

01,05,13

## Особенности плоскостной магнитной анизотропии и доменной структуры пленок FeNi, осажденных в присутствии магнитного поля различной конфигурации

© А.В. Свалов, В.Е. Иванов, С.В. Андреев, В.Н. Лепаловский, А.А. Фещенко,  
Е.В. Кудюков, И.А. Макаровичкин, Г.В. Курляндская

Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: andrey.svalov@urfu.ru

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Исследованы пленки FeNi в виде элементов диаметром 3 mm, полученных магнетронным напылением в присутствии постоянного магнитного поля различной конфигурации. Наличие поля, создаваемого постоянным магнитом диаметром 1.2 mm, намагниченность которого ориентирована перпендикулярно плоскости подложки, приводит к формированию в пленке вихреподобной магнитной структуры, характеризуемой размытыми доменными стенками.

**Ключевые слова:** тонкие магнитные пленки, наведенная магнитная анизотропия, магнитная доменная структура, магнетронное распыление.

DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55640.17H

### 1. Введение

Тонкие магнитные пленки составляют основной рабочий материал устройств спинтроники [1]. Одним из основных функциональных параметров таких материалов является магнитная анизотропия. Для ряда приложений требуется ярко выраженная одноосная магнитная анизотропия в плоскости или перпендикулярно плоскости пленки, для других, наоборот, желательно отсутствие магнитной анизотропии для повышения магнитной мягкости пленочных элементов [1,2]. Основными способами формирования наведенной магнитной анизотропии в плоскости пленок являются наклонное напыление и осаждение пленок в присутствии магнитного поля, ориентированного в плоскости подложки [2–4]. Напыление пленки при наличии магнитного поля, ориентированного перпендикулярно плоскости подложки, может способствовать увеличению перпендикулярной магнитной анизотропии, возникновение которой обусловлено, как правило, микроструктурой пленки, а именно, столбчатой структурой [5–7]. Уменьшение магнитной анизотропии в плоскости образцов чаще всего достигается воздействием на осаждаемую пленку вращающимся в плоскости подложки магнитным полем или путем последующих дополнительных термомагнитных обработок [8,9]. Кроме того, данная задача решается за счет подбора геометрической формы объектов [10]. Как правило, размер таких элементов находится в интервале от долей до десятков микрон. Тем не менее, существует интерес и к объектам миллиметровой шкалы [11]. Данные о влиянии вертикального магнитного поля в процессе напыления на формирование магнитной анизотропии в плоскости пленки в литературе отражены весьма скупо [12]. В на-

стоящей работе представлены результаты исследования особенностей плоскостной магнитной анизотропии и доменной структуры пленочных элементов FeNi, осажденных в присутствии магнитного поля различной конфигурации, в том числе создаваемого постоянным магнитом, намагниченность которого была ориентирована перпендикулярно плоскости подложки.

### 2. Методика исследований

Пленки Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> толщиной 40 nm были осаждены на стеклянные подложки методом магнетронного распыления мишени в атмосфере аргона. Напыление велось

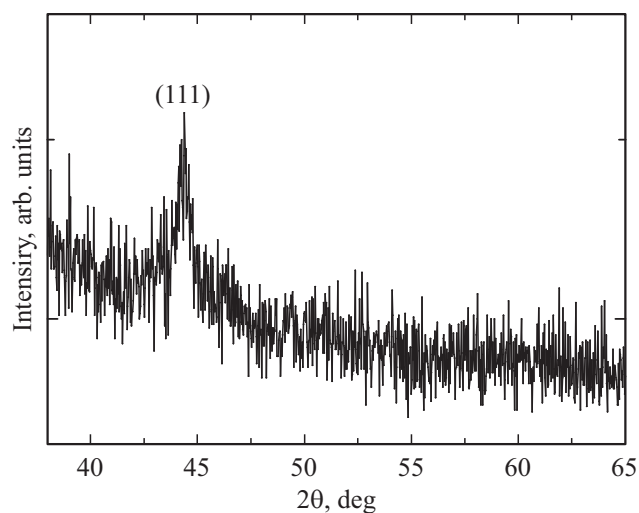
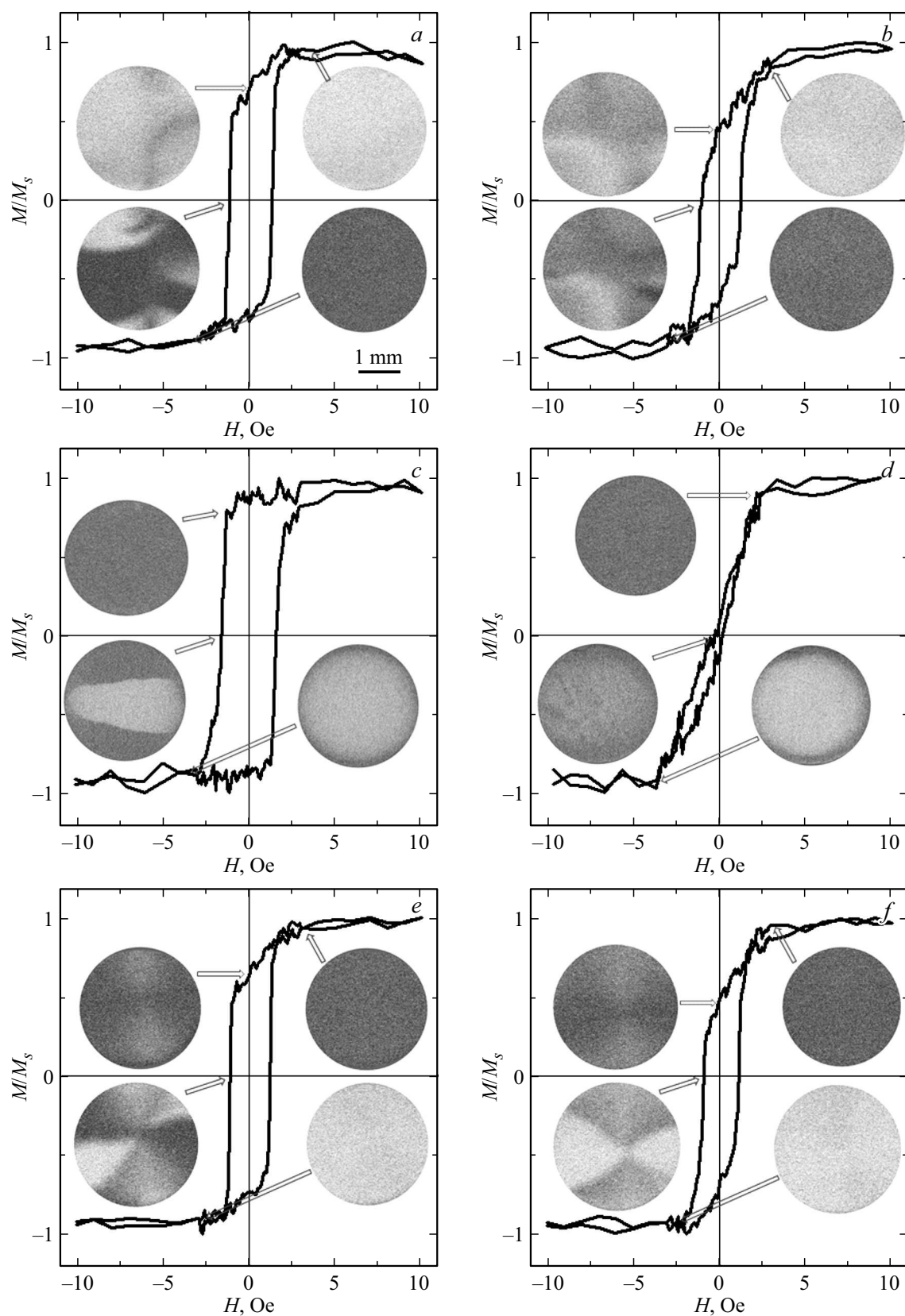
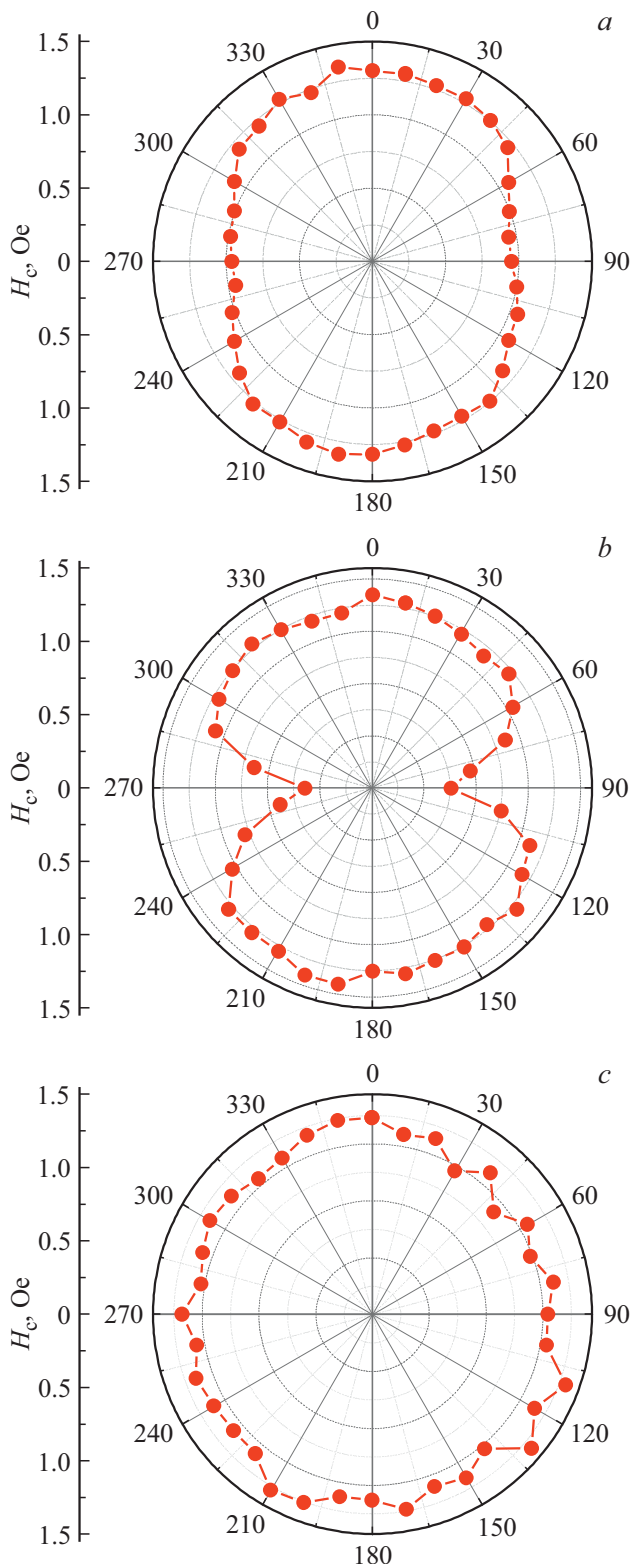


Рис. 1. Дифрактограмма образца типа F1.



**Рис. 2.** Магнитооптические петли гистерезиса и соответствующие изображения магнитной доменной структуры, полученные в двух взаимно перпендикулярных направлениях для образцов F1 (*a, b*), F2 (*c, d*) и F3 (*e, f*). Для изображений доменной структуры: ось приложения измерительного магнитного поля ориентирована горизонтально.



**Рис. 3.** Угловая зависимость коэрцитивной силы для образцов F1 (a), F2 (b) и F3 (c).

через металлическую маску, что создавало возможность формировать элементы в виде круга диаметром 3 nm. Осаждение пленок происходило либо в отсутствие

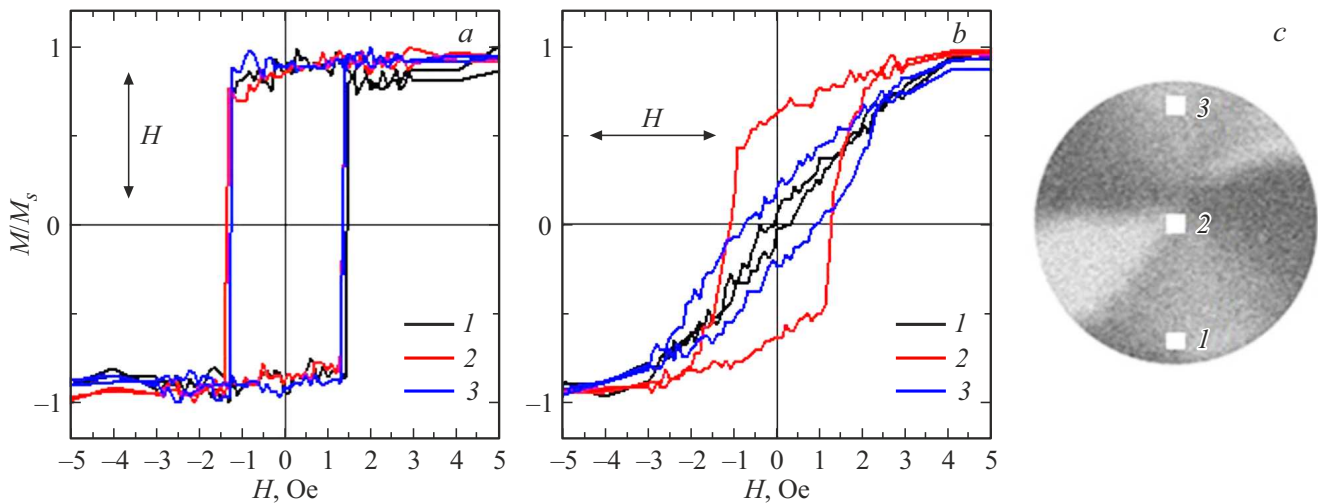
внешнего магнитного поля (образцы типа F1), либо в присутствии постоянного магнитного поля напряженностью 200 Oe, ориентированного в плоскости подложки (F2). Кроме того, были получены элементы, осажденные в присутствии магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом диаметром 1.2 mm, намагниченность которого была ориентирована перпендикулярно плоскости подложки (F3). Напряженность перпендикулярной компоненты поля на поверхности магнита составляла 400 Oe. Исследования структуры пленочных образцов проводились с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance и атомного силового микроскопа Ntegra Prima. Магнитные свойства образцов исследовались с помощью вибрационного магнитометра Lake Shore Cryotronics и магнитооптического Керр-микроскопа Evico.

### 3. Полученные результаты и обсуждение

Различные условия приготовления пленок не оказали заметного влияния на их структурные особенности. Кристаллическая ГЦК-структура всех образцов характеризовалась текстурой (111). На рис. 1 в качестве примера показана дифрактограмма образца типа F1. Средний размер кристаллитов, определенный с помощью формулы Шеррера, составлял 10 nm. Среднеквадратичная амплитуда шероховатости поверхности  $R_{rms}$  для всех пленок FeNi не превышала 0.3 nm.

Для всех трех типов образцов были измерены магнитооптические (МО) петли гистерезиса при различной ориентации магнитного поля в плоскости образцов. Оказалось, что элементы характеризуются различной величиной степени магнитной анизотропности в плоскости пленки. Для образцов типа F2 наблюдалась ярко выраженная наведенная одноосная магнитная анизотропия, ось легкого намагничивания (ОЛН) которой совпадала с осью магнитного поля, приложенного во время осаждения пленки. МО-петля гистерезиса, измеренная вдоль ОЛН, имела характерную прямоугольную форму, а процесс перемагничивания образца осуществлялся путем движения доменных границ (рис. 2, c). МО-петля, измеренная под прямым углом к ОЛН, характеризовалась заметно меньшим гистерезисом, плавное изменение МО-контраста свидетельствовало о перемагничивании пленки за счет вращения вектора спонтанной намагниченности (рис. 2, d). Наличие одноосной магнитной анизотропии подтверждается и угловой зависимостью коэрцитивной силы  $H_c$ , где  $\theta$  — угол между направлением поля измерения и ОЛН (рис. 3, b). Величина поля магнитной анизотропии  $H_a$  составляла  $3.5 \pm 0.5$  Oe. Природа и возможные механизмы возникновения данной так называемой  $M$ -наведенной анизотропии в поликристаллических пленках 3d-металлов и их сплавов хорошо изучены [13].

Угловые МО-измерения в плоскости позволили выявить одноосную магнитную анизотропию и для об-



**Рис. 4.** Локальные МО-петли гистерезиса для образца типа F3. Номер петли соответствует номеру точки на образце (с). Стрелки на (а) и (b) показывают ориентацию оси, вдоль которой прикладывалось измерительное поле, относительно образца (с).

разцов типа F2, напыленных в отсутствие внешнего магнитного поля. Критерием для определения ориентации ОЛН служила наибольшая величина остаточной намагниченности, так как величины  $H_c$  для ОЛН и перпендикулярного ей направления отличались всего на 0.1 Oe (рис. 2, а, b). Тем не менее, угловая зависимость  $H_c$  подтверждает наличие слабой одноосной анизотропии (рис. 3, а; величины угла  $0^\circ$  и  $180^\circ$  соответствуют направлению поля измерения вдоль ОЛН). Вероятной причиной возникновения данной магнитной анизотропии является наличие в области подложкодержателя лабораторного магнитного поля, величина которого оказалась достаточной, чтобы ориентировать намагниченность растущей пленки.

Для образцов типа F3 различия в форме петель гистерезиса, измеренных в условных „легком“ и „трудном“ направлениях намагничивания еще менее выражены (рис. 2, е, f). Угловая зависимость коэрцитивной силы имеет практически изотропный вид (характер) (рис. 3, с). Конфигурация доменов и слабо выраженные доменные стенки в полях, близких к коэрцитивной силе, (рис. 2, е, f), позволяют говорить о вихреподобном магнитном состоянии [9,14,15], возникающем в данном типе образцов.

Очевидно, что поля магнита величиной 400 Oe недостаточно, чтобы выстроить намагниченность растущей пленки FeNi перпендикулярно ее поверхности. Однако горизонтальной составляющей поля магнита вполне достаточно, чтобы ориентировать намагниченность в плоскости пленки. Геометрия напыления задает радиальное распределение горизонтальной составляющей поля магнита. Полагая  $M$ -наведенный характер сформировавшейся в пленке магнитной анизотропии, можно ожидать радиального распределения осей легкого намагничивания в плоскости образца. Для проверки данного предположения были измерены локальные МО-петли гистерезиса

в трех различных точках образца. МО-сигнал фиксировался с участка поверхности размером  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ , в каждой точке измерения проводились при ориентации поля в плоскости пленки вдоль двух взаимно перпендикулярных осей (рис. 4). Видно, что при ориентации поля вдоль радиуса образца, во всех точках наблюдались прямоугольные петли гистерезиса. При ориентации поля в плоскости пленки перпендикулярно радиусу образца в точках 1 и 3 были зафиксированы петли, характерные для перемангничивания образца вдоль „трудного“ направления намагничивания. Форма петли, измеренной в точке 2, ожидаемо приближается к прямоугольной. Отсутствие полной прямоугольности петли связано с допущенным при измерении отклонением точки 2 от центра образца. Таким образом, совокупность полученных петель гистерезиса свидетельствует, что в образцах типа F3 локальные ОЛН ориентированы вдоль радиуса образца.

#### 4. Заключение

В пленочных элементах  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  диаметром 3 mm, полученных магнетронным напылением в присутствии постоянного магнитного поля различной конфигурации, возникает наведенная магнитная анизотропия в плоскости образцов. Ориентация оси легкого намагничивания определяется ориентацией намагниченности пленки в процессе ее осаждения ( $M$ -наведенная анизотропия). Наличие поля, создаваемого постоянным магнитом диаметром 1.2 mm, намагниченность которого ориентирована перпендикулярно плоскости подложки, приводит к формированию в плоскости пленки радиального распределения осей легкого намагничивания, что способствует формированию в элементе вихреподобной магнитной структуры.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00980, <https://rscf.ru/project/22-29-00980/>.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani, I.-L. Prejbeanu, B. Diény, Ph. Pirro, B. Hillebrands. *J. Magn. Magn. Mater.* **509**, 166711 (2020).
- [2] М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Н.А. Кулеш, Е.И. Патраков, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов. *ФММ* **117**, 12, 1227 (2016).
- [3] В.А. Belyaev, A.V. Izotov, P.N. Solovov. *Physica B* **481**, 86 (2016).
- [4] A.V. Svalov, I.A. Makarochkin, V.N. Lepalovskij, A.A. Pasyukova, A.A. Feshchenko, A.N. Gorkovenko, G.V. Kurlyandskaya. *SPIN*, 2240001 (2022).
- [5] Г.С. Кандаурова, В.Е. Иванов. *Письма в ЖЭТФ* **66**, 11, 688 (1997).
- [6] A.V. Svalov, E. Fernandez, A. Garcia-Arribas, J. Alonso, M.L. Fdez-Gubieda, G.V. Kurlyandskaya. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 162410 (2012).
- [7] А.С. Джумалиев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров. *ФТТ* **62**, 12, 2174 (2020).
- [8] E. Fuchs, W. Zinn. *J. Appl. Phys.* **34**, 2557 (1963).
- [9] R. Schäfer. *J. Magn. Magn. Mater.* **215-216**, 652 (2000).
- [10] H.A.M. van den Berg. *J. Appl. Phys.* **60**, 1104 (1986).
- [11] F. Magnus, R. Moubah, U.B. Arnalds, V. Kapaklis, A. Brunner, R. Schäfer, G. Andersson, B. Hjörvarsson. *Phys. Rev. B* **89**, 224420 (2014).
- [12] E.N. Zubarev, V.N. Samofalov, A.Yu. Devizenko, I.Yu. Devizenko, V.V. Kondratenko, D.V. Sevryukov, V.A. Sevryukova, V.V. Mamon. *J. Magn. Magn. Mater.* **539**, 168301 (2021).
- [13] А.Г. Лесник. *Наведенная магнитная анизотропия в поликристаллических пленках*. Наук. думка, Киев (1976). 163 с.
- [14] S.D. Bader. *Rev. Mod. Phys.* **78**, 1, (2006).
- [15] M.E. Steblyi, A.V. Ognev, A.S. Samardak, A.G. Kolesnikov, L.A. Chebotkevich, X. Han. *J. Appl. Phys.* **117**, 17A317 (2015).

Редактор К.В. Емцев