

УДК 53.043

Ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран для элементов гибкой электроники

Канюков Е.Ю.¹, Шумская Е.Е.¹, Кутузов М.Д.¹, Боргеков Д.Б.^{2,3}, Кенжина И.Е.^{2,3}, Козловский А.Л.^{2,3}, Здоровец М.В.^{2,3}

¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

²Филиал Института ядерной физики, Алматы, Казахстан,
пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

Поступила 18.07.2017

Принята к печати 22.08.2017

В работе рассмотрены особенности шаблонного синтеза нанотрубок из ферромагнитных металлов (Fe, Co, Ni) в порах трековых мембран. Целью работы являлось изучение их основных структурных и магнитных параметров и демонстрация потенциала применения в элементах гибкой электроники.

При помощи электрохимического осаждения в порах полиэтилентерефталатовых трековых мембран сформированы ферромагнитные нанотрубки с диаметром 110 нм и аспектным соотношением 100. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены морфологические особенности полученных наноструктур, методом энергодисперсионного анализа изучен элементный состав. С использованием рентгеноструктурного анализа установлены основные параметры кристаллической структуры: тип кристаллической решетки, параметр элементарной ячейки и средний размер кристаллитов. Методом вибрационной магнитометрии изучены магнитные свойства.

Показано, что вне зависимости от типа ферромагнитного металла при выбранных условиях синтеза нанотрубки имеют одинаковые характеристические размеры – длину, диаметр и толщину стенки. Полученные нанотрубки состоят соответственно из железа, из кобальта и из никеля и не содержат оксидных примесей. Нанотрубки имеют поликристаллическую структуру стенок с объемно-центрированной кубической (железные), грани-центрированной кубической (кобальтовые и никелевые) кристаллической решеткой. По основным магнитным параметрам нанотрубки соответствуют группе магнитомягких материалов. Также установлено наличие магнитной анизотропии, которая обусловлена особенностями кристаллической структуры и формой наноструктур.

На основании анализа особенностей структурных и магнитных характеристик ферромагнитных нанотрубок, синтезированных в порах трековых мембран, предложены базовые принципы их использования при конструировании элементов гибкой электроники: наноконденсаторов, датчиков направления магнитного поля и магнитных элементов памяти.

Ключевые слова: ферромагнитные нанотрубки, шаблонный синтез, структура и магнитные свойства, гибкая электроника.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Адрес для переписки:

Канюков Е.Ю.
НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: Ka.egor@mail.ru

Address for correspondence:

Kaniukov E.Yu.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: Ka.egor@mail.ru

Для цитирования:

Канюков Е.Ю., Шумская Е.Е., Кутузов М.Д., Боргеков Д.Б., Кенжина И.Е., Козловский А.Л., Здоровец М.В.

Ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран для элементов гибкой электроники.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 214–221.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

For citation:

Kaniukov E.Yu., Shumskaya E.E., Kutuzau M.D., Borgekov D.B., Kenzhina I.E., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V.

[Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 214–221 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements

Kaniukov E.Yu.¹, Shumskaya E.E.¹, Kutuzau M.D.¹, Borgekov D.B.^{2,3}, Kenzhina I.E.^{2,3}, Kozlovskiy A.L.^{2,3}, Zdorovets M.V.^{2,3}

¹Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan,
Abylay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

³L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Abylay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

Received 18.07.2017

Accepted for publication 22.08.2017

Abstract

In the paper the template synthesis of ferromagnetic (Fe, Co, Ni) nanotubes in the pores of track membranes were studied. The aim of this work was determination of nanotubes basic structural and magnetic parameters and demonstration of the possibility of application in the flexible electronics elements.

By electrochemical deposition, ferromagnetic nanotubes with a diameter of 110 nm and an aspect ratio of 100 were formed in the pores of polyethylene terephthalate track membranes. The morphology of the obtained nanostructures were studied by scanning electron microscopy, the elemental composition was determined by the energy-dispersion analysis. Using the X-ray structural analysis, the main parameters of the crystal structure were established: lattice type, lattice parameter and average crystallite size. The magnetic properties were studied by the method of vibrational magnetometry.

It was shown that in the selected conditions of synthesis without reference to the type of ferromagnetic metals nanotubes had the same dimensions – length, diameter and wall thickness. The produced nanotubes consisted of iron, cobalt and nickel, respectively without oxides impurities. Nanotubes had a polycrystalline structure of walls with a body-centered cubic (iron), face-centered cubic (cobalt and nickel) crystal lattice. According to the main magnetic parameters, nanotubes belonged to a group of soft magnetic materials. Also, the presence of magnetic anisotropy, which is caused by the features of crystalline structure and shape of the nanostructures.

Based on the analysis of structural and magnetic characteristics of ferromagnetic nanotubes which were synthesized in the pores of track membranes, were proposed the main principles of their using in the elements' of flexible electronics constructing (magnetic field direction sensors and magnetic memory elements).

Keywords: ferromagnetic nanotubes; template synthesis; structure and magnetic properties, flexible electronics.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Адрес для переписки:

Каниюков Е.Ю.
НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: Ka.egor@mail.ru

Address for correspondence:

Kaniukov E.Yu.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: Ka.egor@mail.ru

Для цитирования:

Каниюков Е.Ю., Шумская Е.Е., Кутузав М.Д., Боржекков Д.Б., Кенжина И.Е., Козловский А.Л., Здоровец М.В.

Ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран для элементов гибкой электроники.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 214–221.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

For citation:

Kaniukov E.Yu., Shumskaya E.E., Kutuzau M.D., Borgekov D.B., Kenzhina I.E., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V.

[Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 214–221 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Введение

В настоящее время ведется активный поиск новых технологий, которые позволяют уменьшать размеры электронных приборов до нанометрового диапазона. В этой связи возрастает интерес к развитию недорогих и масштабируемых способов получения наноструктур и их массивов. Перспективным является метод шаблонного синтеза, в котором шаблоны изготавливаются с использованием технологии треков быстрых тяжелых ионов за счет формирования в различных материалах узких и протяженных областей радиационного повреждения (латентных треков) [1]. Такие области после селективного травления трансформируются в цилиндрические или конические поры с диаметром 10–1000 нм и длиной до сотен микрометров. Большая часть потенциальных применений технологии ионных треков связана с изготовлением сенсоров температуры, давления, потока жидкости, напряженности магнитного поля, влажности и т.д. [2]. Идея создания таких сенсоров отличается достаточно простым подходом: нанопоры в диэлектрическом слое заполняются чувствительным к определенному роду воздействиям материалом.

При использовании ионно-трековой технологии шаблоны могут представлять собой как жесткую матрицу (например, SiO_2/Si , PI/Si и др. [3, 4]), так и гибкую полимерную пленку. При использовании гибких шаблонов актуальной становится задача создания устройств «гибкой электроники», которая появилась в 1980-х годах и получила значительное распространение в последние годы благодаря развитию инструментальной базы и интенсивным междисциплинарным исследованиям в области химии, физики и материаловедения. Эта технология имеет потенциал для производства светоизлучающих диодов [5, 6], радиочастотных идентификационных меток и даже интегральных схем [7], которые будут дешевле и эффективнее, чем изготавливаемые в настоящее время на базе стандартной кремниевой технологии.

В настоящее время предлагаются решения для гибкой электроники на основании нанопроволок. Например, в работе [8] показана методика создания датчика давления на основании гибкой пленки с серебряными нанопроволоками, в работе [9] – концепция реализации дисплеев и тачскринов. Также предлагается гибкий полимерный электролитный топливный элемент с использованием высокоэластичных токоприемников для перколяционной сетки серебряных нанопроволок [10], но-

симые датчики магнитного поля [11], биосенсоры [12, 13] и др. Несмотря на большое количество работ, нацеленных на использование нанопроволок в устройствах гибкой электроники, применения металлических нанотрубок в таких устройствах не рассматривалось. Тем не менее нанотрубки за счет наличия внутри полого канала в сравнении с нанопроволоками могут иметь достаточно существенные преимущества для использования в устройствах гибкой электроники. К сожалению, объем информации о структуре и магнитных свойствах нанотрубок на сегодняшний день недостаточен, а работы по использованию нанотрубок при конструировании элементов гибкой электроники практически отсутствуют. В связи с этим целью данной работы являлось рассмотрение особенностей синтеза ферромагнитных нанотрубок из железа, кобальта и никеля в порах полиэтилентерефталатового ионно-трекового шаблона, а также изучение их структурных и магнитных свойств для определения потенциальной возможности применения в элементах гибкой электроники.

Методика

Существуют различные методы синтеза ферромагнитных нанотрубок: термический синтез, золь-гель, испарительно-конденсационный, химическое осаждение и метод шаблонного синтеза. Наиболее простым из представленного ряда является шаблонный синтез, который позволяет создавать наноструктуры с большим аспектным соотношением и подразумевает электрохимическое осаждение в поры различных матриц (шаблонов) [14–16]. В качестве шаблонов обычно используются анодированный оксид алюминия (ААО) [17, 18], мезопористый кремний [19], диоксид кремния [3, 20] или полимерные мембраны [5, 21]. Учитывая, что в настоящей работе рассматривается потенциальная возможность создания элементов гибкой электроники, в качестве шаблонов использовались полиэтилентерефталатовые (ПЭТФ) трековые мембраны толщиной 12 мкм с номинальным диаметром пор 110 нм и плотностью $1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Особенности получения таких шаблонов рассмотрены в работах [22, 23].

Электрохимическое осаждение проводилось в потенциостатическом режиме в двухэлектродной ячейке при напряжении 1,5 В. Катод представлял собой золотую пленку на задней поверхности ПЭТФ-шаблона толщиной 10 нм. Толщина катода была мала для перекрытия пор, но достаточна для образования кольца вокруг поры,

которое задавало рост полых нанотрубок [20]. В качестве электролитов использовались следующие растворы: для синтеза железных нанотрубок: $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ (180 г/л), $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ (5 г/л), H_3BO_3 (25 г/л), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (3 г/л); кобальтовых: $\text{CoSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ (120 г/л), H_3BO_3 (45 г/л), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (3 г/л); и никелевых: $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ (120 г/л), H_3BO_3 (3 г/л), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (1,5 г/л) при температуре 25 °С; рН электролита равнялся 3. Некоторые особенности создания ферромагнитных нанотрубок рассматривались нами в работах [14, 20, 21].

Структурные особенности определялись при помощи методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, *Hitachi TM3030*), энерго-дисперсионного анализа (ЭДА, *Bruker XFlash MIN SVE*) и рентгеноструктурного анализа (РСА, *Bruker D8 ADVANCE*). Контроль внутренних диаметров пор и оценка толщины стенок проводились методами газопроницаемости (*Sartocheck® 3 Plus 16290*). Магнитные характеристики нанотрубок из Fe, Co и Ni изучались на автоматизированном вибрационном магнитометре (*Cryogenic LTD*) в магнитных полях ± 3 Т при комнатной температуре.

Основная часть

Получение нанотрубок из железа, кобальта и никеля осуществлялось методом шаблонного синтеза включающего электрохимическое осаждение металлов в поры ПЭТФ-шаблона. Процесс обычно состоит из 4 стадий: зародышеобразования (I), активного роста нанотрубок (II), образования «крышек» на поверхности нанотрубок (III) и формирования непрерывной металлической пленки на поверхности шаблона (IV) [24, 25]. Непосредственное формирование нанотрубок происходит на первых двух этапах электроосаждения. Первая стадия соответствует началу заполнения пор шаблона, когда при введении электрического поля на кольцевом электроде в нижней части поры образуются зародыши металла, повторяющие форму электрода и задающие форму будущей нанотрубки. Одновременно происходит формирование зародышей в активных зонах на поверхности стенок пор (содержащих дефекты, оборванные связи и др.), образующихся при химической или физической активации (например, в процессе формирования пор в ионно-трековых мембранах) [26]. Интенсивное образование зародышей вызывает снижение концентрации ионов металла внутри поры.

На второй стадии происходит непосредственный рост нанотрубок внутри пор вплоть

до достижения поверхности ПЭТФ-мембран. Поскольку диффузия ионов в пору происходит достаточно медленно, рост нанотрубок осуществляется за счет последовательного наложения двумерных зародышей на поверхности кольцевого наконечника [27]. Чтобы ионы металла, участвующие в росте нанотрубок, могли достичь катода, им необходимо преодолеть обедненную область, т.е. через узкий канал поры попасть из области с высокой концентрацией в область с низкой. Учитывая, что скорость движения ионов к активной зоне задается условиями осаждения, увеличение как напряжения, так и температуры синтеза приводит к ускорению роста нанотрубок. При этом усиливается выделение газа, который скапливаясь во внутренней полости нанотрубок, блокирует доступ туда ионов металла [28], что способствует формированию осадка вблизи стенок пор. Соответственно, повышение напряжения и/или температуры электрохимического синтеза вызывает уменьшение толщины стенок нанотрубок, что и было показано в работе [20]. Стоит отметить, что уменьшая разность потенциалов и/или температуру синтеза, можно существенно снизить выделение водорода, благодаря чему можно добиться получения нанопроволок.

В работе для синтеза нанотрубок было выбрано напряжение 1,5 В, которое обеспечивало с одной стороны формирование полых формы наноструктур, а с другой – довольно высокую скорость процесса осаждения. Результаты синтеза ферромагнитных нанотрубок (Fe, Co и Ni) представлены на рисунке 1.

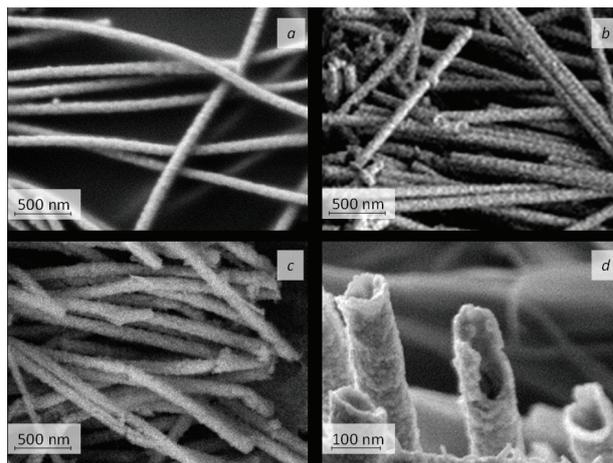


Рисунок 1 – СЭМ-изображения массива ферромагнитных нанотрубок после растворения ПЭТФ-шаблона: *a* – Fe; *b* – Co; *c* – Ni; *d* – сломы отдельных Ni нанотрубок

Figure 1 – SEM-images of array of ferromagnetic nanotubes after PET template dissolution: *a* – Fe; *b* – Co; *c* – Ni; *d* – crashed individual Ni nanotubes

СЭМ-изображения (рисунки 1a–c) показывают, что наноструктуры, полученные из разных металлов, имеют схожую морфологию. Синтезированные в порах ПЭТФ-шаблонов Fe, Co и Ni нанотрубки имеют наружный диаметр 110 ± 10 нм и длину $12 \pm 0,2$ мкм. Из изображений сломов наноструктур видно, что они имеют трубчатую форму (рисунок 1d). Методом газопроницаемости установлено, что внутренние диаметры нанотрубок составляют 70 ± 10 нм, что соответствует толщине стенок 20 ± 5 нм. Стоит отметить, что наличие полого канала внутри нанотрубок дает возможность синтеза внутри от-

дельной поры ионно-трековой мембраны многослойных элементов, в которых одна трубка будет помещена внутрь другой, что позволит реализовывать такие устройства, как наноконденсаторы и различные сенсоры.

Определение элементного состава нанотрубок проводилось с помощью ЭДА-спектроскопии (рисунок 2a–c). Исходя из результатов анализа спектров ЭДА, атомная металлическая композиция соответствовала 100 % Fe, 100 % Co и 100 % Ni без оксидов и примесей. Кристаллическая структура нанотрубок определялась на основе анализа спектров РСА (рисунок 2d–f).

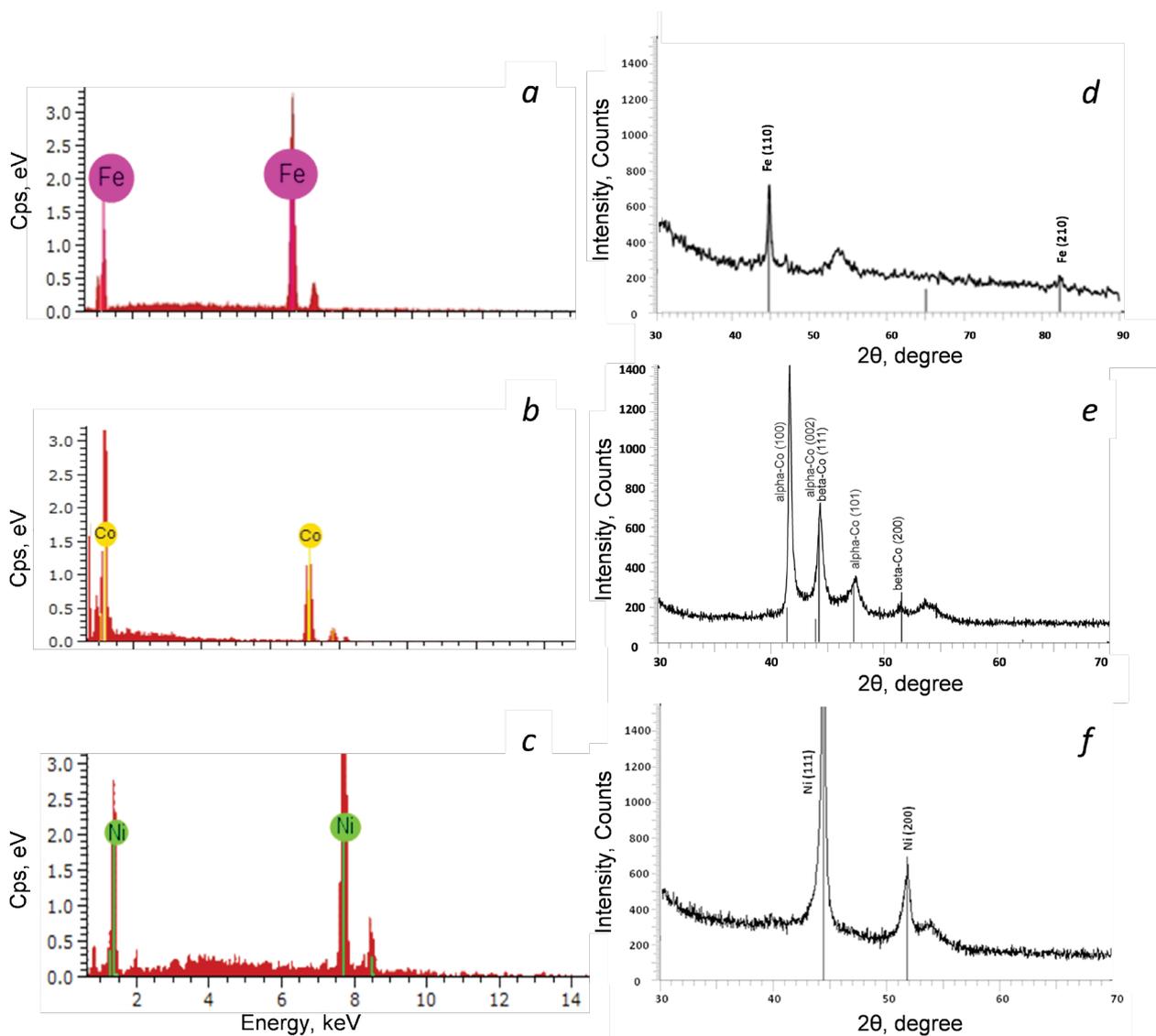


Рисунок 2 – ЭДА (a–c) и РСА (d–f) спектры нанотрубок: Fe (a, d); Co (b, e); Ni (c, f)

Figure 2 – EDA (a–c) spectra and XRD patterns (d–f) of nanotubes: Fe (a, d); Co (b, e); Ni (c, f)

Тип кристаллической решетки, параметр элементарной ячейки, а также средний размер кристаллитов синтезированных на-

нотрубок были определены согласно уравнениям, приведенным в [14], и приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры кристаллической структуры нанотрубок
The main structural parameters of nanotubes

Параметр Parametr	Fe	Co		Ni
		α -Co	β -Co	
Тип кристаллической решетки Type of crystal lattice	ОЦК BCC	ГЦК FCC	ГЦК FCC	ГЦК FCC
Параметр элементарной ячейки, Å Unit cell parameter, Å	2,8563	2,5007	3,5428	3,5223
Средний размер кристаллитов, нм Average crystallite size, nm	16,84	18,11	22,64	

Измерения зависимости намагниченности от магнитного поля $M(H)$ проводились для параллельной и перпендикулярной ориентации направлений поля относительно главной оси нанотрубок (рисунок 3). На основе петель гистерезиса определялись основные магнитные характеристики (H_c – коэрцитивность, M_r/M_s – коэффициент квадратичности петель гистерезиса), которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Основные магнитные характеристики ферромагнитных нанотрубок, снятые при различном направлении поля относительно главной оси нанотрубки
The main magnetic properties of ferromagnetic nanotubes, obtained in case of different field direction with regard to nanotube main axis

Материал нанотрубки Material of nanotubes	Параллельно нанотрубке Parallel to nanotube		Перпендикулярно нанотрубке Perpendicular to nanotube	
	H_c , Oe	M_r/M_s	H_c , Oe	M_r/M_s
Fe	560	0,46	200	0,41
Co	510	0,14	450	0,25
Ni	300	0,48	20	0,03

Исследования магнитных характеристик массивов нанотрубок из Fe, Co и Ni показывают, что для всех материалов петли гистерезиса имеют схожий характер. Основные магнитные параметры нанотрубок при различных направлениях магнитного поля относительно оси нанотрубок отличаются, что свидетельствует о наличии магнитной анизотропии в образцах. Из данных в таблице 2 видно, что коэффициент коэрцитивности и квадратичности петель для Fe и Ni при параллельной ориентации выше, чем значения для перпендикулярного направления поля. Для Co значения квадратичности для перпендикулярной ориентации превышают значения для параллельной. Наблю-

даемую в эксперименте анизотропию магнитных свойств можно объяснить либо кристаллической анизотропией, которая подтверждается данными РСА (рисунок 2d-f), либо анизотропией формы, обусловленной тем, что во внешнем магнитном поле нанотрубкам с высоким аспектным соотношением (~100) требуется более высокая энергия размагничивания при ориентации поля вдоль оси, чем в перпендикулярном направлении.

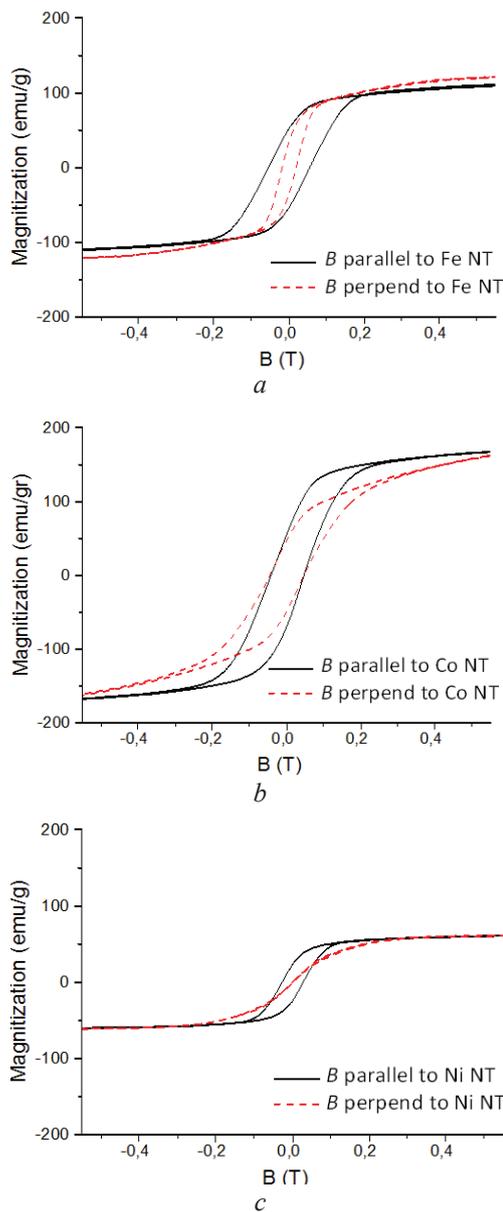


Рисунок 3 – Петли гистерезиса Fe (a); Co (b); Ni (c) нанотрубок, снятые при комнатной температуре. Черной сплошной линией изображены зависимости снятые при приложении поля параллельно главной оси нанотрубки, красной пунктирной – перпендикулярно
Figure 3 – Hysteresis loops of Fe (a); Co (b); Ni (c) nanotubes obtained at room temperature. Black continuous line shows the dependence obtained in case of the parallel to the main nanotube axis field, red dotted – perpendicular

Обнаруженная при изучении петель гистерезиса зависимость магнитных свойств позволяет рассматривать ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран в качестве датчиков направления магнитного поля. Такие датчики обладают не только простой конструкцией, но и за счет использования в качестве основы гибкой полиэтилентерефталатовой подложки могут применяться на подвижных и сложнопрофильных поверхностях. Также следует отметить, что ввиду отсутствия магнитной сердцевины в нанотрубках, энергетически выгодными (стабильными) являются два состояния: когда линии магнитного поля направлены вдоль оси нанотрубки либо когда они замыкаются внутри стенок в направлении, перпендикулярном оси. Наличие двух стабильных состояний позволяет говорить об однородных полях магнитной коммутации. Кроме того, этим стабильным состояниям могут быть условно присвоены значения «1» или «0», что позволяет задуматься о возможности использования таких наноструктур в качестве элементов магнитной памяти.

Заключение

Железные, кобальтовые и никелевые нанотрубки диаметром 110 нм и толщиной стенки 20 нм были синтезированы методом электрохимического осаждения в порах ионно-трековых полиэтилентерефталатовых мембран. Изучение элементного состава показало, что нанотрубки состоят из чистых металлов без оксидов и примесей, а анализ кристаллической структуры позволил установить, что нанотрубки имеют поликристаллическую структуру стенок с объемно-центрированной кубической (железные), гране-центрированной кубической (кобальтовые и никелевые) кристаллической решеткой. Исследования основных магнитных характеристик нанотрубок при комнатной температуре позволили установить магнитную анизотропию, связанную с анизотропией формы, наблюдающуюся при высоких аспектных отношениях наноструктур.

Морфология нанотрубок за счет наличия полого канала позволяет рассматривать их как базовый элемент для реализации внутри отдельной поры ионно-трековой мембраны многослойных элементов, в которых одна трубка помещается внутри другой. Это позволяет реализовывать такие устройства, как наноконден-

саторы и датчики, чувствительные к внешним воздействиям.

Анизотропия магнитных свойств нанотрубок дает возможность рассматривать их в качестве датчиков направления магнитного поля, а отсутствие у нанотрубок магнитного сердечника будет обеспечивать предсказуемое распределение магнитного поля и однородные поля коммутации при их использовании в качестве элементов магнитной памяти.

Таким образом, что использование ферромагнитных нанотрубок в порах трековых мембран при конструировании элементов гибкой электроники позволит упростить конструкцию многих элементов и реализовывать устройства, которые можно применять на подвижных и сложнопрофильных поверхностях.

References

1. Fink D. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers: Fundamentals and Applications. Vol. 1. *Berlin–Heidelberg: Springer*, 2004. doi: 10.1007/978-3-662-07326-1
2. Apel P.Y., Dmitriev S.N. Micro- and nanoporous materials produced using accelerated heavy ion beams. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 13002. doi: 10.1088/2043-6262/2/1/013002
3. Kaniukov E.Y., Ustarroz J., Yakimchuk D.V., Petrova M., Terryn H., Sivakov V., Petrov A.V. Tunable nanoporous silicon oxide templates by swift heavy ion tracks technology. *Nanotechnology*, 2016, vol. 27, no. 11, pp. 115305. doi: 10.1088/0957-4484/27/11/115305
4. Hoppe K., Fahrner W.R., Fink D., Dhamodaran S., Petrov A., Chandra A., Saad A., Faupel F., Chakravadhanula V.S.K., Zaporotchenko V. An ion track based approach to nano- and micro-electronics. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. B*, 2008, vol. 266, no. 8, pp. 1642–1646. doi: 10.1016/j.nimb.2007.12.069
5. Hulteen J.C., Martin C.R. A general template-based method for the preparation of nanomaterials. *J. Mater. Chem.*, 1997, vol. 7, no. 7, pp. 1075–1087. doi: 10.1039/a700027h
6. Mitchell D.T., Lee S.B., Trofin L., Li N., Nevanen T.K., Söderlund H., Martin C.R. Smart Nanotubes for Bioseparations and Biocatalysis. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, vol. 124, no. 40, pp. 11864–11865. doi: 10.1021/ja027247b
7. Park J.H., Lee D.Y., Kim Y.-H., Kim J.K., Lee J.H., Park J.H., Lee T.-W., Cho J.H. Flexible and Transparent Metallic Grid Electrodes Prepared by Evaporative Assembly. *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 2014, vol. 6, no. 15, pp. 12380–12387. doi: 10.1021/am502233y
8. Wang J., Jiu J., Nogi M., Sugahara T., Nagao S., Koga H., He P., Sugauma K. A highly sensitive and flexible pressure sensor with electrodes and elastomeric in-

- terlayer containing silver nanowires. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, no. 7, pp. 2926–2932. doi: 10.1039/C4NR06494A.
9. Jiu J., Suganuma K. Metallic Nanowires and Their Application. *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, 2016, vol. 6, no. 12, pp. 1733–1751. doi: 10.1109/TCPMT.2016.2581829
10. Chang I., Park T., Lee J., Lee M.H., Ko S.H., Cha S.W. Bendable polymer electrolyte fuel cell using highly flexible Ag nanowire percolation network current collectors. *J. Mater. Chem. A*, 2013, vol. 1, no. 30, pp. 8541. doi: 10.1039/c3ta11699a
11. Melzer M., Mönch J.I., Makarov D., Zabala Y., Cañón Bermúdez G.S., Karnaushenko D., Baunack S., Bahr F., Yan C., Kaltenbrunner M., Schmidt O.G. Wearable Magnetic Field Sensors for Flexible Electronics. *Adv. Mater.*, 2015, vol. 27, no. 7, pp. 1274–1280. doi: 10.1002/adma.201405027
12. Cohen-Karni T., Timko B.P., Weiss L.E., Lieber C.M. Flexible electrical recording from cells using nanowire transistor arrays. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2009, vol. 106, no. 18, pp. 7309–7313. doi: 10.1073/pnas.0902752106
13. Patolsky F., Zheng G., Lieber C.M. Nanowire-Based Biosensors. *Anal. Chem.*, 2006, vol. 78, no. 13, pp. 4260–4269. doi: 10.1021/ac069419j
14. Kaniukov E.Y., Kozlovsky A.L., Shlimas D.I., Zdorovets M.V., Yakimchuk D.V., Shumskaya E.E., Kadyrzhanov K.K. Electrochemically deposited copper nanotubes. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 270–275. doi: 10.1134/S1027451017010281
15. Demyanov S.E., Kaniukov E.Y., Petrov A.V., Belonogov E.K., Streltsov E.A., Ivanov D.K., Ivanova Y.A., Trautmann C., Terryn H., Petrova M., Ustarroz J., Sivakov V. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 805–813. doi: 10.1134/S1027451014040326
16. Kozlovskiy A., Zhanbotin A., Zdorovets M., Manakova I., Ozernoy A., Kiseleva T., Kadyrzhanov K., Rusakov V., Kanyukov E. Mossbauer research of Fe/Co nanotubes based on track membranes. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.*, 2016, vol. 381, pp. 103–109. doi: 10.1016/j.nimb.2016.05.026
17. Kalanda N.A., Gorokh G.G., Yarmolich M.V., Lozovenko A.A., Kanyukov E.Y. Magnetic and magnetoresistive properties of Al₂O₃-Sr₂FeMoO_{6-δ}-Al₂O₃ nano-heterostructures. *Phys. Solid State*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 351–359. doi: 10.1134/S1063783416020128
18. Wang X.W., Yuan Z.H., Fang B.C. Template-based synthesis and magnetic properties of Ni nanotube arrays with different diameters. *Mater. Chem. Phys.*, 2011, vol. 125, no. 1–2, pp. 1–4. doi: 10.1016/j.matchemphys.2010.08.083
19. Zhang F., Zhao D. Fabrication of ordered magnetite-doped rare earth fluoride nanotube arrays by nanocrystal self-assembly. *Nano Res.*, 2009, vol. 2, no. 4, pp. 292–305. doi: 10.1007/s12274-009-9027-6
20. Kozlovskiy A.L., Shlimas D.I., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Y., Zdorovets M.V., Kadyrzhanov K.K. Influence of electrodeposition parameters on structural and morphological features of Ni nanotubes. *Phys. Met. Metallogr.*, vol. 118, no. 2, pp. 164–169, 2017. doi: 10.1134/S0031918X17020065
21. Shumskaya A.E., Kaniukov E.Y., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M. V., Rusakov V.S., Kadyrzhanov K.K. Structure and Physical Properties of Iron Nanotubes Obtained by Template Synthesis. *Phys. Solid State*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 784–790. doi: 10.1134/S1063783417040266
22. Kaniukov E.Y., Shumskaya E.E., Yakimchuk D.V., Kozlovskiy A.L., Ibragimova M.A., Zdorovets M.V. Evolution of the polyethylene terephthalate track membranes parameters at the etching process. *J. Contemp. Phys. (Armenian Acad. Sci.)*, 2017, vol. 52, no. 2, pp. 155–160. doi: 10.3103/S1068337217020098
23. Kozlovskiy A., Borgekov K., Zdorovets M., Arkhangel'sky E., Shumskaya A., Kanukov E. [Application of ion-track membranes in processes of direct and reverse osmosis]. *Vestsi NAN Belarusi, Fiziko-tekhnicheskaya seriya* [Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, physico-technical series], 2017, vol. 1, pp. 45–51 (in Russian).
24. Yoo B., Xiao F., Bozhilov K.N., Herman J., Ryan M.A., Myung N.V. Electrodeposition of thermoelectric superlattice nanowires. *Adv. Mater.*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 296–299. doi: 10.1002/adma.200600606
25. Motoyama M., Fukunaka Y., Sakka T., Ogata Y.H. Initial stages of electrodeposition of metal nanowires in nanoporous templates. *Electrochim. Acta*, 2007, vol. 53, no. 1, pp. 205–212. doi: 10.1016/j.electacta.2007.04.122
26. Bercu B., Enculescu I., Spohr R. Copper tubes prepared by electroless deposition in ion track templates. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, 2004, vol. 225, no. 4, pp. 497–502. doi: 10.1016/j.nimb.2004.06.011
27. Graham L.M., Cho S., Kim S.K., Noked M., Lee S.B. Role of boric acid in nickel nanotube electrodeposition: a surface-directed growth mechanism. *Chem. Commun.*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 527–529. doi: 10.1039/C3CC47183G
28. Chowdhury T., Casey D.P., Rohan J.F. Additive influence on Cu nanotube electrodeposition in anodised aluminium oxide templates. *Electrochem. commun.*, 2009,