

05,12

## Особенности получения методом матричного синтеза, структура и магнитные свойства нанопроводов из железа

© Д.Л. Загорский<sup>1</sup>, И.М. Долуденко<sup>1</sup>, К.В. Фролов<sup>1</sup>, И.В. Перунов<sup>1</sup>, М.А. Чуев<sup>2</sup>, Н.К. Чумаков<sup>3</sup>, И.В. Калачикова<sup>1</sup>, В.В. Артёмов<sup>1</sup>, Т.В. Цыганова<sup>1</sup>, С.С. Кругликов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт кристаллографии ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН НИЦ „Курчатовский институт“, Москва, Россия

<sup>2</sup> Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> НИЦ „Курчатовский институт“, Москва, Россия

<sup>4</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева Москва, Россия

E-mail: dzagorskiy@gmail.com

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Исследованы нанопроволоки из железа — образцы в виде массивов параллельных нитей были получены методом матричного синтеза с использованием трековых мембран. Использовались матрицы с параллельными порами 100 nm, а ростовое напряжение варьировалось — 0,8, 1,0 и 1,2 V. Проведены электронно-микроскопически исследования ростовой матрицы и образцов. Полученные данные мёссбауэровской спектроскопии и магнитометрии хорошо коррелируют. Так, сравнение результатов, полученных этими методами показало, что при увеличении потенциала осаждения при синтезе нанопроволок увеличивается угол разориентации магнитных моментов доменов. Также показано, что при увеличении потенциала осаждения уменьшается коэрцитивная сила.

**Ключевые слова:** магнитные нанопроволоки, матричный синтез, структура, мёссбауэровская спектроскопия, магнитные свойства.

DOI: 10.21883/FTT.2023.06.55653.11H

### 1. Введение

В последние 15 лет большое внимание исследователей привлечено к изучению магнитных наноматериалов и наноструктур с сильной анизотропией формы: нанопроводов (НП), полос, дисков, искривленных поверхностей, спиралей [1–7], перспективных для применения в наносенсорах, спинтронных устройствах, элементах квантовых компьютеров, биологии и медицине. Значительное количество результатов получено для различных типов магнитных НП, в том числе достаточно сложных по составу и/или форме: из сплавов на основе 3d переходных металлов (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu), слоистых, полых, профилированных [8].

Вместе с тем, сохраняется интерес к простейшим типам НП — гомогенным, из одного металла, в первую очередь потому, что для них возможно наиболее точно и корректно исследовать и теоретически описывать влияние изменения геометрии и условий получения на магнитные свойства. Наиболее распространенным методом получения таких НП является матричный (темплатный) синтез — заполнение требуемым материалом узких каналов в пористой матрице. Такой процесс обычно проводится электрохимическим методом [9–11].

Во многих работах исследовались НП из железа с диаметром от 5 до 500 nm, полученные в различных мат-

рицах [12–22]. Было показано, что условия роста сильно влияют на кристалличность НП и на их физические свойства, в частности магнитные. Обнаружено, что среди нескольких основных факторов: состав электролита, диаметр пор матрицы и ростовое напряжение, — последний играет существенную роль. При изучении магнитных свойств одним из наиболее интересных с практической точки зрения обнаруженных эффектов является формирование спонтанной намагниченности НП вдоль их оси и высокие значения магнитных параметров — коэрцитивной силы и остаточной намагниченности.

Однако полноценное понимание и корректное теоретическое описание этих эффектов затруднены из-за значительного разброса параметров самих НП, синтезированных при различных условиях. Кроме того, в качестве полимерной матрицы обычно применялись коммерческие трековые мембраны, в которых оси пор, а следовательно, и получаемых в них НП, имеют разброс наклонов к плоскости матрицы, который как правило не учитывался в теоретических моделях.

Ранее нами была продемонстрирована эффективность теоретического описания экспериментальных результатов магнитометрии и мёссбауэровской спектроскопии на ядрах <sup>57</sup>Fe массивов НП на основе железа, электроосажденных в трековых порах полимерной матрицы с помощью обобщенной модели Стонера–Вольфарта [22–26].

В данной работе в рамках этого подхода представлены результаты исследования массивов НП железа, электроосажденных при ростовых напряжениях 0,8, 1,0 и 1,2 V в поры особой полимерной матрицы, в которой оси пор параллельны друг другу и перпендикулярны поверхности матрицы.

## 2. Методика эксперимента

### Материалы и приборы

**Матрица.** В качестве ростовой матрицы использовались трековые мембраны из полиэтилентерефталата  $(C_{10}H_8O_4)_n$ , произведенные в ОИЯИ, Дубна. Мембраны имели следующие параметры: диаметр пор — 100 nm; толщина пленки — 12  $\mu\text{m}$ ; плотность пор  $\approx 1 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ . Исходная полимерная пленка облучалась потоком ионов строго перпендикулярным поверхности для формирования треков параллельных друг другу и перпендикулярных поверхности матрицы (пленки).

С одной из сторон мембрана покрывалась сплошным медным слоем, который использовался в качестве катода. Сначала методом термического напыления в вакууме (установка ВУП-4) формировался тонкий слой аморфной меди, который затем утолщался до 5–30  $\mu\text{m}$  гальваническим осаждением. Последующее электроосаждение железа в поры проводилось через противоположную поверхность матрицы. Использовался электролит следующего состава:  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  — 120 g/l;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  — 25 g/l; лаурилсульфат натрия — 1 g/l (для увеличения смачиваемости пор матрицы). Для предотвращения перехода двухвалентных ионов железа  $\text{Fe}^{2+}$  в трехвалентные  $\text{Fe}^{3+}$  в процессе осаждения использовалась аскорбиновая кислота с концентрацией 1 g/l.

**Электроосаждение.** Электроосаждение проходило в гальванической ячейке. В качестве источника применялся потенциостат — гальваностат Elins P-2X. Процесс проводился по двухэлектродной схеме, с применением железного анода, при значениях потенциала осаждения  $U = 0,8 \text{ V}$ , 1,0 и 1,2 V.

**Электронная микроскопия и элементный анализ.** Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проводилась на электронном микроскопе JEOL JSM 6000 plus, оснащенный приставкой для энергодисперсионного элементного анализа, при ускоряющем напряжении 15 kV, в режиме вторичных электронов.

**Магнитные измерения.** Кривые намагничивания всех образцов измеряли при комнатной температуре на стандартном вибрационном магнитометре LakeShore 7407 с частотой 82 Hz. Каждый образец с площадью поверхности около 0,5  $\text{cm}^2$  закреплялся на плоском держателе, а внешнее магнитное поле  $H$  было направлено перпендикулярно, под углами 45, 60° и параллельно к плоскости полимерной мембраны образца, что соответствовало следующему набору взаимных ориентаций магнитного поля и осей НП  $L$  в мембране:  $\varphi = 0^\circ$  ( $H \parallel L$ ),  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$  ( $H \perp L$ ) соответственно. Величина

магнитного поля  $H$  циклически изменялась в пределах от –5 до 5 kOe.

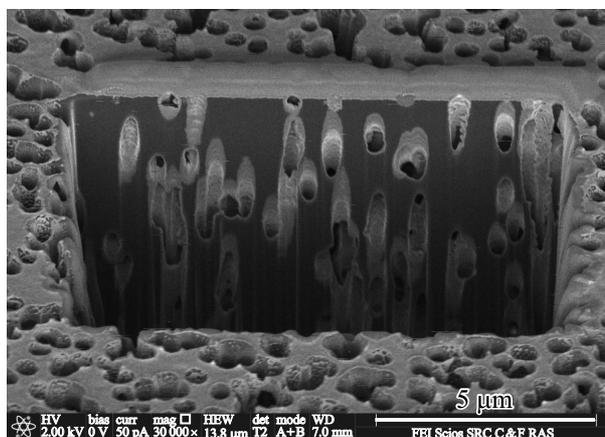
**Мёссбауэровские измерения.** Мёссбауэровские спектры пропускания  $^{57}\text{Fe}$  были измерены при комнатной температуре на стандартном спектрометре MS-1104Em в режиме постоянных ускорений с источником гамма-излучения  $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$  Ritverc MCo7.114 [27]. Изомерные сдвиги рассчитывались относительно стандартного поглотителя Ritverc MRA.2.6 из фольги  $\alpha\text{-Fe}$  толщиной 30  $\mu\text{m}$  [28]. Коллимированный поток гамма-излучения был направлен перпендикулярно плоскости полимерной матрицы так, чтобы волновой вектор гамма-квантов  $k_\gamma$  совпадал в направлении с осью  $L$  трековых пор и НП  $k_\gamma \parallel L$ . Компьютерная обработка экспериментальных спектров выполнена с использованием программного обеспечения Univem MS, входящего в комплект поставки спектрометра MS-1104Em, и программного обеспечения DISCOVER [29–30].

**Отделение полимерной матрицы.** Магнитные и мёссбауэровские измерения проводились на массивах НП, находящихся в полимерной матрице. Для проведения СЭМ полимерная матрица отделялась стандартным методом растворения вконцентрированной щелочи при нагреве до  $T = 65^\circ\text{C}$ . Для предотвращения окисления железных НП после удаления полимерной матрицы массив выделенных НП сразу же помещался в вакуумную камеру электронного микроскопа.

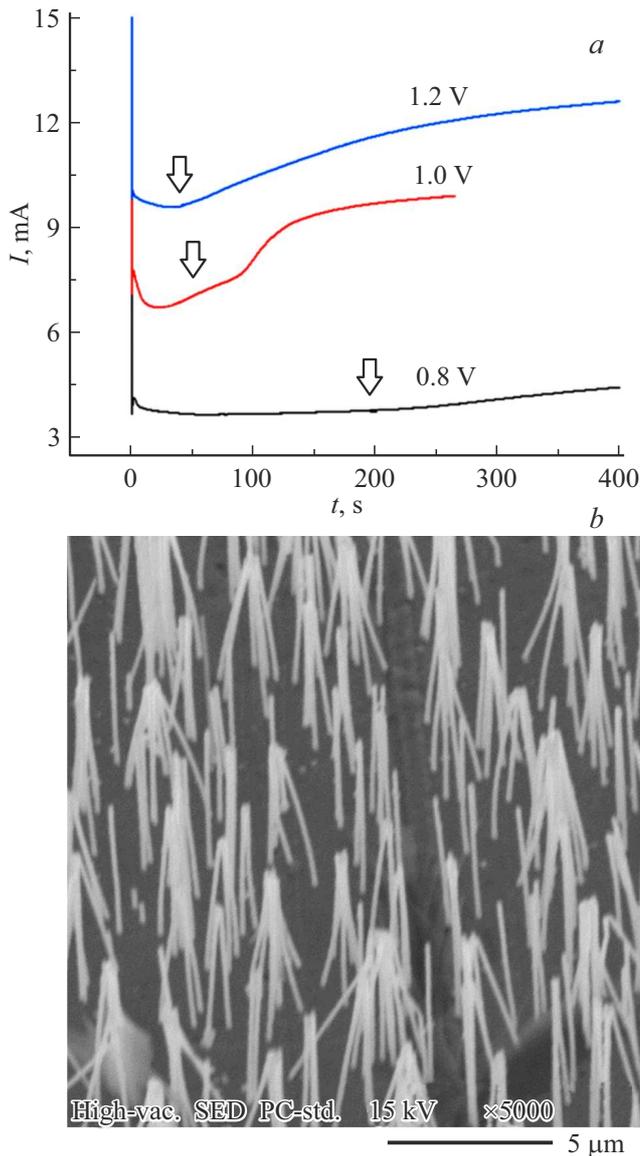
## 3. Результаты и обсуждение

**Аттестация матрицы.** На предварительном этапе была проведена аттестация ростовой мембраны. Методом фокусированного ионного пучка (FIB) на электронном микроскопе Scios DualBeam FEI был выполнен срез матрицы, СЭМ-изображение которого представлено на рис. 1.

Приведенное изображение позволяет оценить диаметр пор, подтвердить взаимную параллельность каналов пор и их перпендикулярность поверхности мембраны.



**Рис. 1.** СЭМ-изображение слегка наклонного поперечного среза полимерной мембраны выполненного фокусированным ионным пучком (FIB).



**Рис. 2.** *a* — Хроноамперограммы электроосаждения  $I(t)$  тестовых образцов массивов НП железа при разных потенциалах, (стрелками обозначено время осаждения для контрольных образцов); *b* — СЭМ-изображение полученных образцов массива НП железа после отделения ростовой полимерной матрицы.

**Контроль процесса электроосаждения.** Для контроля гальванического процесса осаждения железа в поры матрицы при различных потенциалах проводились запись и последующий анализ хроноамперограмм  $I(t)$ , которые представлены на рис. 2, *a*.

Анализ полученных зависимостей  $I(t)$  позволил определить оптимальное времени осаждения, при котором материал растущей НП максимально заполнял трековую пору, но не выходил за её пределы (контроль — показано стрелками).

**Результаты СЭМ.** На рис. 2, *b* представлен пример полученных с помощью СЭМ микрофотографий. Диа-

**Таблица 1.** Мёссбауэровские сверхтонкие параметры для исследованных образцов массивов НП.  $\delta$  — изомерный сдвиг,  $B_{\text{hf}}$  — сверхтонкое магнитное поле на ядрах  $^{57}\text{Fe}$ ,  $A_{2,5}$  — относительная интенсивность 2 и 5 линий в магнитном секстете,  $\Delta\Theta_{\text{ms}}$  — половина угла раствора конуса, внутри которого распределена ориентация магнитных моментов доменов внутри НП, вычисленные из мёссбауэровских измерений,  $G$  — ширины гауссового распределения сверхтонких магнитных полей.

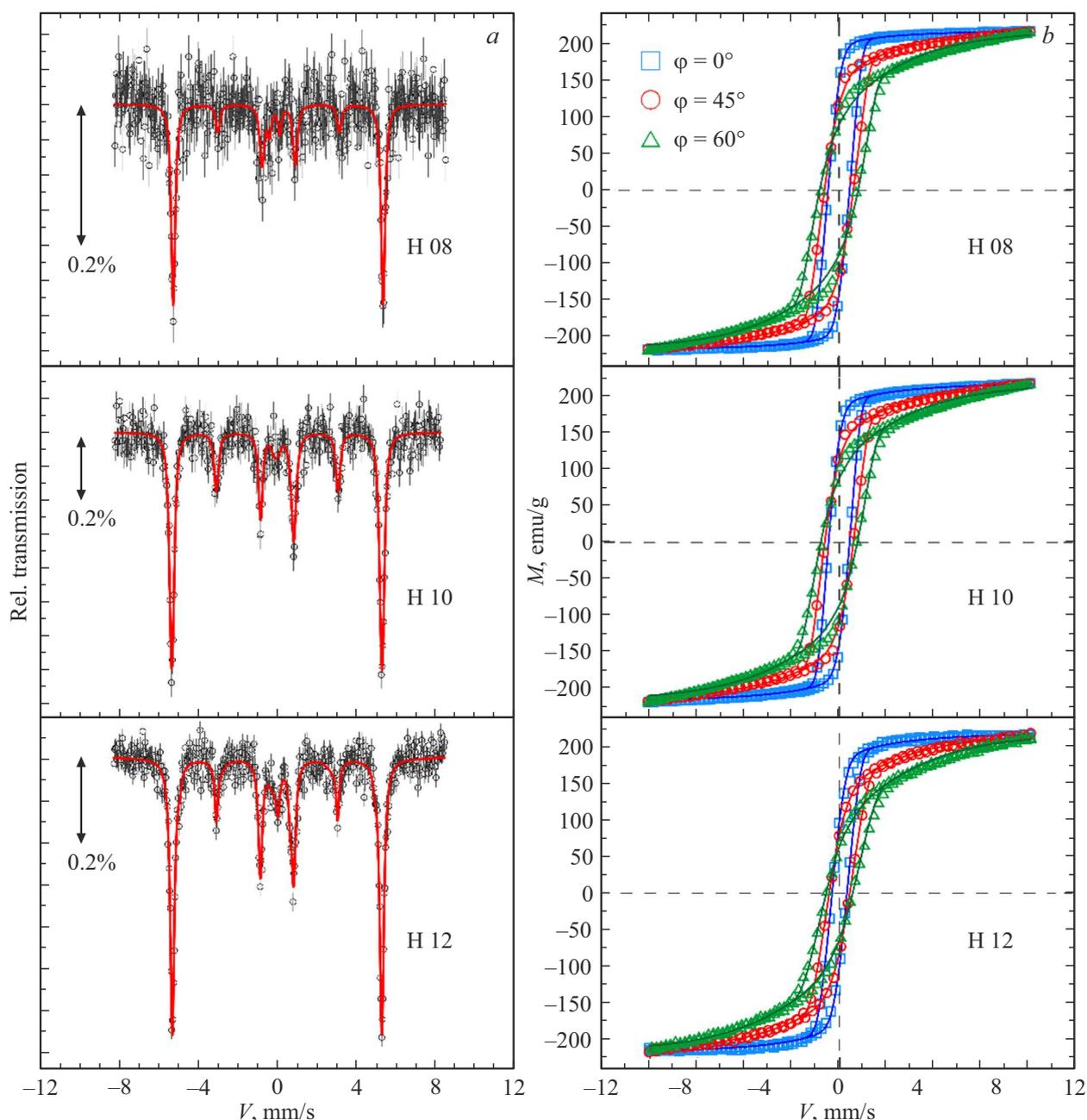
№	$\delta$ , mm/s	$B_{\text{hf}}$ , Т	$A_{2,5}$	$\Delta\Theta_{\text{ms}}$ , °	$G$ , Т
0.8 V	0.018(9)	33.00(3)	0.436	38.0(1)	0.26(7)
1.0 V	-0.026(4)	33.05(2)	0.703	48.5(1)	0.40(3)
1.2 V	0.013(2)	32.92(1)	0.539	42.3(1)	0.30(2)

метр НП соответствовал диаметру пор матрицы, а по измеренной длине НП оценивалась скорость роста. Проведенный элементный анализ показал, что полученные НП полностью состоят из железа. На рис. 2, *b* видно, что часть НП слипается друг с другом во время сушки. При этом у некоторых НП длина заметно меньше средней длины в массиве. Мы предполагаем, что с одной стороны это может быть связано с остановкой роста НП в канале соответствующих пор из-за его перекрытия выделяющимся газообразным водородом, а с другой — с отламыванием отдельных НП в процессе удаления полимерной матрицы и манипулирования образцом при переносе в камеру электронного микроскопа.

Поскольку направления сверхтонкого магнитного поля на ядрах  $^{57}\text{Fe}$   $B_{\text{hf}}$  и магнитного момента сферического домена  $M$  совпадают, в нашем случае угол  $\theta_k$  характеризует отклонение  $M$  от оси НП  $L$ . При ориентации моментов  $M$  строго параллельно вектору  $k_y$  угол  $\theta_k = 0$  и величина  $A_{2,5} = 0$ , а при перпендикулярности векторов  $M$  и  $k_y$  угол  $\theta_k = \pi/2$  и величина  $A_{2,5} = 4$ .

Ранее было показано, что магнитные моменты однодоменных сферических частиц диаметром менее 20 nm в линейных цепочках должны антиферромагнитно упорядочиваться вдоль цепочек (одномерное антиферромагнитное упорядочение) [32], а мёссбауэровские спектры измеренные на массивах магнитных НП с диаметром менее 20 nm демонстрирует практически полное исчезновение линии 2 и 5 в секстете [33,34]. При увеличении диаметра НП однодоменное состояние в поперечном сечении провода нарушается, что приводит к отклонению ориентации „легких“ осей магнитных доменов внутри НП от направления вектора  $k_y$  и распределению параметров сверхтонких взаимодействий в мёссбауэровском спектре, которое определяется средним значением  $\langle \cos^2 \theta_k \rangle$  [35].

Отклонение от направления вектора  $k_y$  ориентации осей самих НП, обусловленное взаимной непараллельностью трековых пор в стандартной полимерной матрице, приводит к дополнительному вкладу в распределение мёссбауэровских параметров. Для удаления (избегания) этого вклада и максимально корректного учета (вы-



**Рис. 3.** Мёссбауэровские спектры (а) и кривые намагниченности (b) для образцов Н 08, Н 10, Н 12 массивов НП железа, осажденных при потенциалах 0.8 В, 1.0 В и 1.2 В соответственно.

числения) разориентации направлений „легких“ осей магнитных доменов внутри НП в данной работе была использована специально подготовленная полимерная матрица с трековыми порами параллельными друг другу и перпендикулярными ее поверхности (см. рис. 1).

**Мёссбауэровская спектроскопия.** Спектры всех образцов демонстрируют характерное шестилинейное магнитное расщепление (рис. 3, а) и хорошо аппроксимируются одним секстетом со сверхтонкими параметрами, соответствующими металлическому  $\alpha$ -Fe (см. табл. 2). Относительные интенсивности 2-ой и 5-ой ли-

ний секстета существенно отличаются от соотношения  $I_{1,6} : I_{2,5} : I_{3,4} = 3 : 2 : 1$ , характерного для поликристаллических материалов, что указывает на наличие спонтанной намагниченности вдоль осей НП. Известно, что в магнитной сверхтонкой структуре мёссбауэровского спектра интенсивности линий секстета удовлетворяют соотношениям

$$I_{1,6} : I_{3,4} = 3 \quad \text{and} \quad I_{2,5} = A_{2,5} = 4 \sin^2 \theta / (1 + \cos^2 \theta_k),$$

где  $\theta_k$  — угол между волновым вектором  $\mathbf{k}_\gamma$  и направлением магнитного поля  $\mathbf{B}_{\text{нф}}$  [31].

**Таблица 2.** Параметры кривых намагничивания для исследованных образцов массивов НП.  $M_0$  — намагниченность насыщения,  $K$  — константа магнитной анизотропии,  $D$  — эффективный средний диаметр магнитного домена НП,  $\Delta D/D$  — сравнительная ширина гауссова распределения диаметров доменов,  $\Delta\Theta_{\text{mgn}}$  — половина угла раствора конуса, внутри которого распределена ориентация магнитных моментов доменов внутри НП, вычисленные из данных магнитометрии,  $H_C$  — коэрцитивная сила  $KV/k_B T$  — энергия магнитной анизотропии,  $V$  — средний объем магнитного домена

$N_0$	$M_0, \text{A} \cdot \text{cm}^2/\text{kg}$	$K \cdot 10^{-7}, \text{J}/\text{m}^3$	$D_{\text{mgn}}, \text{nm}$	$\Delta D/D$	$\Delta\Theta_{\text{mgn}}$	$H_C, \text{Oe}$	$KV/k_B T$
0.8 V	217.9(1)	1.74(1)	7.9(1)	0.13(1)	36.1(2)	450(10)	11.03(5)
1.0 V	218.1(1)	1.77(1)	7.9(1)	0.12(1)	45.1(4)	435(10)	11.21(4)
1.2 V	218.8(2)	1.76(1)	7.6(1)	0.13(1)	47.9(4)	330(10)	9.69(5)

На рис. 3, *b* — экспериментальные точки для различных ориентаций осей НП  $L$  в массиве к направлению внешнего магнитного поля  $H$  показаны: для угла  $\varphi = 0^\circ$  — синими квадратами,  $\varphi = 45^\circ$  — красными кружками,  $\varphi = 60^\circ$  — зелеными треугольниками. Непрерывные линии соответствующих цветов проведены согласно результатам расчетной аппроксимации, выполненной в рамках обобщенной модели Стонера–Вольфарта.

Ранее в работе [22] мы показали, что направления магнитных моментов доменов НП распределены вокруг направления  $\theta_k = 0$  в интервал  $\Delta\Theta$  ( $0 < \Delta\Theta < \pi/2$ ) вдоль полярного угла, т.е. в конусе направлений с углом раствора  $2\Delta\Theta$  относительно осей НП нормальных к поверхности мембраны. Рассчитанные в ходе анализа мессбауэровских спектров в рамках данного подхода значения сверхтонких параметров и углов приведены в табл. 1.

**Магнитометрия.** Измеренные кривые намагничивания представлены на рис. 3, *b*. Для всех образцов массивов НП петли гистерезиса демонстрируют характерную для ферромагнетиков форму. В табл. 2 представлены экспериментальные значения магнитных параметров при комнатной температуре, а также расчетные значения константы магнитной анизотропии  $K$ , энергии магнитной анизотропии  $KV/k_B T$ , намагниченности насыщения  $M_0$ , критического магнитного поля перемагничивания домена  $H_C = 2K/M_0$ , эффективный средний диаметр доменов  $D_0$ , относительная ширина гауссовского распределения диаметров доменов  $\Delta D/D_0$ . Расчетные значения параметров были получены в рамках обобщенной модели Стонера–Вольфарта [36–38], уже успешно использованной нами ранее в работе [26]. Аппроксимация экспериментальных кривых намагничивания (на рис. 3, *b* показана сплошными линиями) при значениях угла между направлением осей НП и магнитным полем  $H$   $\varphi > 45^\circ$  оказалась неудовлетворительной (см. зеленую кривую аппроксимации для  $\varphi = 60^\circ$  на рис. 3, *b*), что обусловлено сложностью (корректного) учета неоднородности магнитного поля на образце с данной геометрической формой и размерами.

Следует отметить, что значения углов разброса ориентации намагниченности  $\Delta\Theta_{\text{ms}}$  и  $\Delta\Theta_{\text{mgn}}$ , полученные двумя методами (см. табл. 1 и 2), практически совпадают.

## 4. Заключение

Были определены режимы получения массива НП из железа при различных условиях. СЭМ-измерения подтвердили параллельное взаимное расположение пор в полимерной матрице и выращенных в них НП, а также их перпендикулярность поверхности матрицы.

Анализ результатов мессбауэровской спектроскопии и магнитных измерений показал, что:

- с увеличением ростового напряжения большинство магнитных и мессбауэровских параметров практически не меняются. Вместе с тем, угол распределения  $2\Delta\Theta$  (угол раствора конуса, внутри которого „распределены“ направления намагниченности НП) растет, а коэрцитивная сила  $H_C$  заметно уменьшается.

- угол  $2\Delta\Theta$  распределения направления намагниченности массивов „параллельных“ НП с диаметром 100 nm довольно большой, что очевидно обусловлено малым размером магнитных доменов, упаковка которых внутри НП далека от квазиодномерных цепочек сфер. При этом из полученных значений  $2\Delta\Theta$  для массивов „параллельных“ НП следует, что вклад в распределение наклона осей НП в обычных полимерных трековых мембранах не очень велик и составляет не более  $10\text{--}15^\circ$ .

- магнитные измерения при различной ориентации образца относительно направления внешнего магнитного поля и рассчитанные значения энергии магнитной анизотропии  $KV/k_B T$  продемонстрировали сильную анизотропию магнитных свойств и высокую устойчивость НП к перемагничиванию (размагничиванию).

Таким образом показано, что изменение ростового потенциала осаждения может быть использовано для управления магнитными параметрами НП.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-22-00983.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] J. Ping Liu, E. Fullerton, O. Gutfleisch, D.J. Sellmyer. *Nanoscale Magnetic Materials and Applications*. Springer Dordrecht, Heidelberg, London, N.Y. (2009). 732 p.
- [2] D.Y. Nam, S.H. Kim, Y.S. Jeon, Y.K. Kim. *IEEE Transact. Magn.* **53**, *11*, 1 (2017).
- [3] D.Y. Nam, A.Y. Samardak, Y.S. Jeon, S.H. Kim, A.V. Davydenko, A.V. Ognev, A.S. Samardak. *Y.K. Kim. Nanoscale* **10**, 20405 (2018).
- [4] R. Streubel, P. Fischer, F. Kronast, V.P. Kravchuk, D.D. Sheka, Y. Gaididei, O.G. Schmidt, D. Makarov. *Phys. D* **49**, 363001 (2016).
- [5] D. Gregurec, A.W. Senko, A. Chuvilin, P.D. Reddy, A. Sankararaman, D. Rosenfeld, P.H. Chiang, F. Garcia, I. Tafel, G. Varnavides, E. Ciocan, P. Anikeeva. *ACS Nano* **14**, 7, 8036 (2020).
- [6] T.N. Zamay, V.S. Prokopenko, S.S. Zamay, K.A. Lukyanenko, O.S. Kolovskaya, V.A. Orlov, G.S. Zamay, R.G. Galeev, A.A. Narodov, A.S. Kichkailo. *Nanomaterials* **11**, 6, 1459 (2021).
- [7] J. Xia, X. Zhang, X. Liu, Y. Zhou, M. Ezawa. *Commun. Mater.* **3**, 88 (2022).
- [8] M. Vazquez. *Magnetic Nano- and Microwires. Design, Synthesis. Properties and Applications*. Woodhead Publishing (2020). 997 p.
- [9] C.R. Martin. *Science* **266**, 23, 1961 (1994).
- [10] S.K. Chakarvarti, J. Vetter. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **62**, *1*, 109 (1991).
- [11] J. Vetter, R. Spohr. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **79**, *1–4*, 691 (1993).
- [12] D. Dobrev, J. Vetter, N. Angert, R. Neumann. *Appl. Phys. A* **72**, 729 (2001).
- [13] D. Borissov, S. Isik-Uppenkamp, M. Rohwerder. *J. Phys. Chem. C* **113**, 8, 3133 (2009).
- [14] X.Y. Zhang, G.H. Wen, Y.F. Chan, R.K. Zheng, X.X. Zhang, N. Wang. *Appl. Phys. Lett.* **83**, *16*, 3341 (2003).
- [15] Y.L. Sun, Y. Dai, L.Q. Zhou, W. Chen. *Solid State Phenom.* **121–123**, 3, 17 (2007).
- [16] J. Verbeeck, O.I. Lebedev, G.V. Tendeloo, L. Cagnon, C. Bougerol, G. Tourillon. *J. Electrochem. Soc.* **150**, *10*, 468 (2003).
- [17] G. Tourillon, L. Pontonnier, J.P. Levy, V. Langlais. *Electrochem. Solid State Lett.* **3**, *1*, 20 (2000).
- [18] J.M. Baik, M. Schierhorn, M. Moskovits. *J. Phys. Chem. C* **112**, 7, 2252 (2008).
- [19] V. Haehnel, S. Fähler, P. Schaaf, M. Migliorini, C. Mickel, L. Schultz, H. Schlörf. *Acta Mater.* **58**, 7, 2330 (2010).
- [20] Y. Peng, H.L. Zhang, S.L. Pan, H.L. Lia. *J. Appl. Phys.* **87**, *10*, 7405 (2000).
- [21] L. Menon, M. Zheng, H. Zeng, S. Bandyopadhyay, D.J. Sellmyer. *J. Electron. Mater.* **29**, 5, 510 (2000).
- [22] К.В. Фролов, Д.Л. Загорский, И.С. Любутич, М.А. Чуев, И.В. Перунов, С.А. Бедин, А.А. Ломов, В.В. Артемов, С. Н. Сульянов. *Письма в ЖЭТФ* **105**, 5, 297 (2017).
- [23] К.В. Фролов, Д.Л. Загорский, И.С. Любутич, В.В. Коротков, С.А. Бедин, С.Н. Сульянов, В.В. Артёмов, Б.В. Мчедлишвили. *Письма в ЖЭТФ* **99**, *10*, 656 (2014).
- [24] Д.Л. Загорский, К.В. Фролов, С.А. Бедин, И.В. Перунов, М.А. Чуев, А.А. Ломов, И.М. Долуденко. *ФТТ* **60**, *11*, 2075 (2018).
- [25] И.М. Долуденко, Д.Л. Загорский, К.В. Фролов, И.В. Перунов, М.А. Чуев, В.М. Каневский, Н.С. Ерохина, С.А. Бедин. *ФТТ* **62**, 9, 1474 (2020).
- [26] K.V. Frolov, M.A. Chuev, I.S. Lyubutin, D.L. Zagorskii, S.A. Bedin, I.V. Perunov, A.A. Lomov, V.V. Artemov, D.N. Khmelenin, S.N. Sulyanov, I.M. Doludenko. *J. Magn. Mater.* **489**, 165415 (2019).
- [27] <https://ritverc.com/en/products/sources-scientific-application/mossbauer-sources/57co>
- [28] <https://ritverc.com/en/products/sources-scientific-application/mossbauer-sources/reference-absorbers>
- [29] M.A. Chuev. *Dokl. Phys.* **56**, 318 (2011).
- [30] M.A. Chuev, V.M. Cherepanov, M.A. Polikarpov. *JETP Lett.* **92**, *1*, 21 (2010).
- [31] P. Gülich, E. Bill, A.X. Trautwein. *Mössbauer Spectroscopy and Transition Metal Chemistry: Fundamentals and Applications*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (2011). 568 p.
- [32] I.S. Jacobs, C.P. Bean. *Phys. Rev.* **100**, 1060 (1955).
- [33] Y. Peng, H.L. Zhang, S.L. Pan, H.L. Li. *J. Appl. Phys.* **87**, *10*, 7405 (2000).
- [34] Z. Chen, Q. Zhan, D. Xue, F. Li, X. Zhou, H. Kunkel, G. Williams. *J. Phys. Condens. Matter* **14**, 3, 613 (2002).
- [35] M.A. Chuev, V.M. Cherepanov, M.A. Polikarpov. *JETP Lett.* **92**, *1*, 21 (2010).
- [36] E.C. Stoner, E.P. Wohlfarth. *Philos. Trans. R. Soc. A* **240**, 599 (1948).
- [37] A.M. Afanas'ev, M.A. Chuev, J. Hesse. *Exp. Theor. Phys.* **89**, 533 (1999).
- [38] M.A. Chuev, J. Hesse. *J. Phys. Condens. Matter* **19**, 506201 (2007).

Редактор Т.Н. Василевская