

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"

На правах рукописи

Долуденко Илья Михайлович

**Исследование формирования, структуры и физических свойств
нанопроволок сложного состава**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор Бондаренко Г.Г.

Москва 2023

Актуальность темы исследования

Сейчас все возрастающий интерес проявляется к наноматериалам и структурам на их основе. Исследованию возможностей их получения, изучению их структуры и свойств посвящены многие работы как фундаментального, так и прикладного характера. Многообразие методов получения, характера и свойств наноструктур обеспечивает широкое поле их применений.

Одним из типов наноструктур, обладающих большим потенциалом в практическом применении, являются одномерные наноструктуры, или нанопроволоки (НП). Существует ряд методов их получения. Одним из них является матричный синтез. Основная идея данного метода заключается в заполнении заранее подготовленной матрицы необходимым материалом. При этом на данный момент большой интерес представляет получение одномерных магнитных наночастиц. Это связано с все возрастающими темпами изучения наноразмерных, квантовых и спиновых эффектов, а также потребностью в новых материалах и структурах для применения их в химии, радиоэлектронике, микроэлектронике и медицине.

Метод матричного синтеза известен с 90-х годов двадцатого века, однако, многие аспекты методик получения, особенности структуры и функционал получаемых частиц не изучены в полной мере. Большая часть работ посвящена изучению отдельных режимов получения, а не их совокупности для установления связи и возможности прогнозирования получаемой структуры и свойств. Установление зависимостей структуры и, как следствие, свойств наноструктур от режимов их получения, а также создание способов контролируемого изменения как геометрических, так и структурных параметров позволят существенно приблизить исследования в данной области к практическому их применению в различных областях науки и техники, что определяет актуальность темы настоящего исследования.

Степень разработанности темы исследования

Как уже отмечалось выше, «метод матричного синтеза основан на заполнении заранее подготовленной матрицы необходимым материалом. В качестве матрицы для создания одномерных наночастиц чаще всего используются пористый оксид алюминия (ПОА)» [1] и трековые мембраны (ТМ) [2]. Данные типы матриц отличаются способами получения и, как следствие, физико-химическими свойствами, геометрией и совместным расположением пор в объеме матрицы, а также, что самое главное, возможностью контролируемо управлять и изменять отдельные параметры. Так, ТМ, имея в основе полимерную пленку, обладают гибкостью и эластичностью, что позволяет применять структуры на их основе в элементах микроэлектроники и радиоэлектроники [3]. Процесс их получения подразумевает возможность контролируемо изменять диаметр пор и, соответственно, диаметр получаемых наночастиц. Стоит отметить, что подобные изменения диаметра могут быть независимы от плотности пор, чего в полной мере нельзя достичь при создании матриц из ПОА [4]. Еще одним преимуществом ТМ является возможность изменения угла наклона пор по отношению к плоскости матрицы при ее получении с сохранением заданных параметров по всему объему. Помимо этого, сам процесс получения ТМ является поточным и отработанным в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна), при этом сохраняется геометрическое расположение пор в матрице и их селективность по диаметру, что является важным обстоятельством при создании наночастиц, например, для медицинских применений [5]. Исходя из вышеописанного, в качестве матрицы в настоящей работе были выбраны трековые мембраны.

Основным способом заполнения матриц для получения магнитных НП является метод электрохимического осаждения. Данный метод отличается возможностью изменять структурные параметры получаемых материалов,

тем самым изменяя их свойства, а также получать широкий спектр материалов НП [6,7].

Весьма перспективными материалами для создания магнитных наночастиц являются сплавы на основе железа, а именно сплавы с кобальтом или никелем [8]. Для объемных материалов известно, что, варьируя соотношения указанных элементов, можно получать совершенно разные магнитные свойства. Так, сплав $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (пермаллой) является магнитомягким, а сплав с эквипроцентным соотношением железа и кобальта – магнитотвердым сплавом. Представлялось интересным выяснить, характерны ли вышеуказанные магнитные свойства для наноразмерных структур этих сплавов. Для этого необходимо было разработать методы контроля состава и структуры получаемых нанообъектов. Стоит отметить, что метод электрохимического осаждения позволяет варьировать соотношение ионов осаждаемых металлов в электролите, это соотношение не всегда сохраняется в осажденном материале. Так, для процесса объемных материалов характерен эффект аномального со-осаждения железа. Он заключается в том, что при электрохимическом осаждении из растворов, содержащих ионы нескольких металлов, одни из которых Fe^{+2} , соотношение осажденных атомов различных ионов будет отличаться от соотношения ионов в электролите в сторону увеличения железа. Вопрос о проявлении данного эффекта при осаждении в поры трековых мембран осложняется накладываемыми диффузионными ограничениями пор матрицы. При этом возникает ряд вопросов, например, таких как, будет ли данный эффект сохраняться при осаждении в ограниченном объеме, как данный эффект будет зависеть от типа осаждаемых ионов, их соотношения и скорости осаждения.

Еще одной особенностью электрохимического метода заполнения пор матриц, является возможность послойного осаждения ряда металлов; она реализуется благодаря разности равновесных потенциалов осаждения

различных металлов [9]. Материал с меньшим равновесным потенциалом при равномерном возрастании потенциала осаждения начнет осаждаться раньше; при этом процесс осаждения второго типа ионов идти не будет. Только после превышения значения равновесного потенциала второго металла будет происходить совместное осаждение ионов двух разных металлов. Подбор соотношения ионов в электролите позволяет минимизировать содержание примеси при большем потенциале. Подбор режимов осаждения и электролитов позволяет получать послойные осадки при резком переключении потенциалов. Однако применение данного метода для получения нанопроволок связано с рядом проблем, таких как определение оптимальных условий осаждения отдельных слоев, отработка методик контроля толщин слоев для получения периодичной структуры с сохраняющимися геометрическими и структурными параметрами и т.д [10].

В свете изложенного состояния степени проработанности темы, настоящая диссертация посвящена исследованию особенностей заполнения трековых мембран электрохимическим методом для получения нанопроволок из сплавов на основе железа и гетероструктурных нанопроволок для установления зависимостей между режимами получения, структурой и свойствами, что в дальнейшем позволит применять их для создания элементов гибкой микроэлектроники и в качестве компонентов систем для локальной доставки лекарственных средств к очагу заболевания в организме.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является выявление закономерностей формирования, морфологии, кинетики роста и влияния различных факторов на структуру и свойства гомогенных и гетероструктурных нанопроволок заданной геометрии.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработка способов и отработка режимов получения гомогенных и гетероструктурных нанопроволок с заданным составом и равномерным распределением элементов;
- установление закономерностей формирования, морфологии и кинетики роста нанопроволок сложного состава;
- разработка метода контроля толщины слоев гетероструктурных наноструктур;
- выявление закономерностей изменения физических свойств нанопроволок в зависимости от их геометрии, состава и структуры.

Научная новизна диссертационной работы

- Предложен и практически реализован новый способ получения гомогенных наноструктур, состоящих из магнитных сплавов Fe-Ni и Fe-Co, отличающийся возможностью контролируемо регулировать состав сплавов с шагом в 10%;
- Впервые получены экспериментальные данные по кинетике роста наноструктур из Fe-Ni сплавов и предложена на их основе модель роста наноструктур, в соответствии с которой возможно предсказуемо контролировать геометрию наноструктур;
- Впервые установлены закономерности формирования цилиндрических магнитных наночастиц и изменения их структуры в зависимости от режима электроосаждения; при получении наноструктур из сплавов Fe-Ni обнаружен эффект аномального (до 35%) осаждения ионов железа в поры матрицы, предложен физический механизм эффекта;
- Выявлены закономерности изменения электрических свойств массивов наночастиц в зависимости от их аспектного соотношения (X), при этом установлено уменьшение на порядок величины (от 10^6 до 10^5 Ом) электросопротивления металл-полимерного композита на основе получаемых наночастиц с увеличением X от 20 до 70 единиц;

- Предложен и практически реализован метод контроля толщины (30-500 нм) слоев гетероструктурных нанопроволок на этапе роста, отличающийся возможностью получения слоев заданной геометрии вдоль всей длины нанопроволоки;
- Впервые предложен метод получения взвеси калиброванных цилиндрических магнитных наночастиц для локальной доставки лекарств в организме человека, основанный на использовании анизотропных магнитных наночастиц;
- Выявлены закономерности изменения электрокинетического потенциала (дзета-потенциала) взвеси цилиндрических магнитных наночастиц (ЦМНЧ) в зависимости от их аспектного соотношения. При этом установлено, что изменение электрокинетического потенциала обратно пропорционально увеличению аспектного соотношения ЦМНЧ.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертации заключается в расширении спектра знаний о процессах получения, формирования, кинетике роста и физических свойствах наноструктур сложного состава; получен массив экспериментальных данных, установлены и проанализированы закономерности исследованных процессов, изменения под действием различных факторов структуры и свойств гомогенных и гетерогенных нанопроволок систем «железо-никель», «железо-кобальт», «медь-никель», «медь-кобальт». В результате анализа полученных при исследовании формирования наноструктур экспериментальных данных предложена модель роста наноструктур и показано, что эта модель может использоваться для предсказуемого контроля их геометрии в процессе роста. При получении наноструктур из Fe-Ni сплавов обнаружен эффект аномального

электроосаждения ионов железа в поры полимерной матрицы, разработан физический механизм, адекватно объясняющий данное явление.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методики и полученные зависимости позволят в дальнейшем получать одномерные наночастицы и структуры на их основе с заданными структурными, геометрическими параметрами и физическими свойствами. Разработанные методы позволяют получать массивы НП из магнитных сплавов с заданным составом и структурой, что дает возможность широко варьировать их магнитные свойства. Описанный в работе метод получения взвеси калиброванных цилиндрических магнитных наночастиц позволяет получать наночастицы, которые могут найти свое применение в медицине – для локальной доставки лекарств к очагу заболевания в организме, в качестве компонентов подложек при исследовании гигантского комбинационного рассеивания, устройств магнитного нагрева и т.д. Полученные металл-полимерные композиты могут быть использованы при создании сенсоров, источников электромагнитных волн, а также в качестве элементов гибкой микроэлектроники и спинтроники. Важным обстоятельством, определяющим практическое применение полученных в работе результатов, является также то, что используемая матрица производится хорошо освоенным поточным методом, что делает легким процесс масштабирования получаемых объемов наночастиц и наноструктур на их основе.

Методы исследования

В работе были получены и исследованы одномерные наночастицы из магнитных и немагнитных металлов. Метод получения основывался на матричном синтезе, а именно: на гальваническом заполнении пор трековых мембран. В качестве матриц для создания НП были использованы трековые

мембраны производства ОИЯИ, г. Дубна. Матрицы производились путем облучения тонких полимерных пленок из полиэтилентерефталата тяжелыми ионами инертных газов на ускорителе У-400 с последующим растравливанием латентных треков. Облучение производилось с разбросом углов наклона пор до 30° по направлению проката пленки. Это было необходимо для увеличения плотности облучения с сохранением постоянного диаметра пор. «Толщина пленки составляла 12 мкм. Доза облучения составляла $1,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ». Диаметр пор варьировался за счет процесса растравливания латентных треков и в большинстве работ составлял 100 нм [11].

Для синтеза нанопроволок в работе применялся метод гальванического осаждения в поры трековых мембран. Процесс проводился в специальной гальванической ячейке, в которой анод и матрица располагались вертикально. «Площадь образца трековой мембраны, в которую проводилось осаждение, составляла $1,8 \text{ см}^2$; таким образом, площадь рабочего электрода (поверхностная площадь пор матрицы) составляла $0,17 \text{ см}^2$ ». В качестве источника применялся потенциостат – гальваностат Elins P-2X. Потенциалы осаждения изменялись в пределах от 0,5 до 2 В. Процесс проводился по двухэлектродной схеме. Электроосаждение и контроль процесса роста проводились с использованием программируемого потенциостата-гальваностата Elins P-2X [12]. Для выполнения структурных исследований применялся комплекс из нескольких приборов для проведения растровой, просвечивающей электронной микроскопии с приставками для элементного анализа, рентгеноструктурного анализа. Исследования морфологии получаемых нанообъектов, их состава и скорости роста проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), при этом использовался растровый электронный микроскоп JEOL JCM-6000plus, оснащенный приставкой для элементного анализа. Рентгеноструктурные исследования

проводились на порошковом рентгеновском дифрактометре MiniFlex-600 [13].

Измерение электрокинетического потенциала (дзета-потенциала), возникающего в результате накопления электрических зарядов на границе раздела твердой и жидкой фаз, проводилось с помощью автоматического анализатора Zetasizer Nano ZS (Malvern, Великобритания) [14].

Положения, выносимые на защиту

- Новый способ получения гомогенных наноструктур, состоящих из магнитных сплавов Fe-Ni и Fe-Co;
- экспериментальные данные по кинетике роста наноструктур из Fe-Ni сплавов и предложенная на их основе модель роста наноструктур;
- закономерности формирования цилиндрических магнитных наночастиц и изменения их структуры в зависимости от режима электроосаждения; обнаруженный при получении наноструктур из сплавов Fe-Ni эффект аномального (до 35%) осаждения ионов железа в поры матрицы, физический механизм эффекта;
- закономерности изменения электрических свойств массивов наночастиц в зависимости от их аспектного соотношения;
- новый метод контроля толщины (30-500 нм) слоев гетероструктурных нанопроволок на этапе роста;
- новый метод получения взвеси калиброванных цилиндрических магнитных наночастиц для локальной доставки лекарств в организме человека.
- закономерности изменения электрокинетического потенциала (дзета-потенциала) взвеси цилиндрических магнитных наночастиц в зависимости от их аспектного соотношения;

Достоверность полученных результатов

Достоверность экспериментальных результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается их воспроизводимостью, а также использованием современного экспериментального оборудования, независимых методов исследования: просвечивающей электронной микроскопии, растровой электронной микроскопии, просвечивающей растровой электронной микроскопии, электронной дифракции, энергодисперсионного анализа, рентгеноструктурного анализа. Интерпретация полученных данных базируется на современных представлениях о процессах формирования и механизмах роста нанопроволок. Разработанное техническое решение способа получения нанопроволок никеля было запатентовано: выдан патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в работу состоит в исследовании процессов получения нанопроволок и структур на их основе, разработке модели роста исследуемых наноструктур, исследовании их морфологии, структуры, элементного состава методами растровой электронной микроскопии с приставкой для элементного анализа и рентгеноструктурного анализа включая пробоподготовку; разработке режимов электроосаждения для получения слоевых нанопроволок с регулируемой и постоянной толщиной слоев, а также методик для селективного травления гетероструктурных нанопроволок для получения взвеси калиброванных магнитных наночастиц; участии в подготовке и проведении исследований магнитных и электрических свойств массивов получаемых нанопроволок, взвеси наночастиц и структур на их основе; проведении анализа полученных результатов; формулировке выводов по диссертационной работе.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. 2017 Materials Research Society Spring Meeting and Exhibit. Доклад «Fabrication of aligned carbon nanotubes and magnetic nanowires using porous polymer template», США, Феникс, 2017, 17 – 21 апреля.
2. Magnetism 2019. Доклад «Template synthesis and magnetic properties of two-component nanowires», Великобритания, Лидс, 2019, 8-9 апреля.
3. E-MRS 2019 Fall Meeting, 2019. Доклад « Nanowires of FeNi and FeCo alloys: matrix synthesis and structure», Польша, Варшава, 2019, 16 – 19 сентября.
4. International Conference on Materials for Energy Applications (ICME-18). Доклад «Template synthesis of heterostructural nanowires Cu/Ni», Индия, Джайпур, 2018, 6 – 8 декабря.
5. The 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019). Доклад «Characterization of nanowires of FeNi and FeCo alloys», Россия, Москва, 2019, 10-14 октября.
6. International Baltic Conference on Magnetism 2021. Доклад «FeNi and FeCo alloys nanowires: synthesis, structure and magnetic properties», Россия, Светлогорск, 2021, 29 августа – 2 сентября.
7. Международная конференция по нанофизике и наноэлектронике 2018. Доклад «Получение слоевых нанопроволок, исследование их структуры и магнитных свойств». Россия, Нижний Новгород, 2018, 12 – 15 марта.
8. Международная конференция по нанофизике и наноэлектронике 2019. Доклад «Структура многослойных нанопроволок с чередованием магнитного и немагнитного металлов». Россия, Нижний Новгород, 2019, 11 – 14 марта.
9. Международная конференция по нанофизике и наноэлектронике 2020, Нижний Новгород, Россия. Доклад «Нанопроволоки FeNi и FeCo: синтез, структура и Мёссбауровские спектры». Россия, Нижний Новгород, 2020, 10 – 13 марта
10. XXVII Международная конференция «Радиационная физика твёрдого тела». Доклад «Применение трековых матриц для получения гетероструктурных нанопроволок Ni/Cu». Россия, Севастополь, 2017, 10 - 15 июля.

11. XXVIII Международная конференция «Радиационная физика твёрдого тела». Доклад «Применение ядерных фильтров для получения слоевых нанопроволок». Россия, Севастополь, 2018, 9 - 14 июля.
12. XXIX Международная конференция «Радиационная физика твёрдого тела». Доклад «Электро-химическое заполнение ядерных фильтров (трековых мембран) для получения нанопроволок переменного состава». Россия, Севастополь, 2019, 8 - 13 июля.
13. XXX Международная конференция «Радиационная физика твёрдого тела». Доклад «Матричный синтез и исследование нанопроволок из сплава FeNi». Россия, Севастополь, 2020, 7 - 12 июля.

Список опубликованных статей по теме диссертации

Основные положения по теме диссертации изложены в 6 публикациях, проиндексированных в международной системе Scopus:.

1. Structure of Cu/Ni Nanowires Obtained by Matrix Synthesis // O. M. Zhigalina, I. M. Doludenko, D. N. Khmelenin, D. L. Zagorskiy, S. A. Bedin, I. M. Ivanov / Crystallography Reports, 2018, Vol. 63, No. 3, pp. 480–484. DOI: 10.1134/S1063774518030379 (Q3);
2. Structure and Magnetic Properties of Nanowires of Iron Group Metals Produced by Matrix Synthesis // Zagorskiy D.L. ; Frolov K. V.; Bedin S. A.; Perunov I. V.; Chuev M. A.; Lomov A. A.; Doludenko I. M. / Physics of the solid state. Vol. 60, No. 11 pp. 2115-2126 (2018) DOI: 10.1088/1742-6596/1134/1/012071 (Q3);
3. Specific Features of Obtaining of Metal Nanowires by Replication of Pores of Track Etched Membranes // D. Zagorskiy, I. Doludenko, A. Shatalov/ Key Engineering Materials, 2018, Vol. 781, pp. 170-175. (DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.781.170>) IF: 0.39 (Q3);
4. Fabrication of Cylindrical Magnetic Nanoparticles for Functionalization of Polyelectrolyte Microcapsules // I. M. Doludenko, A. V. Mikheev, I. A. Burmistrov, D. B. Trushina, T. N. Borodina, T. V. Bukreeva, D. L. Zagorskii / Technical Physics, 2020, Vol. 65, No. 9, pp. 1377–1383. DOI: 10.1134/S1063784220090121 (Q3);
5. I. M. Doludenko. Aspects of Pore Filling in Synthesis of FeNi Alloy Nanowires Using Track-Etched Membranes / I.M. Doludenko // Inorganic Materials: Applied Research, 2022, Vol.13, No.2, pp. 531-535 DOI: 10.1134/S2075113322020125 (Q2);

6. I.M. Doludenko, I.S. Volchkov, B.A. Turenko, I.O. Koshelev, P.L. Podkur, D.L. Zagorskiy, V.M. Kanevskii, Electrical properties arrays of intersecting of nanowires obtained in the pores of track membranes, *Materials Chemistry and Physics* (2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126285>(Q2).

Объект интеллектуальной собственности

Долуденко И.М., Загорский Д.Л., Трушина Д.Б., Бурмистров И.А. Способ получения наностержней никеля с регулируемым аспектным отношением. Патент на изобретение № 2724264, 22.06.2020.

Заключение

В диссертационном исследовании получены следующие результаты:

- разработан новый способ получения гомогенных наноструктур с высоким (до 150 единиц) аспектным отношением, состоящих из магнитных сплавов Fe-Ni и Fe-Co, отличающийся возможностью контролируемо регулировать состав сплавов с шагом в 10%;
- определены зависимости состава нанопроволок от состава электролита; при исследовании нанопроволок из сплавов Fe-Ni обнаружен эффект аномального (до 35%) электроосаждения ионов железа в поры матрицы, в отличие от наноструктур из сплавов Fe-Co где данный эффект не превышает 5%; наблюдаемый эффект зависит от состава электролита и усиливается с увеличением количества ионов железа в электролите;
- при исследовании влияния электрического потенциала осаждения на элементный состав массива нанопроволок установлено, что для сплавов Fe-Ni снижение электрического потенциала (от 1,5 до 1,0 В) приводит к увеличению на 10-20% количества атомов Fe в нанопроволоках; данный эффект усиливается с понижением относительной концентрации ионов Fe²⁺ в электролитах; предложен физический механизм эффекта;

- при определении характера распределения элементов в полученных нанопроволках установлено, что в случае сплавов Fe-Co оно равномерное, в то время как в Fe-Ni количество железа на конечном этапе роста нанопроволок больше, чем на начальном этапе; величина данного эффекта возрастает с понижением электрического потенциала осаждения;
- выявлены закономерности изменения электрических свойств массивов наночастиц в зависимости от их аспектного соотношения (X); установлено уменьшение на порядок величины (от 10^6 до 10^5 Ом) электросопротивления металл-полимерного композита на основе получаемых наночастиц с увеличением X от 20 до 70 единиц;
- получены зависимости электросопротивления металлполимерного композита от степени заполнения матрицы сплавом Fe₂₀Ni₈₀; выполнены расчеты вероятности пересечения пор и, соответственно, нанопроволок в матрице в зависимости от степени её заполнения; обнаружена корреляция экспериментальных и расчетных данных;
- разработан новый метод получения и контроля толщины (30-500 нм) слоев гетероструктурных нанопроволок, отличающийся возможностью формирования слоев (медь / никель, медь / кобальт) с сохранением структурных и геометрических параметров вдоль всей длины нанопроволоки;
- Выявлены закономерности изменения электрокинетического потенциала (дзета-потенциала) взвеси цилиндрических магнитных наночастиц (ЦМНЧ) в зависимости от их аспектного соотношения. При этом установлено, что изменение электрокинетического потенциала обратно пропорционально увеличению аспектного соотношения ЦМНЧ;
- разработан метод разделения гетероструктурных нанопроволок по медному слою для получения взвеси цилиндрических магнитных наночастиц калиброванного размера (от 30 до 500 нм в длину); способ

получения наностержней никеля с регулируемым аспектным отношением защищены патентом; данные частицы могут применяться в медицине в качестве компонентов полиэлектролитных микрокапсул для локальной доставки лекарств высокой токсичности.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

- Полученные металл-полимерные композиты или отдельные нанопроволоки могут быть рекомендованы к использованию при создании сенсоров, источников электромагнитных волн, а также в качестве элементов гибкой микроэлектроники и спинтроники;
- Цилиндрические магнитные наночастицы могут применяться в медицине в качестве компонентов полиэлектролитных микрокапсул для локальной доставки в организм пациента лекарств высокой токсичности и как компоненты для магнитного нагрева.

В дальнейших исследованиях предполагается оценить влияние геометрии расположения пор и их плотность на электрические свойства металл-полимерных композитов, а также получить зависимость их магнитных свойств от степени заполнения. Кроме того, планируется отработать методики модификации получаемых металл-полимерных композитов магниточувствительными компонентами для улучшения их сенсорных свойств и создания логических ячеек. В рамках развития направления исследований ЦМНЧ предполагается проведение экспериментов по вскрытию полиэлектролитных микрокапсул с внедренными магнитными частицами в организме пациента, а также опробование возможности усовершенствования процессов внедрения частиц за счет подбора материала и внешних воздействий.

Список используемой литературы

- [1] Masuda H., Fukuda K., Quantitative characterization of acid concentration and temperature dependent self-ordering conditions of anodic porous alumina, [текст]// Science. V. 268 1995. P. 1466.
- [2] 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, [текст] // Письма в ЖЭТФ, том 99. выпуск 10. 2014, С. 656.
- [3] Ohgai T. Electrodeposited Nanowires and Their Applications / Ed. Lupu N. InTech: 2010. 61 p.
- [4] Pyatkov E. S. , Berekchiyan M. V., Yeliseyev A. A., Lukashin A. V., Petukhov D. I., Solntsev K. A., Electrochemical Detection of Barrier Layer Removal for Preparation of Anodic Alumina Membranes with High Permeance and Mechanical Stability [текст]// Inorganic Materials: Applied Research V. 9 2018, P. 82.
- [5] Switzer J. A., Hodes G., Electrodeposition and chemical bath deposition of functional nanomaterials [текст]// Annu. MRS Bulletin V.35, 2010, Issue 10: Electrodeposition and Chemical Bath Deposition of Functional Nanomaterials , pp. 743 - 750
- [6] Alonso J., Khurshid H., Sankar V., Nemati Z., Phan M.H., Garayo E., Garcia J.A., Srikanth H., FeCo nanowires with enhanced heating powers and controllable dimensions for magnetic hyperthermia, [текст]// J. Appl. Phys., V.117 (17), 2015, 17D113.
- [7] Elbaile L., Crespo R.D., Vega V., Garcia J.A., [текст]// J. Magnetostatic Interaction in Fe-Co Nanowires, Nanomater. V. 13, 2012, 198453.
- [8] Atalay F.E., Kaya H., Atalay S., Tari S, Influences of deposition time and pH on magnetic NiFe nanowires fabrication. [текст]// J. Alloys Compound, V. 469, 2009, 458.
- [9] Ovchinnikova S. N., Poddubnyi N. P., Maslii A. I., Boldyrev V. V., Schwarzacher W., Mutual Influence of Electrode Processes during Electrodeposition of Layered Structures by the Single-Bath Method: The Effect of Nickel Deposition and Hydrogen Evolution on the Transport of Copper Ions in Acetate and Sulfamate Electrolytes [текст] // Russian Journal of Electrochemistry, V. 38, 2002. pp. 1210–1216
- [10] Piraux L., George J. M., Despres J. F., Leroy C., Ferain E., Legras R., Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires [текст]// Appl. Phys. Lett. 65,1994. P. 2484

- [11] Doludenko I.M., Volchkov I.S., Turenko B.A., Koshelev I.O., Podkur P.L., Zagorskiy D.L., Kanevskii V.M., Electrical properties arrays of intersecting of nanowires obtained in the pores of track membranes [текст] // Materials Chemistry and Physics 287, 2022, P. 126285.
- [12] Долуденко И. М., Особенности заполнения пор трековых мембран при синтезе нанопроволок из сплава FeNi [текст] // Перспективные материалы № 8. 2021, С. 74.
- [13] 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 [текст] // Физика твердого тела, Т 60 выпуск 11, 2018, С. 2075.
- [14] Долуденко И.М., Михеев А.В., Бурмистров И.А., Трушина Д.Б., Бородина Т.Н., Букреева Т.В., Загорский Д.Л., Получение цилиндрических магнитных наночастиц для функционализации полиэлектролитных микрокапсул. [текст] // Журнал технической физики, том 90, вып. 9., 2020 P 1435.