ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 8, с. 1090–1096

УДК 535.016

НАНОПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВОВ FeCo И FeNi: ПОЛУЧЕНИЕ, МИКРОСКОПИЯ И СВОЙСТВА

© 2021 г. Д. Л. Загорский[1, *], И. М. Долуденко[1], В. М. Каневский[1], А. Р. Гилимьянова[1, 2], В. П. Менушенков[2], Е. С. Савченко[2]

[1]Федеральное государственное учреждение "Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника" Российской академии наук, Москва, Россия

[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва, Россия

*E-mail: dzagorskiy@gmail.com

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.
После доработки 05.04.2021 г.
Принята к публикации 28.04.2021 г.

Для нанопроволок из сплавов FeNi и FeCo изучены особенности матричного синтеза. Показано, что состав нанопроволок из FeNi зависит от приложенного напряжения и, кроме того, изменяется вдоль длины проволоки. Состав нанопроволок из FeCo практически не зависит от напряжения и не меняется по длине. Магнитные свойства полученных образцов сплавов зависят от напряжения и от ориентации магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676521080329

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства наноматериалов привлекают активное внимание исследователей [1, 2]. Одним из типов наноматериалов являются нанопроволоки (НП) – вытянутые структуры, с большой величиной отношения длины к диаметру (с высоким аспектным отношением) [3]. Распространенный способ получения таких материалов – это матричный синтез [4]. Идея метода состоит в заполнении требуемым веществом пор (сквозных отверстий правильной формы) специально изготовленной матрицы. В качестве матрицы могут выступать различные материалы, из которых в настоящее время наиболее распространены два: пористый оксид алюминия (ПОА) [5] и трековые мембраны (ТМ) [6, 7]. Способами заполнения чаще всего являются химический или электрохимический (гальваническое осаждение). В настоящей работе в качестве матриц используется ТМ, в поры которой гальваническим способом осаждаются соединения ("сплавы") ферромагнитных металлов группы железа – Fe, Co и Ni. Интерес к таким НП вызван тем, что они могут обладать уникальными магнитными свойствами.

НП из чистых металлов были получены уже в первых работах [8–10]. Так, в [8] реплики из кобальта и никеля были синтезированы в порах оксидной матрицы – авторы предложили использовать такие структуры для магнитной записи с высокой плотностью. В работе [9] также описано получение массивов НП из этих металлов и их магнитные свойства. В [10] дан обзор работ по магнитным материалам и проведено сравнение их магнитных характеристик.

Впоследствии были отработаны приемы получения НП различных структур сложного состава. Возможность получения таких структур является отличительной особенностью электрохимического осаждения [11–13]. К числу таких структур относятся т. н. "сплавы". Обычно это твердые растворы двух (и более) металлов, состав которых (как предполагалось) практически не изменяется по длине.

Особенностью процесса получения сплавов является то, что состав полученных НП отличается от состава исходного электролита и изменяется при изменении условий осаждения. Отметим, что состав сплавов металлов группы железа определяет их магнитные свойства. Так, сплав Fe–Ni с 80% никеля (пермаллой) – типичный пример магнитомягкого материала, в то же время сплав с примерно равными долями железа и кобальта имеет весьма высокие магнитотвердые свойства. Эти особенности отражает диаграмма системы Fe–Ni–Co: она получена для объемных сплавов [14], однако можно предположить, что основные особенности будут проявляться и в наноразмерных НП.

В [15] осаждением в поры ПОА получены и сплошные НП и полые нанотрубки: показано, что тип структуры меняется при изменении ростового напряжения (напряжения между катодом и анодом на гальванической ячейке). Обнаружены значительные различия в магнитных свойствах, которые объясняются различием размеров зерен. В [16] были синтезированы полые нанотрубки FeNi, содержащие 80% железа, которое замещает Ni в ГЦК решетке. В [17] показано, что микроструктура и магнитные свойства НП из никелевых сплавов, осаждаемых в переменном токе, не зависят от частоты тока и длительности паузы; оценивались условия получения ОЦК и ГЦК структур. В [18] для НП из сплава FeNi показано, что увеличение длины приводит к уменьшению коэрцитивной силы (H_c) и к увеличению магнитостатического взаимодействия между НП. В [19] описаны особенности импульсного осаждения НП из железо-никелевого сплава. Показано, что НП с содержанием никеля 80% характеризуются высокой магнитной анизотропией, в отличие от практически изотропных НП из чистого никеля. Авторы [20] показали, что FeNi НП (полученные в ПОА) имеют сильную магнитную анизотропию, причем ось легкой намагниченности лежит вдоль оси НП. Авторы [21] изучали FeCo НП, полученные в порах ПОА, и определили, что они имеют ОЦК структуру и преимущественную ориентацию вдоль кристаллографической оси (110). Показано, что H_c слабо уменьшается при увеличении длины НП.

В [22] нанотрубки из сплава FeCo сравнивались с нанотрубками из чистого железа: Мессбауэровские исследования позволили определить направление магнитного момента. Было выявлено наличие катионов железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}), попадающих в нанотрубки при их росте. Увеличение магнитной энергии НП из FeCo было достигнуто в [23] за счет перекрытия концов нанопроволок антиферромагнитным материалом (FeMn). Влияние отжига на FeCo НП описано в [24]: исходная кубическая (ОЦК) структура изменяется при нагреве до 450°C; добавление в состав малых количеств меди приводит к увеличению магнитотвердых свойств. Нагрев НП из FeCo в переменном магнитном поле изучен в [25]. Это явление (гипертермия) может использоваться в медицине.

В ряде работ проведено сравнение НП из FeNi и FeCo. В [26] изучены магнитные свойства двух типов сплавов и показана их зависимость от соотношения элементов в НП и их “упорядочения”. Получение НП из FeCo и FeNi (в порах ПОА) и их сравнение проведено в [27]. Показано различие свойств при электроосаждении двух типов НП, а также влияние термообработки на структуру. Обнаружено, что H_c в FeNi возрастает с увеличением длины НП, в НП из FeCo наблюдается обратный эффект.

Использование трековых мембран позволило бы дополнительно варьировать форму и размеры пор и получать элементы для т. н. “гибкой электроники”. Синтез на таких мембранах проводился ранее в ряде работ авторов данной статьи. В [28–30] были изучены массивы НП из FeCo и FeNi, полученные в порах матриц из полиэтилентерефталата. Установлены закономерности роста при двухэлектродной схеме подключения и показано влияние диаметра пор. Мессбауэровская спектроскопия выявила ориентационную зависимость вектора намагниченности массива НП, была косвенно определена концентрация металлов. Изучены магнитные свойства (петли гистерезиса) и показано, что при уменьшении диаметра пор и увеличении скорости роста НП увеличивается H_c и остаточная намагниченность. В [31] выявлен эффект аномального со-осаждения железа и изменение концентрации металлов по длине НП. Однако детальные исследования не были проведены.

Известно, что одним из важнейших параметров регулирования роста НП является напряжение. Влияние этого фактора на рост НП из сплавов изучено недостаточно. Целью настоящей работы является восполнение этого пробела. В работе для двух составов FeNi и FeCo исследована зависимость элементного состава и структуры от ростового напряжения, а также проведено сравнение результатов осаждения в двух типах протекания процесса – по двухэлектродной схеме (катод (осаждаемый металл) и растворимый анод) и по трехэлектродной схеме. В последнем случае в схему для лучшего контроля процесса добавлен т. н. “электрод сравнения”, расположенный в непосредственной близости от поверхности мембраны, в поры которой проводится электроосаждение.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе для матричного синтеза использовались полимерные матрицы – трековые мембраны (производство ОИЯИ, г. Дубна) со следующими параметрами: толщина пленки – 12 мкм, диаметр пор – 100 нм, поверхностная плотность пор – $1.2 \cdot 10^9$ пор на кв. см. Поверхность мембран покрывалась тонким слоем меди для создания токопроводящего слоя. Затем поры мембран заполнялись металлами методом гальванического осаждения.

Применялись два типа электролитов, каждый из которых содержал соли (сернокислые и хлорные) соответствующих металлов. Так, раствор для создания НП из сплавов FeNi содержал $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 16 г/л; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 40 г/л и $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 8 до 32 г/л. Для создания НП из сплавов FeCo электролит имел следующий состав: $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ – 16 г/л; $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ – 40 г/л и

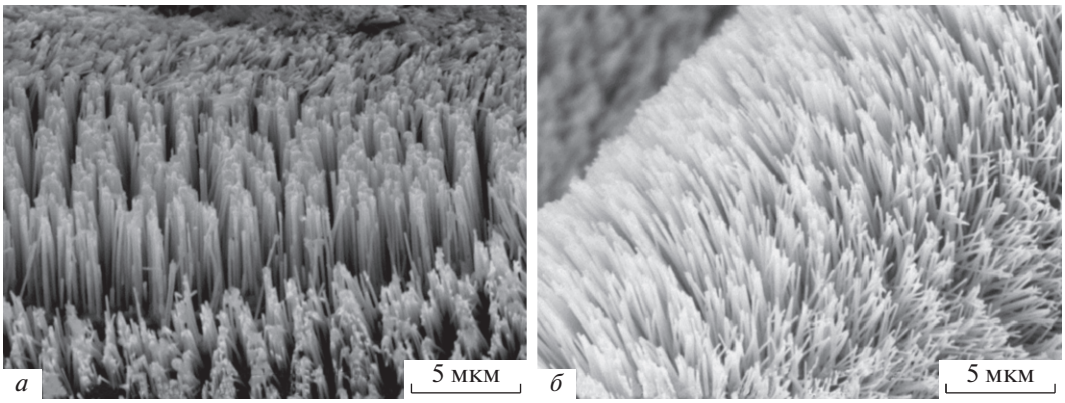

Рис. 1. Микрофотографии образцов нанопроволок FeCo (*а*) и FeNi (*б*).

$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – 48 г/л. Во всех случаях применялись добавки: борная кислота H_3BO_3 – 25 г/л, 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). Описанные составы были выбраны исходя из результатов предыдущей работы [31]: НП, полученные из этих электролитов при напряжении 1.5 В, наиболее приближены к известным сплавам, обладающим магнитомягкими ($Fe_{20}Ni_{80}$) и магнитотвердыми ($Fe_{50}Co_{50}$) свойствами.

Процесс электроосаждения проводился в специальной гальванической ячейке. Площадь образца, на которую проводилось осаждение, составляла 2.5 см^2. Использовался анод из железа. В качестве источника питания ячейки применялся потенциостат-гальваностат Elins P-2X. Во всех случаях процесс проводился в потенциостатическом режиме: исходно заданное напряжение (1, 1.5 или 2 В) поддерживалось в ходе эксперимента неизменным.

В первой части работы электроосаждение проводилось по так называемой двухэлектродной схеме (упрощенной), при вышеупомянутых напряжениях 1, 1.5 и 2 В. Во второй части работы для увеличения равномерности осаждения (см. ниже) использовалась т.н. трехэлектродная схема – был добавлен электрод сравнения, который позволял контролировать потенциал непосредственно у поверхности матрицы. Предполагалось, что это снизит влияние неоднородности электролита (или изменение его состава в процессе осаждения) и уменьшит неоднородность получаемых НП (см. ниже).

Исследования массивов НП проводились на сканирующем электроном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM 6000 plus (с элементным анализом) в режиме вторичных электронов, использовалось ускоряющее напряжение 15 кВ, увеличение ×500–10 000. Рентгеноструктурный анализ проводился на приборе RIGAKU Miniflex 600 (излучение CuK_α, диапазон углов 40–80 град). Магнитометрия проводилась на вибрационном магнитометре VSM-250 (максимальное поле – до 20000 Э, частота колебаний –185 Гц).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе работы массивы НП из FeCo и FeNi были получены по двухэлектродной схеме. Для контроля в ходе электроосаждения снимались т.н. потенциостатические кривые (зависимости тока от времени при заданном постоянном потенциале). Кривые отражают различные этапы заполнения пор в ростовой матрице. В целом они имеют сходный вид для обоих типов НП и для различных напряжений. Значительное увеличение тока (и, соответственно, скорости осаждения) при увеличении напряжения выглядят вполне логично. Следует отметить, что распределение элементов в этих случаях отличалось – равномерное в кобальтовых НП и изменяющееся по длине в никелевых НП – см. ниже. Поэтому во второй части работы для выравнивания состава никелевых образцов применялся трехэлектродная схема, потенциалы осаждения при этом определялись по поляризационной кривой (вольтамперной характеристики процесса).

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что железо начинает осаждаться при напряжении 1 В. На основании сравнения этой кривой с данными для двухэлектродной схемы были выбраны следующие потенциалы осаждения: 1, 1.25 и 1.5 В (эти потенциалы соответствовали токам, получаемым при потенциалах 1, 1.5 и 2 В по двухэлектродной схеме). При этом были получены кривые осаждения, которые принципиально не отличаются от кривых по двухэлектродной схеме.

Полученные СЭМ-изображения массивов FeCo НП (а) и FeNi НП (б) представлены на рис. 1. Видно, что ансамбль НП достаточно однороден по длине, которая составляет от 8 до 10 мкм, и по

Таблица 1. Распределение элементов по длине нанопроволок из FeCo и FeNi, выращенных по двухэлектродной схеме

Состав нанопроволок	FeNi			FeCo		
Выращено при потенциале, В	1	1.5	2	1	1.5	2
Начало НП, % (ат.) Fe	26.7	21	13.3	55.1	57.3	58.1
Конец НП, % (ат.) Fe	42.8	26.5	19	54.25	58.3	59

диаметру – порядка 110 нм. Плотность НП соответствует плотности пор в матрице – т.е. все поры заполняются металлом. Диаметр НП несколько выше заявленного диаметра пор, что может объясняться растяжением полимера в процессе его заполнения металлом и окислением НП на воздухе.

Элементный состав был детально изучен для обоих типов НП. Отметим, что усреднение по длине и по массиву давало интегральный элементный состав НП. В то же время проведение локального анализа (диаметр минимальной области анализа составлял около 2 мкм) давало возможность оценки изменения состава по длине НП. На рис. 2 приведен пример выбора областей для оценки изменения состава по длине для НП из FeNi.

Результаты анализа распределения элементов по длине НП приведены в табл. 1. Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что состав НП из сплава FeCo практически соответствует составу электролита (различия менее 7% в сторону увеличения концентрации Fe). При этом потенциал осаждения влияет на состав незначительно, а элементы распределены равномерно по длине НП.

Для НП из сплава FeNi во всех случаях (при всех потенциалах) концентрация железа заметно выше, чем в ростовом электролите. Повышение напряжения приводит к уменьшению концентрации железа. Во всех случаях распределение элементов по длине НП неоднородно, концентрация железа повышается по мере роста НП (в “конце” НП). Это различие увеличивается при малых потенциалах. Особенности роста НП из сплава FeNi могут быть объяснены, очевидно, эффектом его аномального со-осаждения, который известен для объемных материалов. Другой причиной зависимости является различие в диффузионных подвижностях ионов железа и никеля.

Анализ полученных во второй части работы СЭМ-изображений показывает, что переход на трехэлектродную схему принципиально не изменяет вид массива НП. Для этого случая также было оценено изменение состава по длине НП из FeNi. Соответствующие численные данные приведены в табл. 2.

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что и в этом случае наблюдается эффект аномального со-осаждения железа, однако его величина значительно меньше. Так, для случая осаждения при 1.5 В разность между составом электролита и составом НП составляет всего 3%. Состав НП также несколько изменяется по длине, однако это изменение значительно меньше, а при потенциале 1.5 В вообще отсутствует. Таким образом можно утверждать, что применение электрода сравнения (переход на трехэлектродную схему) в данном случае приводит к стабилизации роста и состава НП.

Таблица 2. Состав FeNi НП, полученных для различных потенциалов осаждения с использованием электрода сравнения

Выращено при потенциале, В	1	1.25	1.5
Начало НП, % (ат.) Fe	49.3	19	13.6
Конец НП, % (ат.) Fe	61.9	22.1	14

Экспериментальные дифрактограммы для массивов НП из FeCo были получены ранее (в работе [31]). Можно сделать вывод о том, что вид рентгенограммы практически не зависит от режима получения НП. Сами НП представляют из себя твердый раствор кобальта в железе с ОЦК решеткой.

На рис. 3 представлены дифрактограммы НП из сплава FeNi, полученных по двухэлектродной и трехэлектродной схемам при разных напряжениях. По представленным данным можно сделать вывод о том, что структура всех получающихся сплавов – это твердые растворы. Видно, что в

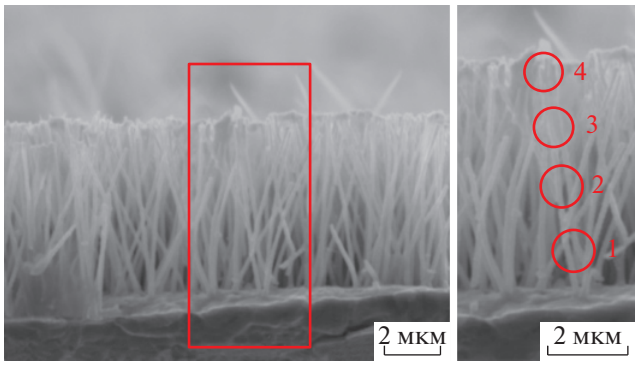

Рис. 2. СЭМ-изображение массива нанопроволок FeNi и выбор области для исследования распределения элементов по длине. Область “1” – начало, область “4” – конец НП.

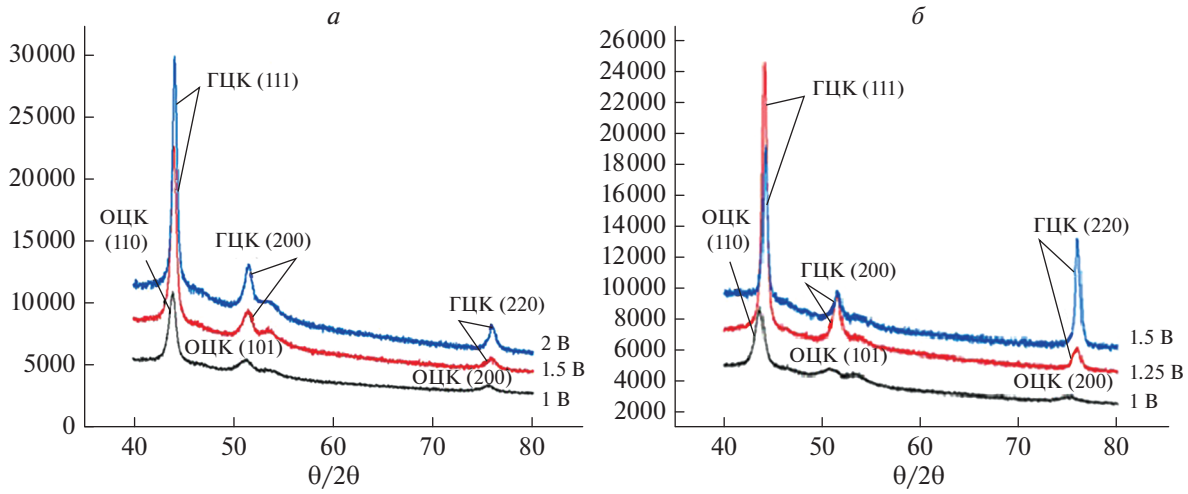

Рис. 3. Дифрактограммы образцов FeNi, полученных по двухэлектродной (*а*) и трехэлектродной схемам (*б*).

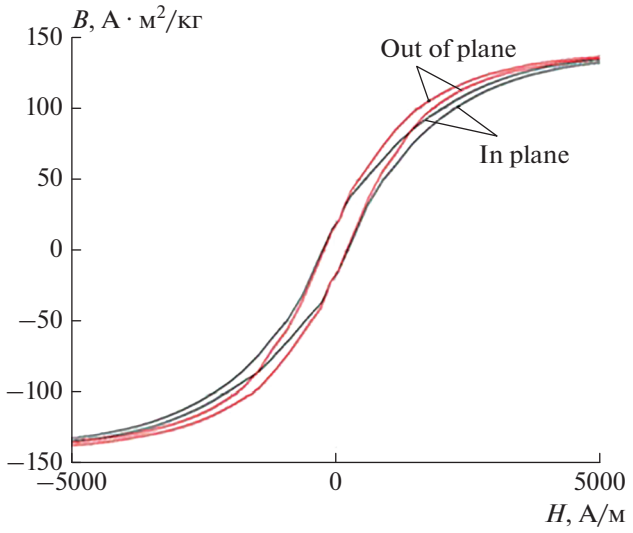

Рис. 4. Пример петель гистерезиса магнитных свойств образцов нанопроволок из FeNi – измерения в геометрии “in plane” и “out of plane”.

первом случае при малом ростовом напряжении (1 В) образуется структура ОЦК с параметром решетки 0.264 нм, близким к параметру решетки чистого железа (0.287 нм). При повышении напряжения (1.5 и 2 В) формируется другой тип структуры – ГЦК, с параметрами решетки 0.354 и 0.355 нм (соответственно), которые близки к стандартному значению решетки чистого никеля (0.352 нм). Та же тенденция (формирование структуры ОЦК при низком напряжении и ГЦК при высоком) наблюдается и при использовании трехэлектродной схемы роста. Эти зависимости хорошо согласуются с элементным анализом образцов, показывающим повышение содержания железа при уменьшении ростового напряжения.

Магнитные измерения проводились при двух ориентациях внешнего магнитного поля по отношению к осям НП. В геометрии “out-of-plane” поле параллельно оси НП, а в геометрии “in-plane” – перпендикулярно оси НП. Результаты измерения магнитных свойств представлены ниже – на рис. 4 для примера представлены петли гистерезиса FeNi НП, а в табл. 3 приведены значения H_c, полученные для всех образцов.

Из табл. 3 видно, что для всех кобальтовых образцов значения H_c заметно выше, чем для никелевых, что представляется вполне логичным. Значения H_c в никелевых образцах при измерениях “out-of-plane” несколько выше, чем при измерениях “in-plane”, впрочем, различие незначительное. Для

Таблица 3. Значения коэрцитивной силы для двух типов образцов, полученных при различных ростовых напряжениях

Состав нанопроволок	FeNi			FeCo		
Выращено при потенциале, В	1	1.5	2	1	1.5	2
	Коэрцитивная сила, H_c (кА/м)					
Направление поля “in-plane”	16.5					
Напр. поля “out-of-plane”	17.6	16.8	16.7	26.5	25.9	25.9

НП из FeCo заметного изменения H_c при измерении геометрии измерения не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована зависимость состава и свойств двух типов нанопроволок от условий их получения. Обнаружено, что элементный состав железо-кобальтовых НП близок к составу ростового электролита и практически не меняется при изменении ростового потенциала и по длине проволок. Напротив, состав железо-никелевых НП сильно зависит и от условий получения и изменяется по длине. В этом случае осаждение по трехэлектродной схеме (с электродом сравнения) позволило уменьшить отличия, как по составам (интегрально для массива НП), так и по длине НП.

Структура всех образцов представляет из себя твердый раствор соответствующих металлов. В случае железо-кобальтового сплава параметр решетки практически не меняется при изменении условий получения. В железо-никелевом сплаве, при повышении напряжения осаждения, решетка меняется от ОЦК (с параметрами, близкими к параметрам железу) к ГЦК (с параметрами, близкими к никелю).

Кобальтовые НП имеют значительно большую коэрцитивную силу, которая практически не зависит от условий осаждения. В целом, свойства железо-кобальтовых НП достаточно стабильны, а сами НП являются перспективным материалом для получения магнито-твердых материалов. Параметры железо-никелевых НП сильно зависят от условий получения, изменяя которые можно варьировать свойства этих материалов. Таким образом, матричный синтез позволяет получать широкую гамму наноразмерных материалов с уникальными магнитными свойствами.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анищик В.М.* 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.* Функциональные наноматериалы. М.: Физматлит, 2010. 456 с.
4. *Martin C.R.* // Science. 1994. V. 23. No. 266. P. 1961.
5. *Masuda H., Fukuda K.* // Science. 1995. V. 268. No. 5216. P. 1466.
6. *Chakarvarti S.K., Vetter J.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1991. V. 62. No. 1. P. 109.
7. *Vetter J., Spohr R.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1993. V. 79. Nos. 1–4. P. 691.
8. *Kawai S., Ueda R.J.* // J. Electrochem. Soc. 1975. V. 112. No. 32.
9. *Whitney T.M., Jiang J.S., Searson P.S. et al.* // Science. 1993. V. 261. P. 1316.
10. *Sellmyer D.J., Zheng M., Skomski R.* // J. Phys. Cond. Matter. 2001. V. 13. No. 25. P. 433.
11. *Lupu N.* Electrodeposited nanowires and their applications. V.: InTech, 2010. 236 p.
12. *Vazquez M.* Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications. S.: Woodhead Publ., 2015. 847 p.
13. *Давыдов А.А., Волгин В.М.* // Электрохимия. 2016. Т. 52. № 9б. С. 905.
14. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.* Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
15. *Zhang X., Zhang H., Wu T. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2013. V. 332. P. 162.
16. *Kozlovskiy A., Zhanbotin A., Zdorovets M. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2015. V. 365. P. 663.
17. *Kashi M.A., Ramazani A., Doudafkan S. et al.* // J. Appl. Phys. A. 2011. V. 102. P. 761.
18. *Kashi M.A., Ramazani A., Asgari V. et al.* // J. Nanostruct. 2013. No. 3. P. 11.
19. *Leitao D.C., Sousa C.T., Ventura J. et al.* // J. Non-Cryst. Sol. 2008. V. 354. No. 5241. P. 47.
20. *Wang P., Gao L., Wang L. et al.* // Int. J. Mod. Phys. B. 2010. V. 24. Nos. 15–16. P. 2302.
21. *Shao I., Chen M.W., Cammarata R.C. et al.* // J. Electrochem. Soc. 2007. V. 154. No. 11. P. 2572.
22. *Rusakov V.S., Kadyrzhanov K.K., Kozlovskii A.I. et al.* // Moscow Univ. Phys. Bull. 2016. V. 71. No. 2. P.193.
23. *Wang F. Z., Salikhov R., Spasova M. et al.* // Nanotechnology. 2017. V. 28. No. 29. Art. No. 295402.
24. *Bran C., Palmero E.M., Real R.P. et al.* // Phys. Stat. Sol. A. 2014. V. 211. No. 5. P. 1076.
25. *Alonso J., Khurshid H., Sankar V. et al.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. No. 17. Art. No. 17D113.
26. *Kalska-Szostko B., Klekotka U., Olszewski W. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2019. V. 484. P. 67.
27. *Mansouri N., Benbrahim-Cherief N.B., Chainet E. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2020. V. 493. Art. No. 165740.
28. *Фролов К.В., Загорский Д.Л., Любутин И.С. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. № 5. С. 297; *Frolov K.V., Zagorskii D.L., Lyubutin I.S. et al.* // JETP Lett. 2017. V. 105. No. 5. P. 297.
29. *Загорский Д.Л., Фролов К.В., Бедин С.А. и др.* // ФТТ. 2018. Т. 60. № 11. С. 2075; *Zagorskiy D.L., Frolov K.V., Bedin S.A. et al.* // Phys. Sol. St. 2018. V. 60. No. 11. P. 2115.
30. *Frolov K.V., Chuev M.A., Lyubutin I.S. et al.* // J. Magn. Magn. Mater. 2019. V. 489. P. 165415.
31. *Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Фролов К.В. и др.* // ФТТ. 2020. Т. 62. № 9. С. 12; *Doludenko I.M., Zagorskii D.L., Frolov K.V. et al.* // Phys. Sol. St. 2020. V. 62. No. 9. P. 1639.

FeCo and FeNi alloyed nanowires: obtaining, microscopy and properties

D. L. Zagorskiy[a, *], I. M. Doludenko[a], V. M. Kanevsky[a], A. R. Gilimyanova[a, b], V. P. Menushenkov[b], E. S. Savchenko[b]

[a] *Federal Scientific Research Center "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia*

[b] *The National University of Science and Technology "MISiS", Moscow, 119049 Russia*

**e-mail: dzagorskiy@gmail.com*

FeCo and FeNi alloyed nanowires (NW) were obtained by the matrix synthesis method: the effect of the growth voltage and the effect of using a reference electrode were studied. It is shown that the composition of FeNi nanowires strongly depends on the growth potential (with its increase, the bcc structure is changing into fcc), and it is also different in different parts of the nanowire. The composition of FeCo NW is practically independent of the growth potential and does not change along the length. The magnetic properties and their dependence on voltage and on the orientation of the magnetic field were investigated.