

Особенности заполнения пор трековых мембран при синтезе нанопроволок из сплава FeNi

И. М. Долуденко

Методом матричного синтеза получены нанопроволоки из сплава Fe – Ni с элементным составом приближенным к пермаллою — 20 масс. % железа и 80 масс. % никеля. В качестве матрицы использовали трековые мембраны из полиэтилентерефталата с порами диаметром 100 нм. Перед осаждением матрицу подготавливали специальным образом, для создания сплошного контакта на дне поры. Заполнение пор матрицы металлами проводили методом электрохимического осаждения. Исследована кинетика роста нанопроволок, получена зависимость длины нанопроволок от времени осаждения. Изучение морфологии и геометрии получаемых нанопроволок проводили методом растровой электронной микроскопии. Показано, что скорость роста на различных этапах заполнения пор матрицы различна, и она меняется нелинейно. Рассчитаны показатели выхода по току на различных этапах заполнения матрицы, изменения данного показателя совпадают с изменением скорости роста. Предложены объяснения нелинейности скорости роста. Методом линейной интерполяции выведено уравнение описывающее зависимость длины средних нанопроволок от времени осаждения.

Ключевые слова: матричный синтез, трековые мембраны, электрохимическое осаждение, нанопроволоки, кинетика роста.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-8-74-80

Введение

В настоящее время значительный интерес представляют разработка методов получения и исследование структурных особенностей и свойств наноструктур различных типов. Одномерные наноструктуры — нанопроволоки (НП, наностержни, нанонити) обладают комбинацией уникальных свойств [1 – 3]. Распространённый способ получения таких материалов — матричный синтез [4]. Суть метода состоит в заполнении требуемым веществом пор представляющих собой сквозные отверстия правильной формы в специально изготовленной матрице. В качестве матрицы наиболее часто используют пористый оксид алюминия (ПОА) [5] и трековые мембраны (ТМ) [6]. Эти два типа матриц обладают различными свойствами. Например, при использовании ПОА удается получать высокую плотность пор с однородным их распределением, однако возможность изменять одновременно плотность пор и их диаметр сильно ограничена. Кроме того, в работе [7] показано, что при использовании матриц из ПОА наблюдает-

ся нежелательный эффект — не удается получить все поры со строго цилиндрической геометрией. Несмотря на хаотическое расположение пор в трековой мембране и возможность их наложения, полимерные трековые мембраны отличаются гибкостью и возможностью целенаправленно изменять форму пор; кроме того, в трековых мембранах можно независимо варьировать плотность пор и их диаметр в широких пределах.

В настоящей работе в качестве матриц использовали ТМ, в поры которых гальваническим способом осаждали железо и никель, причем по соотношению элементов осадок соответствует составу пермаллоя.

Нанопроволоки из такого рода структур интересны тем, что могут быть в перспективе использованы в медицине в качестве компонентов источника и/или приемника электромагнитных волн, мемристоров, элементов гибкой микроэлектроники и др.

НП из чистых металлов были получены уже в первых работах по матричному синтезу. Так, реплики из кобальта и никеля были созданы (по-видимому, впервые) в порах оксидной матрицы в

[8]; было предложено использовать такие структуры для магнитной записи с высокой плотностью. Впоследствии были отработаны приёмы получения НП более сложного состава, так называемые “сплавы” и “слоевые” НП. Возможность получения такого разнообразия структур является отличительной особенностью электрохимического осаждения [9 – 11].

Вряде работ проведено сравнение НП из Fe – Ni и Fe – Co. В [12] изучены магнитные свойства двух типов сплавов и показана их зависимость от соотношения элементов в НП и их “упорядочения”. Кроме того, были описаны условия, при которых из этих элементов можно синтезировать слоевые НП. Получение НП из Fe – Co и Fe – Ni в порах ПОА и их сравнение проведено в [13]. Показано различие свойств при электроосаждении двух типов НП, а также влияние термообработки на структуру. Обнаружено, что коэрцитивная сила (H_c) в Fe – Ni НП возрастает с увеличением их длины, в то время как в НП из Fe – Co наблюдается обратный эффект. Отжиг не влияет на магнитные свойства Fe – Ni образцов, в то время как в Fe – Co образцах обнаружено значительное увеличение коэрцитивной силы. Отметим, что в подавляющем большинстве опубликованных работ в качестве матрицы использовали ПОА. Вместе с тем, применение трековых мембран позволило бы дополнительно варьировать форму и размеры пор и получать элементы для так называемой “гибкой электроники”. В работах [14 – 16] были изучены массивы НП из FeCo и FeNi, полученные в порах полимерных матриц из полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Установлены закономерности роста при двухэлектродной схеме подключения и показано влияние диаметра пор. В данных работах применяли метод мёссбауэровской спектроскопии, с помощью которого была выявлена ориентационная зависимость вектора намагниченности массива НП, причем для образцов с порами малого диаметра вектор намагниченности направлен вдоль оси НП. При увеличении диаметра пор и/или при уменьшении ростового напряжения параметры мёссбауэровских спектров НП примерно соответствовали параметрам объёмных материалов. Этот же метод был использован для косвенного определения концентрации металлов в НП. Были изучены магнитные свойства НП и показано, что при уменьшении диаметров пор и увеличении скорости роста НП увеличивается H_c и остаточная намагниченность. В [17] выявлен эффект аномального со-осаждения железа, кроме того, было показано, что соотношение концентраций металлов может изменяться по длине НП.

Однако детальные исследования этих вопросов в данной работе не были проведены.

Проведенный анализ литературных данных показал, в частности, что практически не рассмотрены проблема точного контроля заполнения пор трековых мембран и кинетика их заполнения.

Цель настоящей работы — исследование скорости роста НП, выхода по току на различных этапах заполнения матрицы. Данное исследование в дальнейшем позволит получать НП с точно калиброванным размером.

Материалы и методы исследования

Исследуемые в работе НП были получены с использованием полимерных матриц (трековых мембран, ядерных фильтров) со сквозными порами цилиндрического сечения. Были использованы “промышленные” трековые мембраны (производства ОИЯИ, г. Дубна) со следующими параметрами: диаметр пор — 100 нм; толщина пленки — 12 мкм; плотность пор $\approx 1,2 \cdot 10^9$ см⁻². Для создания проводящего слоя поверхность мембраны металлизировали в два этапа. На первом этапе методом термического распыления в вакууме на установке ВУП-4 наносили тонкий аморфный слой меди толщиной 50 нм, причем этот слой не перекрывал поры матрицы полностью. Для полного перекрытия пор и создания сплошного контактного слоя на следующем этапе напыленный слой доосаждали методом гальванического осаждения меди в гальваностатическом режиме при плотности тока 71 А/см² в течение 30 мин, толщина такого слоя составила 4 – 5 мкм.

Для заполнения пор матрицы (получения НП) получен электролит следующего состава: NiSO₄·7H₂O — 16 г/л; NiCl₂·6H₂O — 40 г/л; FeSO₄·7H₂O — 8 г/л. Также применяли следующие добавки в электролит: борная кислота H₃BO₃ — 25 г/л (поддержание pH = 2,4), лаурилсульфат натрия — 1 г/л (для увеличения смачиваемости пор матрицы) и аскорбиновая кислота — 1 г/л (для предотвращения перехода двухвалентных ионов железа в трехвалентное состояние).

Процесс вели в специальной гальванической ячейке. Площадь образца трековой мембраны, в которую проводили осаждение, составляла 1,8 см²; таким образом, площадь рабочего электрода (поверхностная площадь пор матрицы) была равно 0,17 см². Использовали анод из железа. В качестве источника тока применяли потенциостат — гальваностат Elins P-2X. Процесс проводили при постоянном потенциале (потенциостатический режим),

потенциал осаждения — 1,5 В. В предыдущей работе [18] нами было проведено подробное исследование зависимостей структуры НП из сплавов Fe – Ni и Fe – Co от состава электролита и потенциала осаждения. Было показано, что используемый режим осаждения позволяет получать НП, состоящие из твердого раствора Fe – Ni на основе решетки Ni с соотношением элементов Fe₂₄ – Ni₇₆.

Образцы исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе JEOL JSM 6000 plus. Исследование проводили в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Эксперимент и результаты

В работе проводили заполнение матриц при разном времени осаждения. Осаждение осуществляли в потенциостатическом режиме при потенциале 1,5 В; использовали железный анод для компенсации ионов железа в электролите. На первом этапе для определения времени заполнения матрицы записывали хроноамперограмму (характеристику гальванического процесса) для всего процесса. Результаты представлены на рис. 1.

Видно, что процесс заполнения матрицы сплавом Fe – Ni можно разделить на 5 этапов: 1-й этап — процесс начала роста нанопроволок, при этом падение тока происходило в соответствии с законом Коттрелля [19]; 2-й этап — заполнение пор матрицы и дальнейшее развитие диффузионного слоя; 3-й этап — частичный выход осаждаемого металла на поверхность матрицы; 4-й этап — полное заполнение матрицы; 5-й этап — образование сплошного слоя металла на поверхности матрицы.

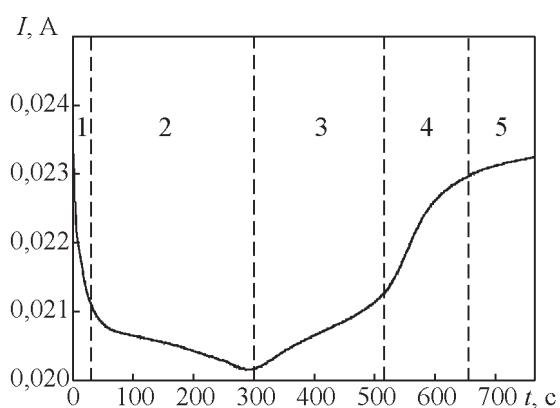
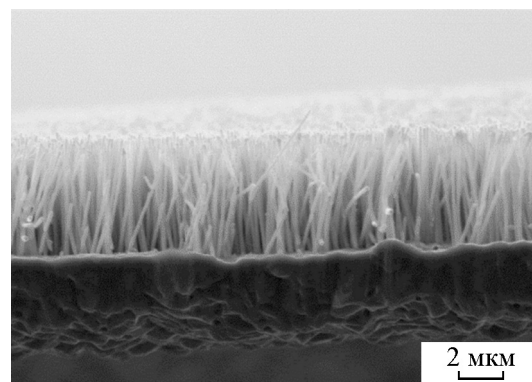


Рис. 1. Хроноамперограмма процесса заполнения матрицы.

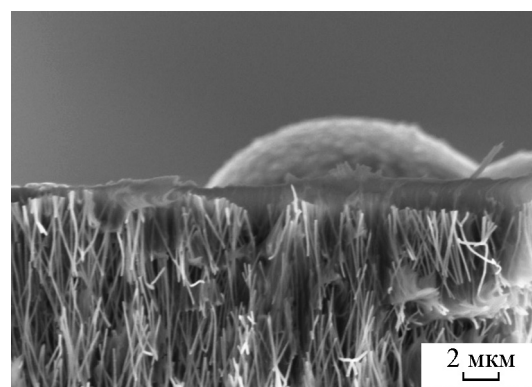
Fig.1. Current versus time of the matrix filling process.

Для исследования кинетики заполнения пор матрицы были получены две линейки образцов с разным временем осаждения, без перероста и с переростом — частичным выходом осаждаемого металла за пределы матрицы с образованием “шляпки” [20]. Далее образцы помещали на специальный держатель, что позволяло наблюдать образцы с торца, и исследовали методом РЭМ. Для проведения микроскопических исследований, с образцов, полученных без переростов, удаляли матрицу в растворе концентрированного NaOH (240 г/л), а образцы с переростом исследовали на сколе матрицы. РЭМ изображения полученных образцов приведены на рис. 2.

Исследование полученных образцов показало, что НП практически полностью повторяют форму пор, при этом их диаметр больше ожидаемого диаметра пор матрицы на 10 – 15 %, что связано с окислением НП на воздухе. Поры и, как следствие, НП расположены под небольшим углом к нормали к поверхности матрицы, поэтому в работе



a



b

Рис. 2. РЭМ изображения образцов НП: a — без матрицы (время роста — 300 с), b — на сколе матрицы (время роста — 600 с).

Fig. 2. Samples of nano-wires: a — without matrix, growth time 300 s; b — in matrix cleavage, growth time 600 s.

оценивали средние значения проекции НП на данную нормаль. Помимо этого, во время осаждения проводили запись хроноамперограмм заполнения матрицы. По этим данным определяли протекший заряд, который напрямую связан, в соответствии с законом Фарадея, с количеством осаждённого вещества и соответственно, со средней длиной полученных НП. В результате была определена скорость роста нанопроволок.

В работе также рассчитывали выход по току при осаждении — величину протекшего заряда в процентах, идущего на осаждение металла, а не на побочные реакции. Расчет проводили по следующей формуле:

$$B_Q = \frac{\pi r^2 H N S \rho F z}{Q_f (M_{Fe} C_{Fe} + M_{Ni} C_{Ni})},$$

где Q_f — фактически протекший заряд, Кл; r — радиус поры, см; H — длина НП, см; N — плотность пор, см⁻²; S — площадь образца, см²; ρ — плотность материала, рассчитанная из параметра решетки, г/см³; F — постоянная Фарадея, Кл·моль⁻¹; z — валентное число ионов; M_{Fe} , M_{Ni} — атомные массы ионов; C_{Fe} , C_{Ni} — концентрации металлов в осадке, масс. %.

Было показано, что выход по току на разных этапах осаждения колеблется, его среднее значение составляет 48,4 %. Основной фактор снижения выхода по току — это побочная реакция на выделение водорода. Одним из следствий этого процесса является наблюдаемая неоднородность роста НП: часть НП блокируется газовыми пузырьками, что замедляет их рост. Одновременно с этим, “незаблокированные” НП оказываются в “преимущественном” положении, и их рост ускоряется за счёт замедления роста заблокированных НП. Из-за этого процесса локальные (единичные) переросты появляются уже при заполнении матрицы на 60 %, а с дальнейшим осаждением их количество увеличивается.

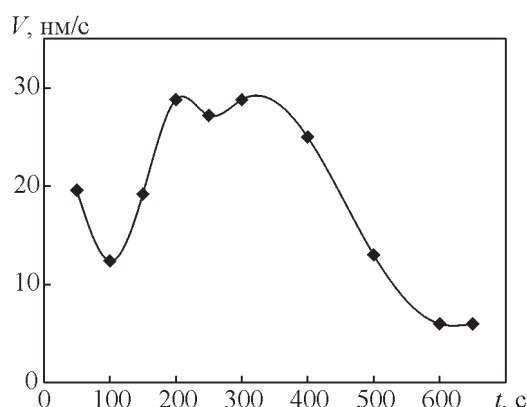


Рис. 3. Временная зависимость скорости роста НП на различных этапах заполнения матрицы.

Fig. 3. Time dependence of the nano-wires growth rate at different stages of matrix filling.

Результаты РЭМ исследования длины НП и расчетов протекшего заряда, скорости роста и выхода по току представлены в табл. 1.

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что как скорость роста, так и набор заряда нелинейно зависят от времени. Изменения показателя выхода по току соответствуют изменениям скорости роста. Для наглядности полученных результатов на рис. 3 представлен график временной зависимости скорости роста на отдельных этапах заполнения матрицы.

Можно предположить, что большая скорость роста на первом участке (0 – 50 с) объясняется скачком тока в начале осаждения и насыщенностью электролита вблизи рабочей зоны. В промежутке времени от 50 до 100 с происходит резкое обеднение электролита вблизи рабочей зоны. Последующее линейное увеличение скорости роста (100 – 200 с) связано с ростом диффузионного слоя до выхода его на поверхность матрицы. Далее образуется общий диффузионный слой, который

Таблица 1

Результаты расчетов протекшего заряда, скорости роста и выхода по току

Table 1

Calculation results of the leaked charge, growth rate, and current efficiency

| Показатели | Время роста, с | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 |
| Протекший заряд, Кл | 0,8 | 2,1 | 2,6 | 4,1 | 4,3 | 6 | 7,1 | 9,4 | 11,4 | 12,4 |
| Длина НП, мкм | 0,98 | 1,6 | 2,56 | 4 | 5,36 | 6,8 | 9,3 | 10,6 | 11,2 | 11,5 |
| Скорость роста, нм/с | 19,6 | 12,4 | 19,2 | 28,8 | 27,2 | 28,8 | 25 | 13 | 6 | 6 |
| Выход по току, % | 58,7 | 14 | 46 | 46,3 | 59,3 | 53,4 | 62,0 | 53,3 | 46,5 | 44 |

охватывает все поры, и скорость роста стабилизируется. Её значение остается постоянным вплоть до образования локальных переростов с появлением на поверхности матрицы “шляпок”. При продолжении процесса осаждение преимущественно идет на “шляпках” за счет их большей площади и меньшего расстояния до анода: в результате скорость роста НП в порах матрицы снижается.

Используя полученные данные, методом интерполяции была определена временная зависимость средней длины НП до момента перероста:

$$H = 4 \cdot 10^{-9} t^3 + 3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0128 t,$$

где t — время роста, с; H — длина НП, мкм.

Данная расчетная зависимость была подтверждена экспериментально.

Выводы

Исследована кинетика роста нанопроволок из сплава $Fe_{24} - Ni_{76}$, определены основные этапы роста.

Показано, что скорость роста на различных этапах заполнения матрицы меняется нелинейно. Сделано предположение, что это связано с диффузией ионов металлов в ограниченном объеме поры, приводящей к образованию диффузионного слоя и, в конечном итоге, стабилизации скорости роста НП.

По экспериментальным данным получено уравнение, связывающее длину растущей НП и время осаждения НП. Рассчитанный выход по току при осаждении НП составил 48,4 %.

Работа частично выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

Растровую электронную микроскопию проводили на оборудовании ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

Литература

1. Анищик В.М. Под ред. В.Борисенко, И. Толочко. Наноматериалы и нанотехнологии, Минск: Изд. БГУ, 2008, 375 с.
2. Борисенко В.Е., Данилюк А.Л., Мигас Д.Б. Спинтроника. М.: Лаборатория знаний, 2017, 230 с.
3. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Под ред. Ю.Д. Третьякова. Функциональные наноматериалы. М.: Физматлит, 2010, 456 с.
4. Martin C.R. Nanomaterials: A membrane-based synthetic approach, Science, 1994, vol. 23, no. 266, pp. 1961 – 1966.
5. Masuda H., Fukuda K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. Science, 1995, vol. 268, no 5216, pp. 1466 – 1468.
6. Фролов К.В., Загорский Д.Л., Любутин И.С., Коротков В.В., Бедин С.А., Сульянов С.Н., Артемов В.В., Мчедлишвили Б.В. Синтез, фазовый состав и магнитные свойства нанопроволок железа, полученных в порах полимерных трековых мембран. Письма в ЖЭТФ, 2014, т. 99, вып. 10, с. 656 – 663.
7. Petukhov D.I., Napolskii K.S., Eliseev A.A. Permeability of anodic alumina membranes with branched channels. Nanotechnology, 2012, vol. 23, art. 335601.
8. Kawai S., Ueda R.J. Magnetic properties of anodic oxide coatings on aluminum containing electrodeposited Co and Co – Ni. J. Electrochemical Society, 1975, vol. 122, no. 1, pp. 32 – 36.
9. Lupu N. Electrodeposited nanowires and their applications. InTech, Croatia 2010, 228 p.
10. Vazquez M. Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications. Woodhead Publ., 2015, 847 p.
11. Давыдов А.А., Волгин В.М. Темплатное электроосаждение металлов (обзор), Электрохимия, 2016, т. 52, № 9, с. 905 – 933.
12. Alonso J., Khurshid H., Sankar V., Nemati Z., Phan M.H., Garayo E., García J.A., Srikanth H. FeCo nanowires with enhanced heating powers and controllable dimensions for magnetic hyperthermia. Journals Applied Physics, 2015, vol. 117, no. 17, pp. 17D113 – 17D113-4.
13. Steven S.-L. Zhang Z., Zhou Y., Li D., Heinonen O., Kalska-Szostko B., Klekotka U., Olszewski W. Mode coupling in spin torque oscillators. Journal Magnetism and Magnetic Materials, 2019, vol. 484, pp. 227 – 242.
14. Zhou S., Wang C., Zheng C., Liu Y. Manipulating skyrmions in synthetic antiferromagnetic nanowires by magnetic field gradients. Journal Magnetism and Magnetic Materials, 2020, vol. 493, pp. 165740 – 165743.
15. Фролов К.В., Загорский Д.Л., Любутин И.С., Чуев М.А., Перунов И.В., Бедин С.А., Ломов А.А., Артемов В.В., Сульянов С.Н. Магнитные и структурные свойства нанопроволок Fe – Co, полученных методом матричного синтеза в порах трековых мембран. Письма в ЖЭТФ, 2017, т.105, вып. 5, с. 297 – 304.
16. Загорский Д.Л., Фролов К.В., Бедин С.А., Перунов И.В., Чуев М.А., Ломов А.А., Долуденко И.М. Структура и магнитные свойства нанопроволок из металлов группы железа, полученных методом матричного синтеза. Физика твердого тела, 2018, т. 60, вып. 11, с. 2075 – 2087.
17. Frolov K.V., Chuev M.A., Lyubutin I.S., Zagorskii D.L., Bedin S.A., Perunov I.V., Lomov A.A., Artemov V.V., Khmelenin D.N., Sulyanov S.N., Doludenko I.M. Structural and magnetic properties of Ni-Fe nanowires in the pores of polymer track membranes. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, vol. 489, art. 165415.

18. Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Фролов К.В., Перунов И.В., Чуев М.А., Каневский В.М., Ерохина Н.С., Бедин С.А. Нанопроволоки из сплавов FeNi и FeCo: синтез, структура и мессбауэровские измерения. *Физика твердого тела*, 2020, т. 62, вып. 9, с. 1474 – 1481.
19. Valizadeh S., George J.M., Leisner P., Hultman L. Electrochemical deposition of Co nanowire arrays. Quantitative consideration of concentration profile. *Electrochim. Acta.*, 2001, vol. 47, pp. 865 – 874.
20. Shin S., Al-Housseiny T.T., Kim B.S., Cho H.H., Stone H.A. The race of nanowires: Morphological instabilities and a control strategy. *Nano Lett.*, 2014, vol. 14, pp. 4395 – 4399.
12. Alonso J., Khurshid H., Sankar V., Nemati Z., Phan M.H., Garayo E., García J.A., Srikanth H. FeCo nanowires with enhanced heating powers and controllable dimensions for magnetic hyperthermia. *Journals Applied Physics*, 2015, vol. 117, no. 17, pp. 17D113 – 17D113-4.
13. Steven S.-L. Zhang Z., Zhou Y., Li D., Heinonen O., Kalska-Szostko B., Klekotka U., Olszewski W. Mode coupling in spin torque oscillators. *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 484, pp. 227 – 242.
14. Zhou S., Wang C., Zheng C., Liu Y. Manipulating skyrmions in synthetic antiferromagnetic nanowires by magnetic field gradients. *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 493, pp. 165740 – 165743.
15. Frolov K.V., Zagorskiy D.L., Lyubutin I.S., Chuev M.A., Perunov I.V., Bedin S.A., Lomov A.A., Artemov V.V., Sulyanov S.N. Magnitnie i strukturnie svoistva nanoprovolok Fe-Co, poluchennih metodom matrichnogo sinteza v porah trekovih membran [Magnetic and structural properties of Fe-Co nanowires obtained by matrix synthesis in the pores of track membranes]. *Pisma v ZETF — JETF leters*, 2017, vol. 105, no. 5, pp. 297 – 304.

References

1. Anishik V.M. Ed. Borisenko V., Tolochko I. *Nanomateriali i nanotehnologii* [Nanomaterials and nanotechnology]. Minsk, Publ. BSU, 2008, 375 p.
2. Borisenko V.E., Danilyuk A.L., Migas D.B. *Spintronica* [Spintronics]. Moscow, Knowledge laboratory, 2017, 230 p.
3. Eliseev A.A., Lukashin A.V. ed. Tretyakov Yu.D. *Funkcionalnie materialy* [Functional nanomaterials]. Moscow, Fizmatlit, 2010, 456 p.
4. Martin C.R. Nanomaterials: A membrane-based synthetic approach, *Science*, 1994, vol. 23, no. 266, pp. 1961 – 1966.
5. Masuda H., Fukuda K. ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *Science*, 1995, vol. 268, no 5216, pp. 1466 – 1468.
6. Frolov K.V., Zagorskiy D.L., Lyubutin I.S., Korotkov V.V., Bedin S.A., Sulyanov S.N., Artemov V.V., Mchedlishvili B.V. Sintez, fazovyi sostav i magnitnie svoistva nanoprovolok zeleza, poluchennih v porah polimernih trekovih membrane [Synthesis, phase composition and magnetic properties of iron nanowires obtained in the pores of polymer track membranes]. *Pisma v ZETF — JETF letters*, 2014, vol. 99, no. 10, pp. 656 – 663.
7. Petukhov D.I., Napolskii K.S., Eliseev A.A. Permeability of anodic alumina membranes with branched channels. *Nanotechnology*, 2012, vol. 23, art. 335601.
8. Kawai S., Ueda R.J. Magnetic properties of anodic oxide coatings on aluminum containing electrodeposited Co and Co – Ni. *J. Electrochemical Society*, 1975, vol. 122, no. 1, pp. 32 – 36.
9. Lupu N. Electrodeposited nanowires and their applications. *InTech*, Croatia 2010, 228 p.
10. Vazquez M. Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications. *Woodhead Publ.*, 2015, 847 p.
11. Davydov A.D., Volgin V.M. Templatnoe elektroosazhdenie metallov [Template electrodeposition of metals. Review]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2016, vol. 52, no. 9, pp. 806 – 831.
16. Zagorskiy D.L., Frolov K.V., Bedin S.A., Perunov I.V., Chuev M.A., Lomov A.A., Doludenko I.M. Struktura i magnitnie svoistvananoprovolok is metalov gruppi zeleza, poluchennih metodom matrichnogo sinteza [Structure and magnetic properties of nanowires of iron group metals produced by matrix synthesis]. *Fizika Tverdogo Tela — Physics of the Solid State*, 2018, vol. 60, no. 11, pp. 2115 – 2126.
17. Frolov K.V., Chuev M.A., Lyubutin I.S., Zagorskii D.L., Bedin S.A., Perunov I.V., Lomov A.A., Artemov V.V., Khmelenin D.N., Sulyanov S.N., Doludenko I.M. Structural and magnetic properties of Ni – Fe nanowires in the pores of polymer track membranes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 489, art. 165415.
18. Doludenko I.M., Zagorsky D.L., Frolov K.V., Perunov I.V., Chuev M.A., Kanevsky V.M., Erokhina N.C., Bedin S.A. Nanoprovoloki iz spлавov FeNi i FeCo: sintez, struktura i messbaurovskie izmerenii [Nanowires of FeNi and FeCo alloys: synthesis, structure and mössbauer spectra]. *Fizika Tverdogo Tela — Physics of the Solid State*, vol. 62, iss. 9, pp. 1639 – 1646.
19. Valizadeh S., George J.M., Leisner P., Hultman L. Electrochemical deposition of Co nanowire arrays. Quantitative consideration of concentration profile, *Electrochim. Acta.*, 2001, vol. 47, pp. 865 – 874.
20. Shin S., Al-Housseiny T.T., Kim B.S., Cho H.H., Stone H.A. The race of nanowires: Morphological instabilities and a control strategy. *Nano Lett.*, 2014, vol. 14, pp. 4395 – 4399.

Статья поступила в редакцию — 27.01.2021 г.
 после доработки — 17.02.2021 г.
 принята к публикации — 18.02.2021 г.

Долуденко Илья Михайлович—Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (101000, Москва, Мясницкая, 20), аспирант; ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН (119333, Москва, Ленинский проспект, 59), младший научный сотрудник, специализируется в области матричного синтеза, растровой электронной микроскопии. E-mail: *doludenko.i@yandex.ru*.

Features of pore filling of track membranes in synthesis of nanowires of FeNi alloy

I. M. Doludenko

In this work, by the method of matrix synthesis, nanowires were obtained from Fe – Ni alloy with an elemental composition close to permalloy, namely, 20 % iron and 80 % nickel. As a matrix, we used track membranes made of polyethylene terephthalate with pores 100 nm in diameter. Before deposition, the matrix was prepared in a special way to create a continuous contact at the bottom of the pore. The pores of the matrix were filled with metals by electrochemical deposition. The aim of this work was to study the kinetics of nanowire growth and to establish the dependence of the nanowire length on the deposition time. The morphology and geometry of the resulting nanowires were investigated by scanning electron microscopy. It was shown that the growth rate at different stages of filling the pores of the matrix is different, and it changes nonlinearly. The indicators of the current efficiency at various stages of filling the matrix are calculated, the changes in this indicator coincide with the change in the growth rate. Explanations for the nonlinearity of the growth rate are proposed. An equation describing the dependence of the length of medium nanowires on the deposition time is derived by the method of linear interpolation.

Keywords: matrix synthesis, track etched membranes, electrochemical deposition, nanowires, growth kinetics.

Doludenko Ilya — HSE University (Moscow, 101000, Myasnitskaya, 20), graduate student; FSRC “Crystallography and Photonics” RAS (119333, Moscow, Leninskiy Prospek, 59), junior researcher, specialist in matrix synthesis, scanning electron microscopy. E-mail: *doludenko.i@yandex.ru*.