**Применение матричного синтеза для получения FeNi нанопроволок**

**Ю. А. Филиппова1,2,\*, Д. В. Панов1,3,4, С. А. Бедин1,4, И. В. Разумовская1**

*1Московский педагогический государственный университет, 119991, Москва, Россия*

*2Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия*

*3Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Москва, Россия*

*4ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333, Москва, Россия*

\*e-mail: [yufi26@list.ru](mailto:yufi26@list.ru)

В данной работе описан метод матричного синтеза для получения порошков ферромагнитных железо-никелевых нанопроволок длиной 2,5 мкм и диаметром 100 нм на базе трековых мембран; с помощью растровой электронной микроскопии оценена фактическая длина полученных FeNi нанопроволок, изучен их элементный состав с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и исследована их структура с помощью рентгенофазового анализа. Предполагается использование полученных нанопроволок при синтезе магнитных жидкостей.

**Ключевые слова:** матричный синтез, нанопроволоки, магнитные жидкости, трековые мембраны.

На стыке физической и коллоидной химии, физики магнетизма, электромеханики сформировалась новое научно-техническое направление синтеза магнитоуправляемых материалов, например, магнитных жидкостей (МЖ). Управление свойствами и поведением МЖ с помощью внешнего магнитного поля, которое в большинстве случаев вызывает магнитореологический эффект, является перспективной областью исследований и применений с начала 1960-х годов, когда эти материалы были впервые синтезированы [1]. МЖ – коллоидный раствор ферромагнитных частиц в жидкости носителе.

Практический интерес к МЖ продиктован возможностями их применения в различных сферах жизнедеятельности. В энергетике и машиностроении как магнитные смазки и герметики, в горнорудной промышленности для обогащения полезных ископаемых и для магнитожидкостного сепаратора, в экологии для сбора нефтепродуктов, а также МЖ применяют для создания дистанционно управляемых приводов для мягких роботов [2] и др. [3]. В медицине МЖ применяются в адресной доставке лекарств, контрастировании для магнитной резонансной томографии, в гипертермии и как рентген-контрастное вещество.

Обычно МЖ делают со сферическими частицами магнетита размер которых может быть в некотором диапазоне. В работе [4] авторы пишут, что в качестве наполнителя МЖ ферромагнитные нанопроволоки (НП) обладают преимуществом перед сферическими наночастицами. Суспензии на основе НП обеспечивают более высокий предел текучести МЖ при низких магнитных полях, а скорость седиментации НП значительно снижена по сравнению с МЖ со сферическими частицами. Мы в данной работе предлагаем метод синтеза калиброванных анизотропных железо-никелевых НП. Одной из проблем является влияние анизотропии магнитных частиц на свойства МЖ. Очевидно, что степень анизотропии должна влиять на структуру МЖ. Был выбран наиболее перспективный метод получения ферромагнитных частиц с возможностью вариации формы и размера НП - матричный синтез (МС) на полимерных трековых мембранах (ТМ). ТМ (ЛЯР ОИЯИ г. Дубна) на основе пленок ПЭТФ, подвергались облучению ионами Kr энергией 2-4 МэВ/а.е.м. Начальная толщина плёнок равна 12 мкм, плотность пор n=1,3\*109 см-2, диаметр пор d = 100 нм.

В нашем случае максимальная длина НП лимитируется толщиной ТМ. Прерывая процесс, можно получить НП разной длины. Диаметр НП определяется диаметром пор ТМ.

Получение НП проводилось методом матричного синтеза описанным в работе [5]. Следующим этапом для получения взвешенных в дистиллированной воде FeNi НП является селективное удаление Cu слоя с помощью раствора: H2O2 3% 1л, C6H8O7 300 г/л, NaCl 50 г/л и удаление полимерной матрицы с помощью раствора NaOH 240г/л при температуре 85оС в течении 2ч. После тщательной промывки от щёлочи получали взвесь из НП в дистиллированной воде [6]. Результатом являлись НП в взвеси диаметром 100 нм и длиной 2,5 мкм, оцененной с помощью растрового электронного микроскопа. С помощью метода EDS (энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия) выявили относительное содержание Fe и Ni в НП: Fe : Ni = 37 : 63; рассчитанная плотность FeNi НП составляет 8,52038 г/см3; методом рентгенофазового анализа исследовали структуру НП, на рентгенограмме наблюдаются кубические решётки FeNi.

Работа выполнена по теме Государственного задания Московского Педагогического Государственного Университета (МПГУ) «Физика наноструктурированных материалов: фундаментальные исследования и приложения в материаловедении, нанотехнологиях и фотонике» при поддержке Министерства Просвещения Российской Федерации (AAAA-A20-120061890084-9) совместно с Центром коллективного пользования «Структурная диагностика материалов» Федерального исследовательского центра РАН «Кристаллография и фотоника». Авторы являются членами ведущей научной школы Российской Федерации «Оптико-спектральная наноскопия квантовых объектов и диагностика перспективных материалов» (проект НШ-776.2022.1.2).

**Литература**

1. Kole M., Khandekar S. Engineering applications of ferrofluids: A review //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. – Т. 537. – С. 168222.
2. Shibaev, A.V.; Smirnova, M.E.; Kessel, D.E.; Bedin, S.A.; Razumovskaya, I.V.; Philippova, O.E. Remotely Self-Healable, Shapeable and pH-Sensitive Dual Cross-Linked Polysaccharide Hydrogels with Fast Response to Magnetic Field. Nanomaterials 2021,11, 1271.
3. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях// Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – 264 с.
4. Bell R. C., Zimmerman D., Wereley N. M. Impact of nanowires on the properties of magnetorheological fluids and elastomer composites //Electrodeposited Nanowires and their Applications, Nicoleta Lupu, Editor. Intech Publishers, Vienna, Austria. – 2010. – С. 189-212.
5. Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Фролов К.В., Перунов И.В., Чуев M.A., Каневский B.M., Ерохина H.C., Бедин С.А. Нанопроволоки из сплавов FENI и FECO: синтез, структура и мёссбауэровские измерения/Физика твердого тела. 2020. Т. 62. № 9 (91347). С. 1474-1481.
6. Филиппова Ю. А., Папугаева А. В. Синтез анизотропных наночастиц для получения магнитных жидкостей//Физико-математическое и технологическое образование: проблемы и перспективы развития: Материалы VII Международной научно-методической конференции, Москва, 01–02 марта 2022 года. – Москва: МПГУ, 2022.

**APPLICATION OF MATRIX SYNTHESIS TO OBTAIN FENI NANOWIRES**

**Y. A. Filippova1,2,\*, D. V. Panov1,3, S. A. Bedin1,4, I.V. Razumovskaya1**

*1Moscow State Pedagogical university (MPGU), 119991, Moscow, Russia*

*2Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia*

*3National Research University Higher School of Economics, 101000, Moscow, Russia*

*4FSRC Crystallography and Photonics" RAS, 119333, Moscow, Russia.*

\*e-mail: [yufi26@list.ru](mailto:yufi26@list.ru)

Abstract. This paper describes a matrix synthesis method for obtaining ferromagnetic FeNi nanowires with a length of 2.5 microns and a diameter of 100 nm based on track membranes; using scanning electron microscopy, the length of the obtained iron-nickel nanowires was estimated, their elemental composition was studied using energy-dispersive X-ray spectroscopy and their structure was studied using X-ray diffraction analysis. It is proposed to use the obtained nanowires in the synthesis of magnetic fluids.

**Key words:** matrix synthesis, nanowires, magnetic fluids, track membranes.