

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

УДК 620.3:661.666.23

**ШАРЕЙКО**  
Максим Валерьевич

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАССИВОВ НАНОЧАСТИЦ И  
НАНОШНУРОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
магистерской диссертации на соискание степени  
магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы»

---

Научный руководитель  
Канд. физ.-матем. наук, доцент  
Данилюк А.Л.

---

Минск 2024

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Данилюк Александр Леонидович**,  
Кандида физико-математических наук,  
доцент кафедры микро- и наноэлектроники  
учреждения образования «Белорусский  
государственный университет информатики  
и радиоэлектроники»

Рецензент: **Завадский Сергей Михайлович**,  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
электронной техники и технологии  
учреждения образования «Белорусский  
государственный экономический  
университет»

Защита диссертации состоится «25» января 2024 г. года в 9<sup>00</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 114, тел.: 293-89-26, e-mail: [kafme@bsuir.by](mailto:kafme@bsuir.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитные нанокompозиты, состоящие из наночастиц магнитного материала, диспергированного на поверхности твердого тела, в последние годы привлекают повышенное внимание из-за их потенциальных применений в спинтронике, биомедицине и электронике. Они отличаются новыми функциональными свойствами. К ним относятся массивы углеродных нанотрубок (УНТ) на поверхности кремния или оксида кремния, а также массивы наночастиц и нанопроволок на поверхности диэлектриков, металлов, а также графена. Важной проблемой является понимание природы магнитного взаимодействия между наночастицами, роль матрицы и подложки, которые могут влиять на эти взаимодействия. Для массива УНТ с интеркалированными магнитными наночастицами или нанопроволоками, возникает возможность косвенного обменного взаимодействия в случае наличия ориентации в направлении УНТ. Магнитные наночастицы и нанопроволоки размером менее десятки нанометров могут быть получены путем применения различных методов, таких, как соосаждение, термическое разложение, метод эмульсии, гидротермальный синтез, выпаривание, совместное напыление, лазерная абляция в жидкости, электрохимическое осаждение и т.д.

С другой стороны, необходимо точно контролировать стехиометрию наночастиц в нанокompозите, их форму, а также среднее расстояние между ними. С этой точки зрения, магнитные нанокompозиты очень перспективны.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Исследования магнитных свойств массивов УНТ содержащих ферромагнитные наночастицы и нанопроволоки в настоящее время не теряет актуальность в связи с достижениями современной технологии и перспективами применения таких массивов для создания элементов углеродной спинтроники и оптоэлектроники с повышенной эффективностью и быстродействием. Свойства массивов УНТ, содержащих ферромагнитные наночастицы и нанопроволоки железа, цементита, кобальта, а также их сплавов в том числе с немагнитными материалами (CoFe, CoPt), продолжают активно исследоваться для создания спиновых вентилей, эмиттеров электронов, фотодетекторов. Параллельно с экспериментальными и физическими методами исследования необходимо наличие работ по моделированию, чтобы проложить путь для использования таких массивов в интегральных приложениях.

**Степень разработанности проблемы.** В настоящее время модели, описывающие магнитные свойства массивов УНТ, содержащих ферромагнитные наночастицы и наношнурвы, основаны в основном на приближениях, которые характеризуют соотношение между обменным взаимодействием и магнитной анизотропией как превалирование одного из них. Это или превалирование вклада магнитной анизотропии, сводящееся к закону Акулова, или превалирование вклада обменного взаимодействия, сводящегося к закону  $3/2$ . Однако, как показали измерения магнитных свойств, часто соотношения между обменом и анизотропией не сводятся к указанным приближениям. В этой связи приходится использовать более сложные подходы, один из которых основан на интегральной форме, определяющей соотношение между обменом и анизотропией. Также необходимо учитывать, что с точки зрения применения, любая модель магнитного материала, тем более такого как массив УНТ, которая учитывает только внутренние характеристики, редко согласуются с реальной производительностью устройства. Следует учитывать эффекты, которые имеют решающее значение для углеродных материалов, чтобы сделать модели полезными и актуальными для разработчиков реальных устройств обработки и хранения информации. Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе модификации интегрального выражения для закона приближения к намагниченности насыщения для ориентированных массивов УНТ.

**Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики.** Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники и в Центре 4.11 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за время обучения в магистратуре. Основные результаты получены в рамках выполнения задания республиканской программы научных исследований (ГПНИ): Задание № 3.15 «Разработка научных и технологических основ создания спинтронных элементов обработки информации на кремнии», подзадание «Спинтронные элементы обработки информации на основе кремниевых гетероструктур» ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника» (ГБЦ 21-3103). Задание № 2.13 «Гранулярные и мультислойные пленочные наноструктуры, совместимые с планарной кремниевой технологией», НИР «Модели обменных и спин-орбитальных взаимодействий в нанокompозитах на основе графена», ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и

технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»))» (ГБЦ 21-3015).

**Цели и задачи исследования.** Цель работы: состоит в моделировании магнитных свойств массивов УНТ, содержащих наночастицы железа и цементита, а также нанопроволоки кобальта, оценка полей обмена и анизотропии, поиск зависимости приближения к намагниченности насыщения, определение корреляционных функций осей магнитной анизотропии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести анализ экспериментальных данных по измерению магнитных свойств массивов углеродных нанотрубок (УНТ) и нанопроволок кобальта модифицировать методику их интерпретации в рамках модели случайной анизотропии.
- провести обработку экспериментальных данных по измерению магнитных свойств массивов УНТ и нанопроволок кобальта в рамках модели случайной анизотропии и закона приближения к намагниченности насыщения.
- рассчитать корреляционные функции осей случайной анизотропии, значения полей анизотропии, обмена, температуру блокировки, обменную константу и константу эффективной анизотропии.

**Объектом** исследования являются массивы УНТ, содержащих ферромагнитные наночастицы и нанопроволоки.

**Предметом** исследования являются закономерности магнитных параметров при варьировании концентрации наночастиц и температуры.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 03 «Нанотехнологии и наноматериалы».

#### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли результаты предыдущих исследований отечественных и зарубежных ученых в области моделирования магнитных свойств массивов УНТ.

Математические расчеты по теоретической модели магнитных свойств УНТ осуществлены в пакете MathCad. Обработка полученных проводилась с использованием пакета Origin.

**Информационная база** исследования для интерпретации полученных результатов сформирована на основе расчетных данных.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в модификации модели для расчета полей обмена и анизотропии массива УНТ на основе интегрального выражения для закона приближения к

намагниченности концентрации, а также получении новых закономерностей, определяющих самосогласованную взаимосвязь таких магнитных параметров, как температура блокировки, константа обменного взаимодействия, константа Блоха при варьировании концентрации и температуры.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующий основной результат: при локализации наночастиц внутри УНТ возникает особая корреляция магнитных осей наночастиц – когерентная магнитная анизотропия, обусловленная влиянием ориентации осей УНТ. С ростом концентрации наночастиц, когда они начинают локализоваться снаружи УНТ и внутри стенок УНТ, когерентная магнитная анизотропия исчезает и обменное взаимодействие между наночастицами начинает доминировать. В нанопшнурках кобальта (диаметр 20 нм, длина 100 нм), синтезированных внутри углеродных нанотрубок, наряду с магнитной анизотропией формы и кристаллографической анизотропией, возникает вклад магнитоупругой анизотропии порядка  $(4 - 6)10^5$  Дж/м<sup>3</sup>, сравнимый с вкладом анизотропии формы, что приводит к изменению распределения намагниченности нанопшнурков от однодоменной, ориентированной вдоль оси нанопшнура, к двухдоменной, когда намагниченность доменов ориентирована перпендикулярно оси нанопшнура.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к определению магнитных параметров массивов УНТ, содержащих ферромагнитные наночастицы и нанопшнуры, основанный на синтезе интегрального выражения для закона приближения к намагниченности насыщения и модели случайной анизотропии, что позволило выявить наличие колебательных корреляционных функций, характеризующих оси случайной магнитной анизотропии и определить магнитные параметры не зависимо от соотношения между полем обмена и анизотропии.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что полученные концентрационные и температурные закономерности магнитных параметров массивов УНТ могут служить основой для разработки элементов обработки информации с использованием углеродных материалов.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Во время работы над диссертацией соискателем были изучены имеющиеся модели, описывающие свойства массивов УНТ, проведена модификация интегрального выражения для закона приближения к намагниченности насыщения. Разработка подхода по

моделированию магнитных параметров массивов УНТ проводилась совместно с научным руководителем, кандидатом физико-математических наук, доцентом Данилюком А. Л.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных конференциях: 59-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 17-21 апреля 2023 г. БГУИР; а также опубликованы в виде соответствующих тезисов и материалов конференций.

**Публикации.** Основные положения работы и результаты диссертации изложены в двух опубликованных работах общим объемом 0.2 п.л.

**Структура и объем диссертации.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 62 страниц. Работа содержит 1 таблиц, 39 рисунков и одно приложение. Библиографический список включает 36 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено современное состояние исследований магнитных свойств массивов УНТ, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В общей характеристике работы сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В первой главе описаны методы синтеза и магнитные свойства массивов УНТ с ферромагнитными наночастицами. Рассмотрены особенности синтеза методом ХПО и магнитных свойств массивов ориентированных углеродных нанотрубок. Проведен анализ экспериментальных данных и их теоретического описания, исследованы зависимости высоты массива УНТ от концентрации ферроцена в реакционной смеси, исследованы зависимости диаметра УНТ от концентрации ферроцена в реакционной смеси.

Во второй главе рассмотрены корреляционные функции осей магнитной анизотропии и магнитные параметры УНТ, закон приближения к

намагниченности насыщения. Приводится методика анализа магнитных параметров массивов УНТ по закону приближения к намагниченности насыщения, проведен анализ экспериментальных результатов измерения магнитных свойств массивов УНТ. Рассмотрена модель случайной анизотропии, а также микромагнитные параметры. Проведена модификация интегрального закона приближения к насыщению и определены характерные корреляционные функции. Приведены результаты расчетов полей обмена и анизотропии, корреляционных функций массивов УНТ, характеризующие магнитную анизотропию, приведены рассчитанные магнитные параметры массивов УНТ и сравнение с экспериментальными.

Приведены результаты моделирования косвенного обменного взаимодействия типа РККИ в УНТ между ферромагнитными наночастицами путем расчета спиновой восприимчивости в направлении вдоль УНТ в зависимости от диаметра УНТ, хиральности, константы СОВ, энергии Ферми.

В третьей главе представлены результаты моделирования влияния магнитной анизотропии на магнитные свойства плотноупакованных наночастиц кобальта, встроенных в УНТ. Приведен анализ вкладов магнитной анизотропии в магнитные свойства массива УНТ, выявлено влияние магнитоупругой анизотропии. Проведенное моделирование магнитной структуры нанопроволок  $\text{Co}$ , из которого следует, что при наличии магнитоупругой составляющей нанопроволоки могут быть разделены на домены, что приводит к снижению остаточной намагниченности и коэрцитивной силы, а также к изотропии магнитных свойств. Представлены результаты моделирования распределения намагниченности нанопроволок сплавов  $\text{CoFe}$  и  $\text{CoPt}$ , а также никеля с учетом вклада магнитоупругой анизотропии.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации проведено изучение влияния концентрации наночастиц железа на магнитные свойства массивов углеродных нанотрубок. Для достижения указанной цели проведены аналитические исследования методов синтеза массивов углеродных нанотрубок. Исследовано влияние концентрации ферроцена на магнитные свойства массивов углеродных нанотрубок, проведен анализ и оценка обменного взаимодействия и вклада анизотропии, рассмотрен закон приближения к намагниченности насыщения.

Определено влияние концентрации наночастиц железа и кобальта на магнитные свойства ориентированных массивов углеродных нанотрубок.



Рассмотрен вклад кристаллической, магнитоупругой и магнитодипольной анизотропий, а также анизотропии формы в общую анизотропию. Изучены магнитные свойства массивов УНТ Рассмотрены корреляционные функции.

Показано, что при локализации наночастиц внутри УНТ возникает особая корреляция магнитных осей наночастиц – когерентная магнитная анизотропия, обусловленная влиянием ориентации осей УНТ.

Были проведены расчеты и исследованы соотношения между обменным взаимодействием и магнитной анизотропией для различных концентраций наночастиц железа и кобальта в ориентированных массивах углеродных нанотрубок.

Показано, что для концентрации ферроцена 0,5 мас% корреляционная функция имеет ступенчатый характер (ширина ступеньки составляет около 400 нм) и описывается функцией, аналогичной функции Ферми-Дирака.

Результат моделирования углеродных нанотрубок с наночастицами кобальта показывает, что намагниченность наношнуров Co сильно зависит от величины магнитоупругой анизотропии. При отсутствии магнитоупругого напряжения, намагниченность наношнуров Co является однородной и ориентированной вдоль оси Z. Наличие магнитоупругих напряжений разбивает наношнур на 2 домена. Наночастицы Co внутри углеродных нанотрубок магнитно изолированы. Причиной незначительного влияния диполь-дипольного взаимодействия является магнитная анизотропия. Влияние напряжений на магнитную структуру включений Co было исследовано с помощью микромагнитного моделирования, которое помогло нам определить вероятное направление гексагональной оси, ориентированной перпендикулярно оси углеродных нанотрубок.

Показано, что намагниченность наношнуров Co сильно зависит от величины магнитоупругой анизотропии. При отсутствии магнитоупругого напряжения, намагниченность наноцилиндра Co является однородной и ориентированной вдоль оси наношнура. Наличие магнитоупругих напряжений порядка 0.4-0.5 МДж/м<sup>2</sup> разбивает наноцилиндр на два домена. Ориентация намагниченности внутри домена ориентирована перпендикулярно оси наношнура. Проведенное моделирование магнитной структуры наношнуров Co следует рассматривать как результаты оценки, показывающие, что с учетом магнитоупругой компоненты наношнуры Co могут быть разделены на домены.

Проведенное моделирование для наношнуров CoFe, CoPt, никеля показало, что при наличии упругих напряжений магнитная структура может изменяться. В данном случае происходит переход из перпендикулярного z-состояния в радиальное состояние намагниченности при наличии

напряжений, сжимающих наноцилиндр перпендикулярно его оси. Выявленные закономерности перехода намагниченности из перпендикулярного в радиальное состояние определяются размерами наноцилиндра и его аспектным отношением. Установлено, что с ростом аспектного отношения растет пороговая величина перехода наноцилиндра никеля из перпендикулярного в радиальное магнитное состояние.

Результаты, выводы и предложения являются перспективными для разработки спинтронных приборов и устройств, в частности элементов магнитной памяти, а также детекторов и генераторов электромагнитного излучения.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

[1-А] М.В. Шарейко. Дальнодействующее обменное взаимодействие в углеродных нанотрубках с наночастицами железа. 59-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Радиотехника и электроника. Сборник материалов конференции. Апрель 2023. Минск, БГУИР. – С. 142-143

[2-А] Е.С. Назаренко, М.В. Шарейко. Магнитные свойства массива углеродных нанотрубок с наночастицами железа и цементита. Технические средства защиты информации : тез. Докл. XXI Белорусско-российской науч.-техн. Конф. (Республика Беларусь, Минск, 6 июня 2023 года) / редкол. : Т. В. Борботько [и др.]. – Минск : БГУИР, 2023. – С. 62-63.