

Научная статья

УДК 621.78

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-127-138

ВОССТАНОВЛЕНИЕ АМОРФНОЙ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ В МИКРОПРОВОДАХ RE–TM–B МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Е.В. Дворецкая^{1,2}, М.В. Потапов¹, В.П. Пискорский¹, Р.Б. Моргунов^{1,2}

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия; office@icp.ac.ru

Аннотация. Вакуумный отжиг исходного аморфного микропровода состава (PrDy)–(CoFe)–B способствует формированию поликристаллической структуры, содержащей магнито жесткую тетрагональную фазу (PrDy)₂–(CoFe)₁₄–B₁ и магнитомягкую кубическую фазу Fe, что приводит к значительному расширению петли магнитного гистерезиса и исчезновению доменов. Локальное лазерное облучение вызывает локальное поверхностное восстановление аморфной структуры в заданном профиле на пути лазерного луча. В зоне лазерного облучения наблюдается восстановление доменной структуры.

Ключевые слова: ферромагнитные микропровода, лазерное профилирование, доменная структура, магнито жесткая фаза, микромагниты, редкоземельные сплавы

Для цитирования: Дворецкая Е.В., Потапов М.В., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Восстановление аморфной атомной структуры и магнитных доменов в микропроводах RE–TM–B методами термической и лазерной обработки // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 127–138. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-127-138.

Scientific article

RESTORATION OF AMORPHOUS ATOMIC STRUCTURE AND MAGNETIC DOMAINS IN RE–TM–B MICROWIRES BY THERMAL AND LASER PROCESSING

E.V. Dvoretzkaya^{1,2}, M.V. Potapov¹, V.P. Piskorsky¹, R.B. Morgunov^{1,2}

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia; office@icp.ac.ru

Abstract. Vacuum annealing of the initially amorphous microwire with the (PrDy)–(CoFe)–B composition leads to the formation of a polycrystalline structure containing a magnetically hard tetragonal phase (PrDy)₂–(CoFe)₁₄–B₁ and a magnetically soft cubic Fe phase. This results in a significant broadening of the magnetic hysteresis loop and the disappearance of domains. Local laser irradiation induces local surface recovery of the amorphous structure along a predetermined path of the laser beam. In the irradiated zone, the domain structure is restored.

Keywords: ferromagnetic microwires, laser profiling, domain structure, hard magnetic phase, micromagnets, rare earth alloys

For citation: Dvoretzkaya E.V., Potapov M.V., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. Restoration of amorphous atomic structure and magnetic domains in RE–TM–B microwires by thermal and laser processing. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 127–138. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-127-138.

Введение

Линейные периодические магнитные структуры имеют важное значение в микроэлектромеханических системах [1–7], используемых в электронных чипах. Одним из примеров является «актуатор», который обеспечивает поступательное перемещение ферромагнитного сердечника в периодическом магнитном поле [8–10]. Исследования показали, что применение микрогребенчатого сердечника позволяет снизить потребление тока на 60 % и улучшить линейность зависимости «сила–смещение» для малых перемещений до 50 мкм [11]. Особое значение микроэлектромеханические системы имеют в биомедицинских приложениях, где они используются для сепарации магнитных наночастиц в микрожидкостных чипах [12, 13]. Микроконцентраторы с высокोगradientным магнитным полем встраиваются в микрожидкостные каналы, позволяя эффективно отделять магнитные частицы от потока жидкости и переносить их в отдельные резервуары [11, 13]. Это открывает возможности для создания эффективных микромагнитных анализаторов. Для реализации таких микроустройств требуются специальные микроструктуры с периодическим распределением намагниченности, которую можно получить двумя основными способами:

- изготовлением микропроводов с модулированным диаметром;
- исследованием естественного распределения намагниченности в микропроводах с периодическими магнитными доменами [14–17].

Перспективными материалами для создания магнитных микропроводов являются сплавы системы RE–TM–B, где RE – редкоземельный металл, TM – переходный металл, B – бор. В микромасштабе эти сплавы могут демонстрировать уникальные магнитные состояния, отличные от состояний объемных материалов [14, 18, 19]. В микропроводах (PrDy)–(FeCo)–B наблюдается доменная структура с радиальной намагниченностью, периодически изменяющаяся вдоль длины провода. Однако механизмы формирования такой структуры до конца не изучены и зависят от фазового состава и распределения химических элементов в материале. Периодическое распределение намагниченности можно контролировать с помощью термической или лазерной обработки материала, а также внешнего магнитного поля. На рис. 1 представлена схема линейного микроэлектродвигателя на основе микропроводов (PrDy)–(FeCo)–B после термической и лазерной обработки.

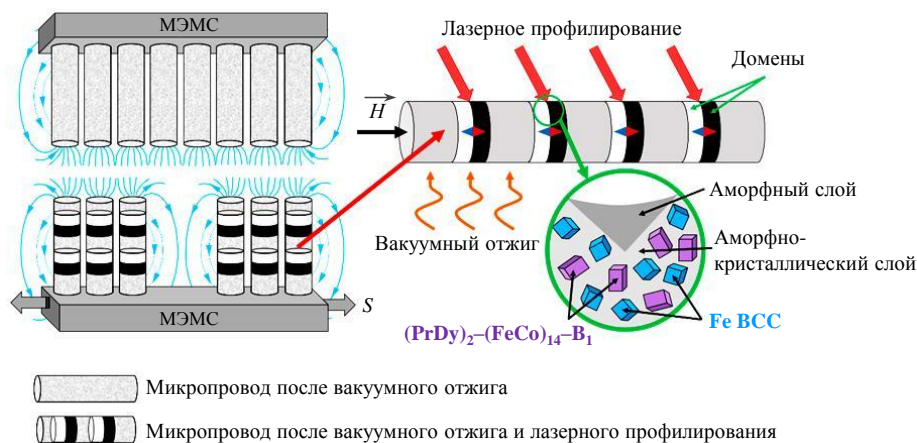


Рис. 1. Схема линейного микроэлектродвигателя на основе микропроводов (PrDy)–(FeCo)–B с контролируемым распределением намагниченности (МЭМС – микроэлектромеханическая система; BCC – Body Centered Cubic – объемно-центрированная кубическая решетка)

Цель работы заключалась в такой настройке фазового состава микропроводов (PrDy)–(FeCo)–B методами термического и лазерного отжига, которая обеспечивала бы

их периодическую намагниченность, а также в выявлении влияния химического и фазового состава на магнитные свойства таких микропроводов.

Материалы и методы Получение аморфных, поликристаллических и аморфно-кристаллических микропроводов

Микропровода получены методом экстракции висящей капли расплава [14]. Кристаллический слиток (PrDy)–(CoFe)–В облучали электронным пучком. Образовавшиеся капли расплава попадали на поверхность быстро вращающегося водоохлаждаемого латунного цилиндра (скорость охлаждения $\sim(10^5\text{--}10^6)$ К/с). Полученные микропровода (рис. 2, а) длиной ~ 50 мм со средним диаметром ~ 70 мкм имели аморфную структуру.

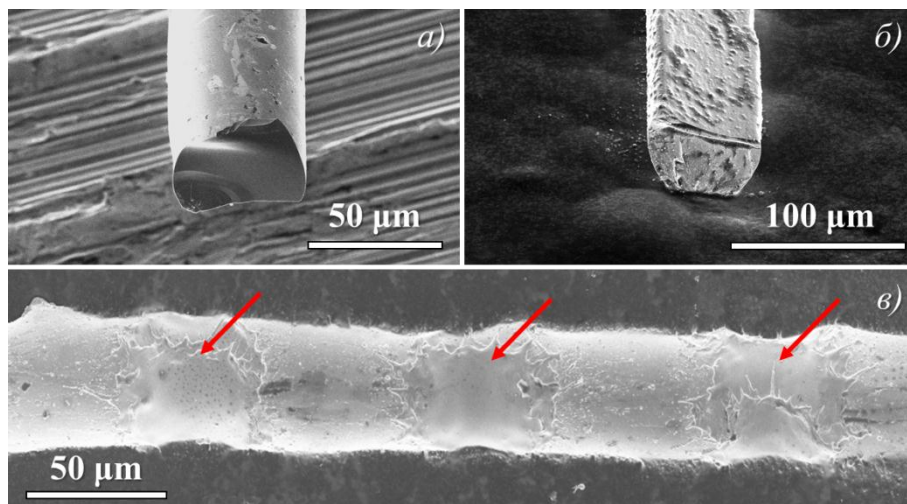


Рис. 2. Электронные изображения микропроводов (PrDy)–(FeCo)–В до вакуумного отжига (а), после вакуумного отжига (б), после вакуумного отжига и лазерного облучения (в; стрелками показаны лазерные метки)

Для получения равномерно распределенной поликристаллической структуры исходные аморфные микропровода подвергали вакуумному отжигу при температуре 900 °С и давлении 10^{-5} Торр (133,3 Па) в течение 2 ч (рис. 2, б). Для получения контролируемой периодической намагниченности поликристаллические микропровода уже после термического отжига подвергали локальному лазерному профилированию (рис. 2, в) с помощью иттербиевого импульсного волоконного лазера с параметрами облучения: длина волны 1070 нм, скорость перемещение лазерного луча 850 мм/с, мощность лазерного луча 16 Вт, частота лазерных импульсов 25 кГц, энергия одиночного лазерного импульса 1 мДж, длительность лазерного импульса 120 нс, плотность энергии импульса 1270 Дж/см², диаметр лазерного пятна 10 мкм.

Структура, химический и фазовый состав микропроводов

Рентгенограммы микропроводов получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения. Рентгеновская дифракционная спектроскопия (XRD – X-ray Diffraction) получена на рентгеновском дифрактометре, обеспечивающем 2θ -сканирование под $\text{Cu } K_{\alpha 1}$ -облучением. Электронные изображения (SEM), энергодисперсионный анализ (EDX), элементное картирование, фазовый анализ обратно рассеянных электронов (BSE) получены с помощью сканирующих электронных микроскопов.

Измерения намагниченности микропроводов

Микроскопию продольного эффекта Керра и получение локальных петель магнитного гистерезиса проводили с помощью микроскопа Керра. Визуализацию магнитных доменов осуществляли методом магнитооптических индикаторных пленок (МОИП) [20]. Интегральный магнитный момент микропровода и его полевую зависимость регистрировали на SQUID-магнитометре.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН.

Результаты и обсуждение

Структура, химический и фазовый состав

На рис. 3 представлены спектры рентгеновской дифракции микропроводов. На XRD-спектре исходного микропровода наблюдается гало, свойственное аморфным материалам, и отсутствие пиков, которые могли бы характеризовать какую-либо кристаллическую структуру (рис. 3, *a*). Вакуумный отжиг аморфного микропровода приводит к исчезновению гало и образованию поликристаллической структуры с наличием кристаллов жесткой магнитной фазы 2-14-1, о чем свидетельствует появление большого количества пиков на XRD-спектре (рис. 3, *б*). Локальное лазерное профилирование не оказывает существенного влияния на объемную поликристаллическую структуру микропровода, однако вызывает появление гало вместе с XRD-спектром в том же диапазоне углов $2\theta = 30\text{--}45$ градусов (рис. 3, *в*), где в аморфном образце наблюдали гало (рис. 3, *a*). Это свидетельствует о частичной аморфизации микропровода.

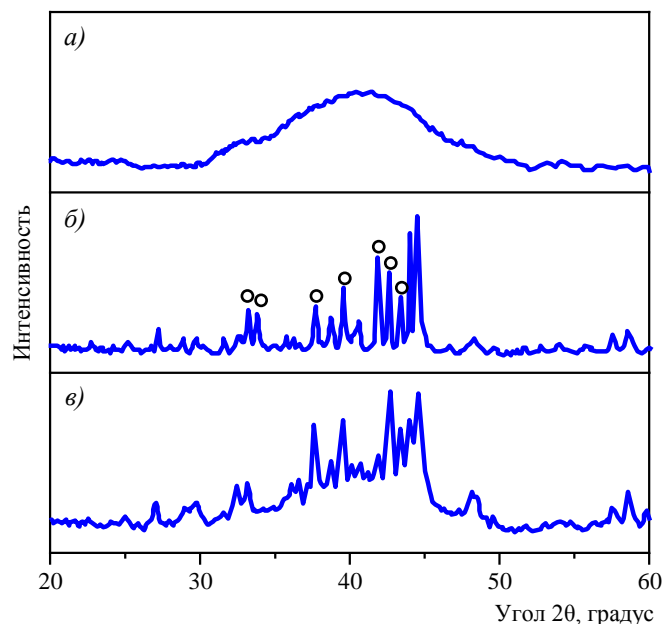


Рис. 3. Спектры рентгеновской дифракционной спектроскопии микропроводов (PrDy)–(FeCo)–В до вакуумного отжига (*a*), после вакуумного отжига (*б*), после вакуумного отжига и лазерного облучения (*в*). Кругжками показаны рефлексы магнитотвердой фазы 2-14-1

Для анализа изменений структуры микропроводов (PrDy)–(FeCo)–В под действием вакуумного и лазерного отжигов из образцов получены ламели (рис. 4). Элементное картирование ламелей, вырезанных из микропроводов до (рис. 4, *a*) и после

(рис. 4, б) вакуумного отжига, а также из области микропровода, подвергнутой лазерной обработке (рис. 4, в), показало однородное распределение по объему всех химических элементов, входящих в состав микропроводов. Наблюдаются различия в спектрах EDX ламелей микропроводов (PrDy)–(FeCo)–В до отжига, после отжига и после лазерного облучения (рис. 5), что может свидетельствовать об изменении химического состава образцов под действием вакуумного отжига и лазерной обработки.

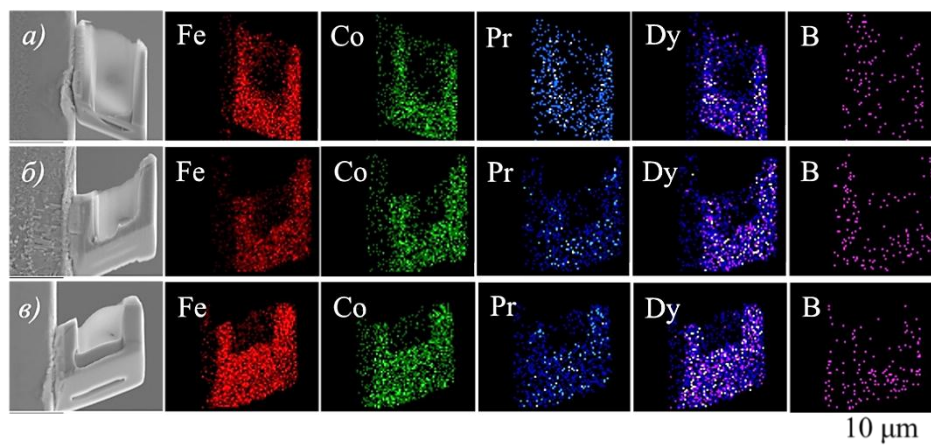


Рис. 4. Электронные изображения и соответствующее им элементное картирование ламелей, вырезанных из микропроводов (PrDy)–(FeCo)–В до вакуумного отжига (а), после вакуумного отжига (б) и из области микропровода после вакуумного отжига и лазерного облучения (в)

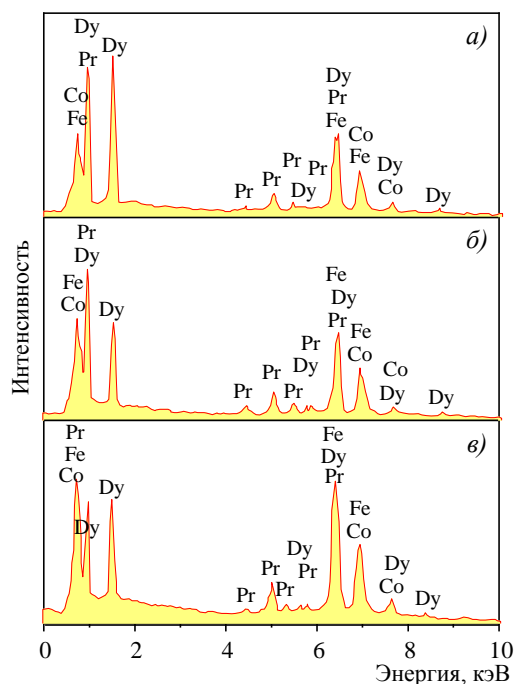


Рис. 5. Энергодисперсионные спектры ламелей микропроводов (PrDy)–(FeCo)–В до вакуумного отжига (а), после вакуумного отжига (б) и после вакуумного отжига и лазерного облучения (в)

Для более детального анализа фазового состава образцов получены изображения с помощью трансмиссионной электронной микроскопии (ТЕМ) и электронограммы микропроводов (рис. 6). До вакуумного отжига структура микропроводов выглядит

однородной (рис. 6, б), на электронограмме наблюдается характерное для аморфного материала гало (рис. 6, а). Вакуумный отжиг приводит к образованию крупных зерен размером от 60 до 430 нм (рис. 6, з) и возникновению поликристаллической структуры, о чем свидетельствует большое количество точечных рефлексов на электронограмме (рис. 6, в).

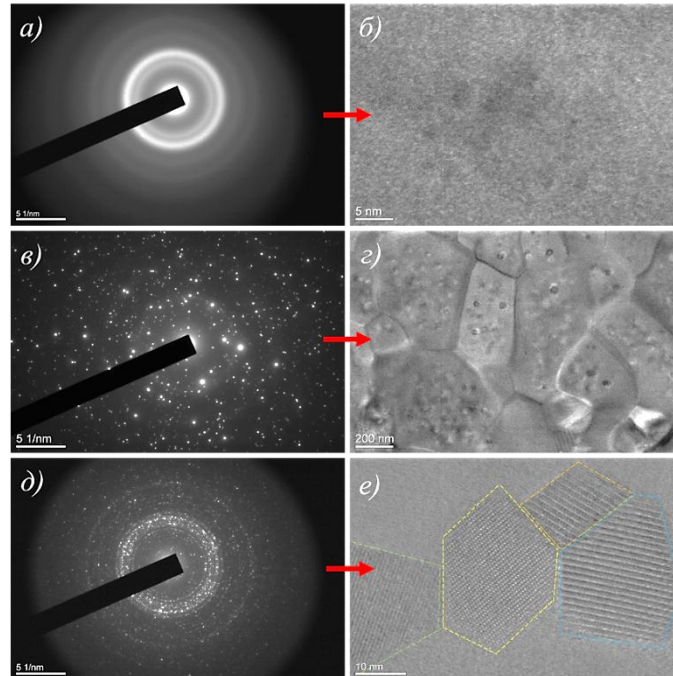


Рис. 6. Рентгенограммы (а, в, д) и соответствующие им ТЕМ-изображения (б, з, е) ламелей микропроводов (PrDy)–(FeCo)–В до вакуумного отжига (а, б), после вакуумного отжига (в, з) и после вакуумного отжига и лазерного облучения (д, е)

Присутствуют новые фазы с увеличенными межплоскостными расстояниями, но число фаз заметно меньше, чем в исходном образце 1 до отжига. Существенным отличием образца 2 от образца 1 является наличие многочисленных мелких включений внутри зерен. Наличием этих включений можно объяснить присутствие на электронограмме слабых размытых колец. Электронограмма ламели (рис. 6, д), вырезанной из участка поликристаллического микропровода, подвергнутого лазерному облучению, содержит как точечные рефлекссы, так и малозаметные размытые кольца, свидетельствующие о наличии кристаллитов в аморфном материале, что подтверждается ТЕМ-изображением (рис. 6, е). Внутренние слабо выраженные дифракционные кольца соответствуют большим межплоскостным расстояниям, которые отсутствуют в чистых металлах и свойственны интерметаллидам.

На изображениях ТЕМ и SEM участка ламели микропровода видно наличие темных включений в зернах (рис. 6, з и рис. 7, а соответственно). Методом построения картин Кикучи для включений и области ламели вне включений (рис. 7, б) установлено, что включения имеют кристаллическую структуру с тетрагональным типом решетки $(Pr, Dy)_2(Fe, Co)_{14}B_1$. Область вне включений имеет объемноцентрированный кубический тип решетки ВСС (Fe, Co). Для ламелей микропроводов до вакуумного отжига и ламелей, вырезанных из участка микропровода после вакуумного отжига и лазерного профилирования, построить картины Кикучи не удалось, что свидетельствует об аморфном состоянии образцов. На рис. 7, в представлены фазовые карты ламели

микропровода после вакуумного отжига. Розовый цвет соответствует тетрагональной фазе $(\text{Pr, Dy})_2(\text{Fe, Co})_{14}\text{B}_1$, синий цвет – кубической фазе ВСС (Fe, Co) , серый и черный цвета – областям с неидентифицированной кристаллической структурой.

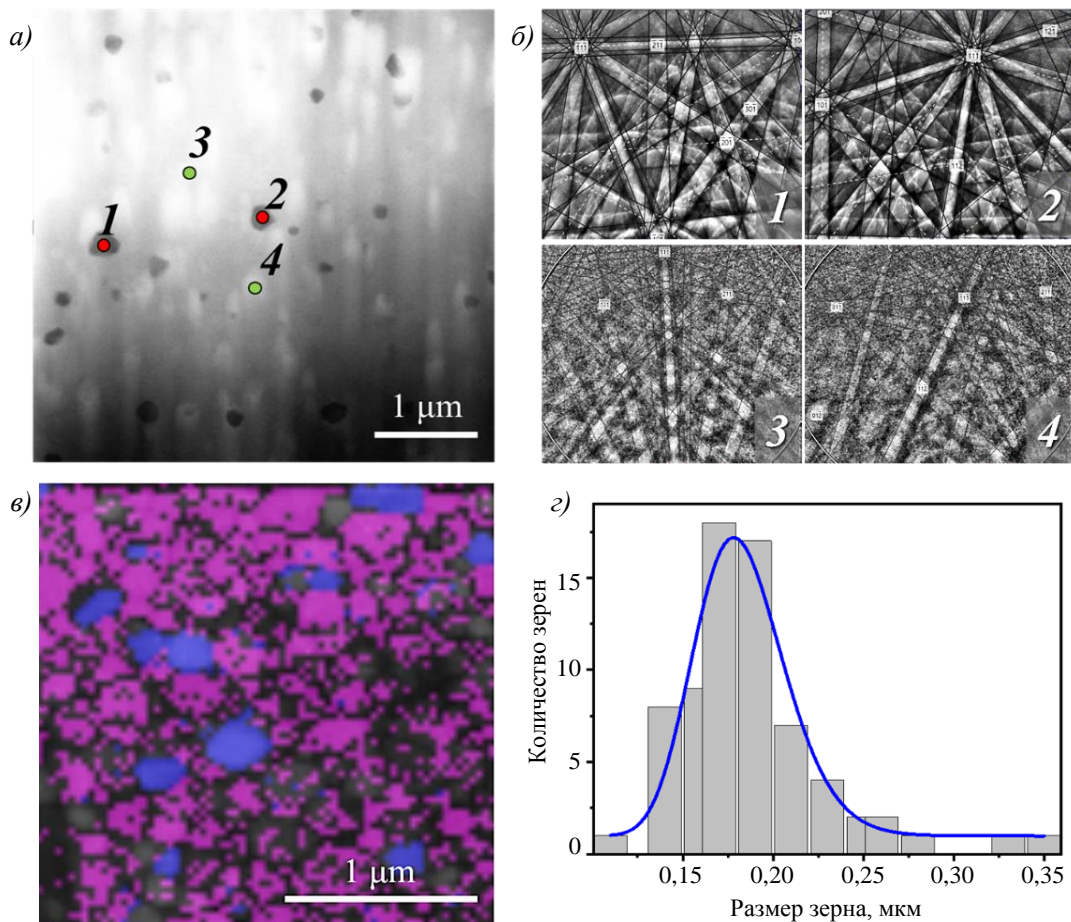


Рис. 7. Электронное изображение (а) участка ламели микропровода $(\text{PrDy})\text{--}(\text{FeCo})\text{--}\text{B}$ после вакуумного отжига с указанием областей построения картин Кикучи. Картины Кикучи (б), зарегистрированные в области темных включений (точки 1 и 2 на рис. а) и в области вне темных включений (точки 3 и 4 на рис. а). Фазовая карта (в) участка ламели микропровода $(\text{PrDy})\text{--}(\text{FeCo})\text{--}\text{B}$ (синий цвет соответствует фазе Fe ВСС, розовый цвет – фазе $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, черный цвет – областям с неидентифицированной фазой). Распределение размера кристаллических зерен в микропроводе после вакуумного отжига (д; сплошная линия – аппроксимация логнормальным распределением)

Таким образом, материал микропровода после вакуумного отжига состоит из субмикронных кристаллических зерен с разным типом решетки, размер зерен подчиняется логнормальному распределению (рис. 7, д).

Магнитные свойства микропроводов

На рис. 8, а представлены петли магнитного гистерезиса, полученные в SQUID-магнитометре для микропровода до вакуумного отжига и после него. Микропровода до вакуумного отжига характеризуются прямоугольной петлей гистерезиса с малым значением коэрцитивной силы ($H_{c1} \approx 10$ Э). Вакуумный отжиг приводит к увеличению коэрцитивной силы на три порядка ($H_{c2} \approx 10$ кЭ), что подтверждает ранее установленное образование жесткой магнитной фазы 2-14-1 под действием высоких температур.

На рис. 8, б представлены локальные петли магнитного гистерезиса, полученные в микроскопе Керра, для микропровода до вакуумного отжига и после вакуумного отжига и лазерного облучения. Для участка микропровода после вакуумного отжига до лазерного облучения локальную петлю магнитного гистерезиса зарегистрировать не удалось, поскольку внешнего магнитного поля в микроскопе Керра оказалось недостаточно для перемагничивания образца. Микропровода до вакуумного отжига характеризуются прямоугольной петлей гистерезиса с малым значением коэрцитивной силы ($H_{c3} \approx 10$ Э) (рис. 8, б), что согласуется с интегральной петлей гистерезиса, полученной в СКВИД-магнетометре (рис. 8, а). Для участка микропровода после вакуумного отжига и лазерного облучения (вставка на рис. 8, б) локальная петля магнитного гистерезиса приобретает наклонную форму, что согласуется с наклонной формой интегральной петли гистерезиса для микропровода после вакуумного отжига (рис. 8, а). При этом наблюдается незначительное увеличение коэрцитивной силы ($H_{c4} \approx 20$ Э), что свидетельствует о присутствии небольшого количества кристаллитов в аморфной матрице после лазерного облучения.

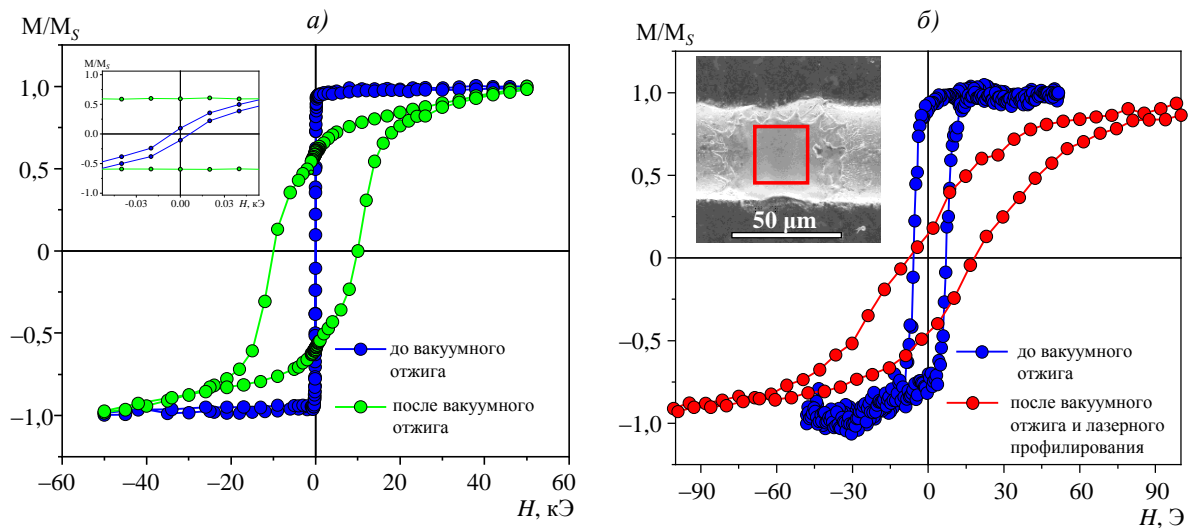


Рис. 8. Интегральные петли магнитного гистерезиса микропроводов (а) до и после вакуумного отжига и локальные петли магнитного гистерезиса (б), зарегистрированные на поверхности микропровода до вакуумного отжига и после вакуумного отжига и лазерного облучения. На вставке красным квадратом показана аморфизированная область, для которой получена петля гистерезиса в микроскопе Керра. Внешнее магнитное поле направлено вдоль главной оси образца, температура 300 К во всех экспериментах

На рис. 9 представлены магнитооптические изображения доменной структуры микропровода до вакуумного отжига (рис. 9, а) и участка микропровода после вакуумного отжига и лазерного облучения (рис. 9, б). Для участка микропровода после вакуумного отжига до лазерного облучения доменов и зародышей намагниченности не обнаружено. В микропроводе до вакуумного отжига (рис. 9, а) хорошо видны движения доменной границы (перемещение светлых и темных контрастов), изменение величины и направления внешнего магнитного поля вызывает перемагничивание образца путем расширения доменов. На участке микропровода после вакуумного отжига и лазерного облучения (рис. 9, б) движения доменов не наблюдается, но имеются области, изменяющие свою намагниченность (светлый контраст меняется на темный).

На рис. 10 представлены магнитооптические изображения доменной структуры микропроводов, полученные методом МОИП.

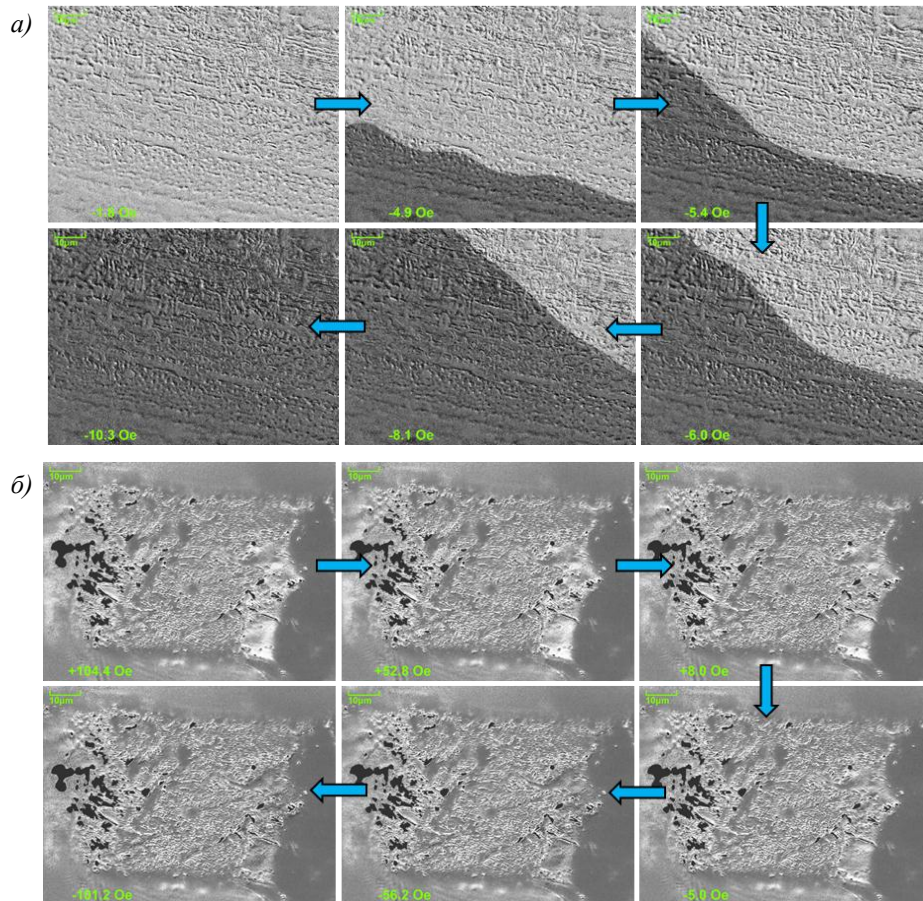


Рис. 9. Магнитооптические изображения поверхности микропровода до вакуумного отжига (а) и лазерной метки на участке микропровода после вакуумного отжига (б), полученные с помощью микроскопа Керра. Стрелками показана последовательность получения изображений. Внешнее магнитное поле направлено вдоль главной оси образца, температура 300 К во всех экспериментах

В микропроводе до вакуумного отжига наблюдается доменная структура (чередование черных и белых контрастов – рис. 10, а), которая разрушается под действием вакуумного отжига (рис. 10, б). Локальное лазерное облучение микропроводов после вакуумного отжига создает области, магнитные полюса которых переключаются в магнитном поле (рис. 10, в).

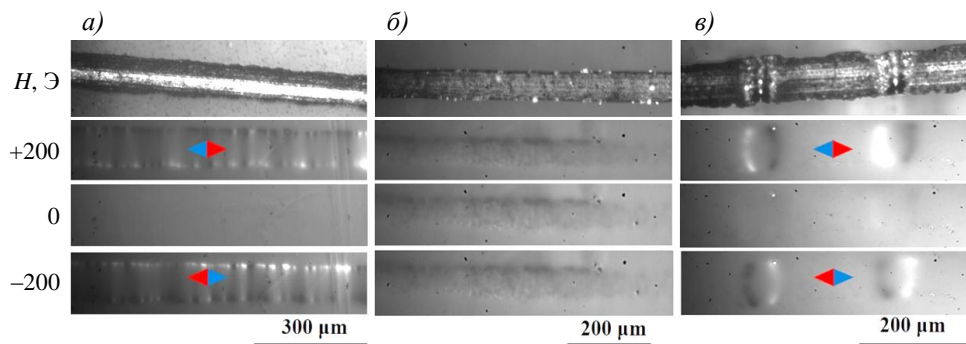


Рис. 10. Изображения микропроводов, полученные методом магнитооптических индикаторных пленок до (а) и после (б) вакуумного отжига, после вакуумного отжига и лазерного облучения (в). Внешнее магнитное поле направлено вдоль главной оси образца (схематично показано стрелками компаса), температура 300 К во всех экспериментах

Заключения

Вакуумный отжиг исходного аморфного микропровода (PrDy)–(CoFe)–В приводит к образованию поликристаллической структуры, содержащей магнито жесткую (PrDy)₂–(CoFe)₁₄–В₁ и магнитомягкую ВСС (Co, Fe) фазы, что способствует значительному увеличению коэрцитивной силы с 10 Э (для аморфного микропровода до вакуумного отжига) до 10 кЭ (для поликристаллического микропровода после вакуумного отжига), при этом наблюдается исчезновение доменов. Локальное лазерное облучение отожженного микропровода вызывает поверхностное восстановление аморфной структуры, которое сопровождается локальным уменьшением коэрцитивной силы до значения 20 Э, близкого к значению коэрцитивной силы исходного аморфного микропровода. В микрообластях, подвергнутых лазерному облучению, наблюдается появление образований, направление намагниченности которых переключается внешним магнитным полем.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 124013100858-3 ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН.

Список источников

1. Gemelli A., Tambussi M., Fusetto S. et al. Recent Trends in Structures and Interfaces of MEMS Transducers for Audio Applications: A Review // *Micromachines*. 2023. Vol. 14 (4). P. 847. DOI: 10.3390/mi14040847.
2. Chircov C., Grumezescu A.M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications // *Micromachines*. 2022. Vol. 13 (2). P. 164. DOI: 10.3390/mi13020164.
3. Algamili A.S., Mohd Khir M.H., Dennis J.O. et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices // *Nanoscale Research Letters*. 2021. Vol. 16 (16). P. 1–21. DOI: 10.1186/s11671-021-03481-7.
4. Sawane M., Prasad M. MEMS piezoelectric sensor for self-powered devices: A review // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2023. Vol. 158. P. 107324. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107324.
5. Pagliano S., Marschner D.E., Maillard D. et al. Micro 3D printing of a functional MEMS accelerometer // *Microsystems & Nanoengineering*. 2022. Vol. 8 (105). P. 1–11. DOI: 10.1038/s41378-022-00440-9.
6. He J.-H., He C.-H., Qian M.-Y., Alsolami A.A. Piezoelectric Biosensor based on ultrasensitive MEMS system // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2024. Vol. 376. P. 115664. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115664.
7. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 2 (108). С. 32–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
8. Imboden M., Morrison J., Lowell E. et al. Controlling Levitation and Enhancing Displacement in Electrostatic Comb Drives of MEMS Actuators // *Journal of microelectromechanical systems*. 2014. Vol. 23 (5). P. 1063–1072. DOI: 10.1109/JMEMS.2014.2303898.
9. Zhou G., Lim Z.H., Qi Y. et al. MEMS gratings and their applications // *International Journal of Optomechatronics*. 2021. Vol. 15 (1). P. 61–86. DOI: 10.1080/15599612.2021.1892248.
10. Büttgenbach S., Feldmann M. Electromagnetic Parallel Microrobot for Micro- and Nano-Handling // *IFAC Proceedings Volumes*. 2008. Vol. 41 (2). P. 12757–12762. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02158.
11. Schonhardt S., Korvink J.G., Mohr J. et al. Magnetic comb drive actuator // *21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. P. 479–482. DOI: 10.1109/MEMSYS.2008.4443697.
12. Xia N., Hunt T.P., Mayers B.T. et al. Combined microfluidic-micromagnetic separation of living cells in continuous flow // *Biomedical Microdevices*. 2006. Vol. 8 (4). P. 299–308. DOI: 10.1007/s10544-006-0033-0.

13. Chen H., Li Y., Zhang Z., Wang S. Immunomagnetic separation of circulating tumor cells with microfluidic chips and their clinical applications // *Biomicrofluidics*. 2020. Vol. 14 (4). P. 041502. DOI: 10.1063/5.0005373.
14. Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бакрадзе М.М., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Инженерия редкоземельных микромагнитов RE–TM–B (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). С. 44–60. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
15. Corte-León P., Zhukova V., Blanco J.M. et al. Engineering of domain wall propagation in magnetic microwires with graded magnetic anisotropy // *Applied Materials Today*. 2022. Vol. 26. P. 101263. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101263.
16. Onufer J., Duranka P., Ziman J. et al. Effects of thermal treatment and temperature on domain wall dynamics in magnetic microwire // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2023. Vol. 586. P. 171169. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.171169.
17. Onufer J., Ziman J., Duranka P., Klavdivová M. Dynamics of a single domain wall between axial domains in magnetic microwire // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2024. Vol. 61 (6). P. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2024.3481468.
18. Дворецкая Е.В., Потапов М.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Магнитосопротивление микроигл (Pr, Dy)(Fe, Co)B // *Труды ВИАМ*. 2025. № 1 (143). С. 46–59. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-46-59.
19. Дворецкая Е.В., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Магнетронное напыление оболочки железа и микровключения в микропроводах PrDyFeCoB // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 85–96. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-85-96.
20. Kabanov Yu., Zhukov A., Zhukova V., Gonzalez J. Magnetic domain structure of wires studied by using the magneto-optical indicator film method // *Applied Physics Letters*. 2005. Vol. 87. P. 142507. DOI: 10.1063/1.2077854.

References

1. Gemelli A., Tambussi M., Fusetto S. et al. Recent Trends in Structures and Interfaces of MEMS Transducers for Audio Applications: A Review. *Micromachines*, 2023, vol. 14 (4), p. 847. DOI: 10.3390/mi14040847.
2. Chircov C., Grumezescu A.M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications. *Micromachines*, 2022, vol. 13 (2), p. 164. DOI: 10.3390/mi13020164.
3. Algamili A.S., Mohd Khir M.H., Dennis J.O. et al. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Research Letters*, 2021, vol. 16 (16), pp. 1–21. DOI: 10.1186/s11671-021-03481-7.
4. Sawane M., Prasad M. MEMS piezoelectric sensor for self-powered devices: A review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2023, vol. 158, pp. 107324. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107324.
5. Pagliano S., Marschner D.E., Maillard D. et al. Micro 3D printing of a functional MEMS accelerometer. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, vol. 8 (105), pp. 1–11. DOI: 10.1038/s41378-022-00440-9.
6. He J.-H., He C.-H., Qian M.-Y., Alsolami A.A. Piezoelectric Biosensor based on ultrasensitive MEMS system. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, vol. 376, p. 115664. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115664.
7. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), pp. 32–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 30, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
8. Imboden M., Morrison J., Lowell E. et al. Controlling Levitation and Enhancing Displacement in Electrostatic Comb Drives of MEMS Actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, vol. 23 (5), pp. 1063–1072. DOI: 10.1109/JMEMS.2014.2303898.
9. Zhou G., Lim Z.H., Qi Y. et al. MEMS gratings and their applications. *International Journal of Optomechatronics*, 2021, vol. 15 (1), pp. 61–86. DOI: 10.1080/15599612.2021.1892248.

10. Büttgenbach S., Feldmann M. Electromagnetic Parallel Microrobot for Micro- and Nano-Handling. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, vol. 41 (2), pp. 12757–12762. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.02158.
11. Schonhardt S., Korvink J.G., Mohr J. et al. Magnetic comb drive actuator. *21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008, pp. 479–482. DOI: 10.1109/MEMSYS.2008.4443697.
12. Xia N., Hunt T.P., Mayers B.T. et al. Combined microfluidic-micromagnetic separation of living cells in continuous flow. *Biomedical microdevices*, 2006, vol. 8 (4), pp. 299–308. DOI: 10.1007/s10544-006-0033-0.
13. Chen H., Li Y., Zhang Z., Wang S. Immunomagnetic separation of circulating tumor cells with microfluidic chips and their clinical applications. *Biomicrofluidics*, 2020, vol. 14 (4), p. 041502. DOI: 10.1063/5.0005373.
14. Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Bakradze M.M., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Rare-earth RE–TM–B micromagnets engineering (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 44–60. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
15. Corte-León P., Zhukova V., Blanco J.M. et al. Engineering of domain wall propagation in magnetic microwires with graded magnetic anisotropy. *Applied Materials Today*, 2022, vol. 26, p. 101263. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101263.
16. Onufer J., Duranka P., Ziman J. et al. Effects of thermal treatment and temperature on domain wall dynamics in magnetic microwire. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, vol. 586, p. 171169. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.171169.
17. Onufer J., Ziman J., Duranka P., Klavdivová M. Dynamics of a single domain wall between axial domains in magnetic microwire. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2024, vol. 61 (6), pp. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2024.3481468.
18. Dvoretzkaya E.V., Potapov M.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. Magnetoresistance of microneedles (Pr, Dy)(Fe, Co)B. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 46–59. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 30, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-46-59.
19. Dvoretzkaya E.V., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Koplak O.V., Morgunov R.B. Magnetron sputtering of the iron shell and microinclusions in microwires PrDyFeCoB. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 85–96. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-85-96.
20. Kabanov Yu., Zhukov A., Zhukova V., Gonzalez J. Magnetic domain structure of wires studied by using the magneto-optical indicator film method. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, p. 142507. DOI: 10.1063/1.2077854.

Информация об авторах

Дворецкая Елизавета Витальевна, ведущий инженер, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; научный сотрудник, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru

Потапов Максим Викторович, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пискорский Вадим Петрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Моргунов Роман Борисович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; главный научный сотрудник, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru

Information about the authors

Elizaveta V. Dvoretzkaya, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Researcher, FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru

Maxim V. Potapov, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vadim P. Piskorskiy, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Professor, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Chief Researcher, FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.07.2025.
The article was submitted 03.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 07.07.2025.