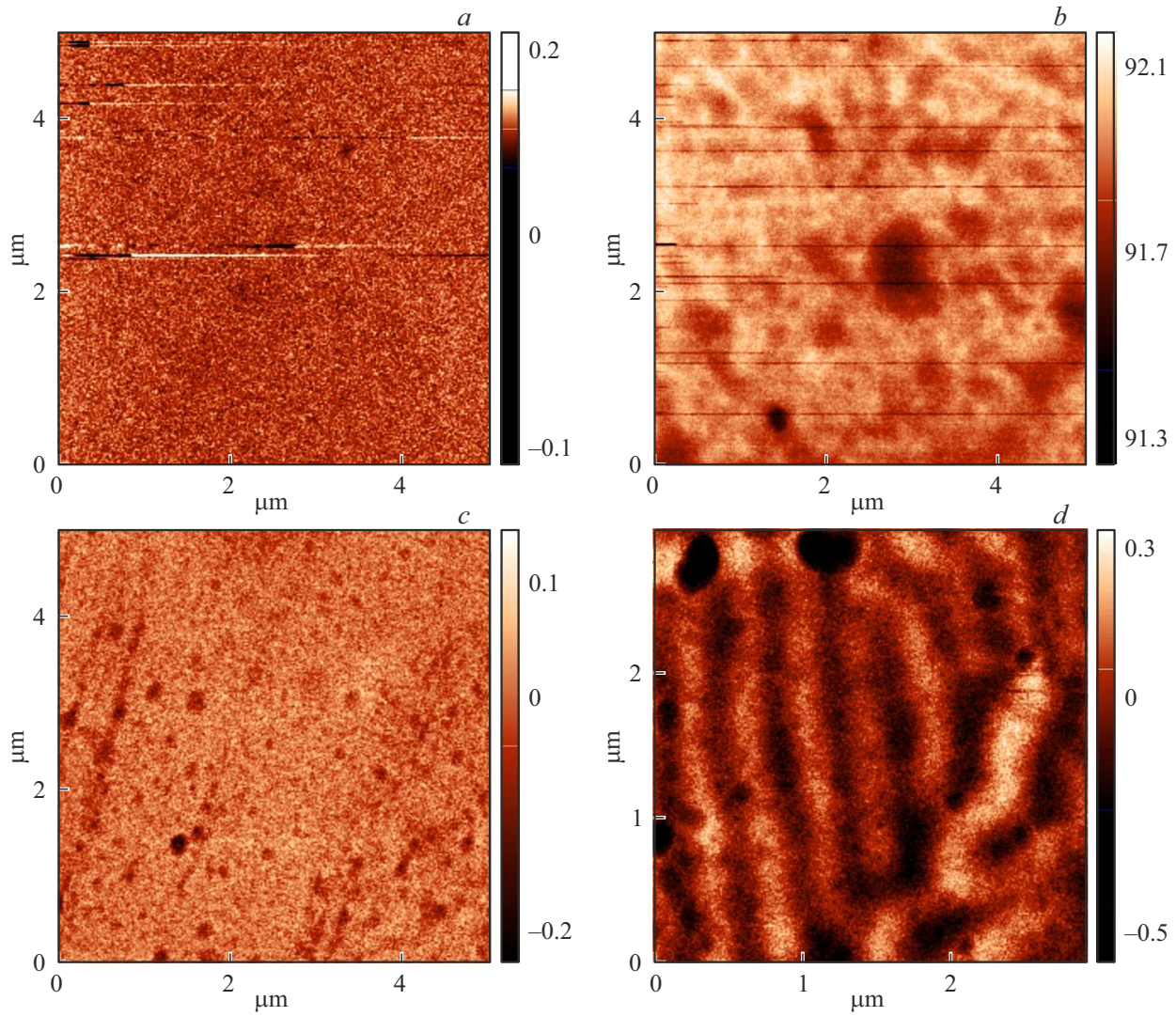

Рис. 1. Изображения магнитно-фазового контраста (МФК) композитных пленок *I* серии при $x = 31$ at.% (*a*), 48.7 (*b*) и *II* серии при $x = 44.3$ at.% (*c*), 67.3 (*d*). Справа от изображения МФК на цветовой шкале приведены значения разности фаз $\Delta\beta$ колебаний кантилевера.

для композитных пленок *I* серии с гранулированной структурой ширина линии ΔB растет при увеличении x от 31 до 35 at.%. При большой 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 $\varphi = 40°, 50°$ на концентрационных зависимостях $\Delta B(x)$ наблюдаются два широких максимума для композитных пленок обеих серий. Кроме того, при $\varphi = 40°, 50°$ 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 T, а ширина линии ΔB увеличивается от 0.12 до 0.34 T 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 T, а ширина линии ΔB увеличивается от 0.025 до 0.1 T. 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 размагничивающие поле, обусловленное внутренней структурой пленок [3]. В случае, когда переменное магнитное поле лежит в

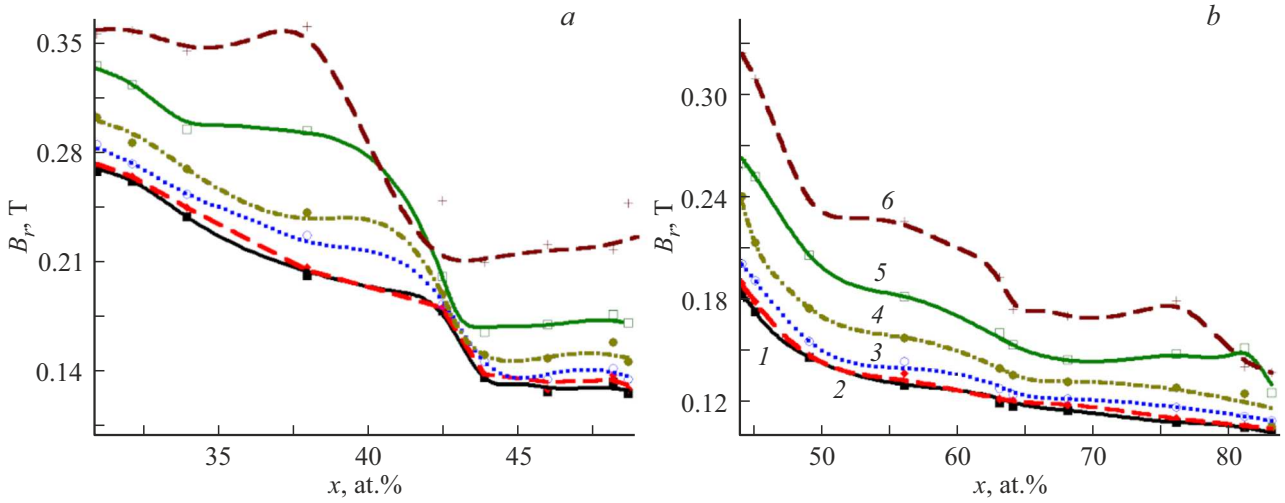

Рис. 2. Концентрационные зависимости резонансного поля B_r для композитных пленок *I* (*a*) и *II* серии (*b*) для углов $\varphi = 0^\circ$ — *1*, 10° — *2*, 20° — *3*, 30° — *4*, 40° — *5*, 50° — *6*. $T = 300$ K.

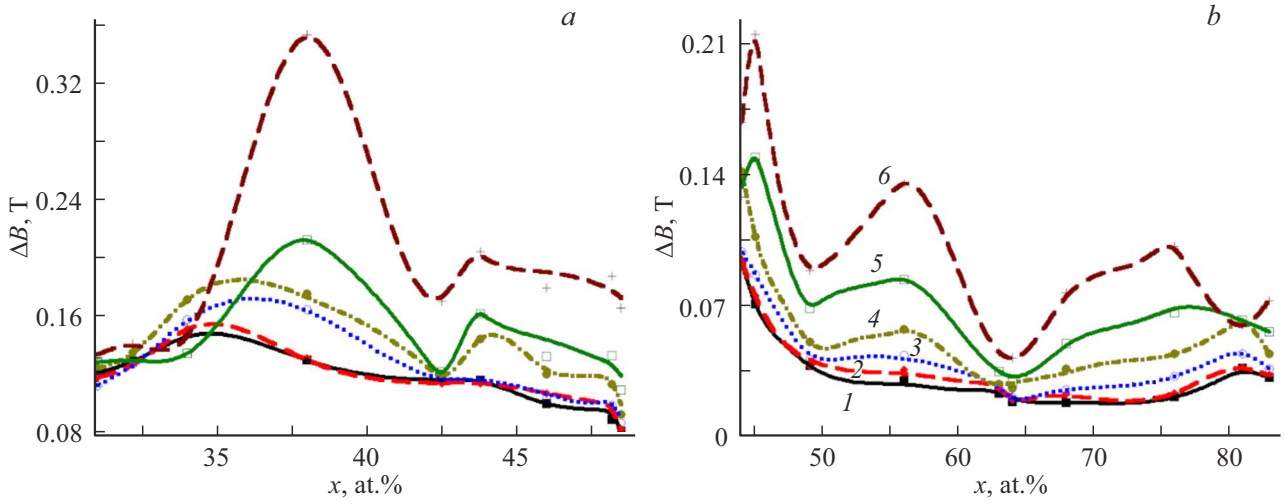

Рис. 3. Концентрационные зависимости ширины линии ΔB для композитных пленок *I* (*a*) и *II* серии (*b*) для углов $\varphi = 0^\circ$ — 1, 10° — *2*, 20° — *3*, 30° — *4*, 40° — *5*, 50° — *6*. $T = 300$ K.

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 влияния 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