

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Симаковой Софьи Сергеевны «Исследование наноструктурированных ферромагнитных пленок методом компьютерного моделирования», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Симаковой С.С. посвящена исследованию магнитных свойств тонких ферромагнитных пленок с решеткой пор (антидотов). Данные наноструктурированные материалы имеют высокие шансы их применения в устройствах наноэлектроники. Их особенностью является возможность управления магнитными свойствами путём варьирования геометрических параметров. Известно, что тонкие ферромагнитные пленки в достаточной мере востребованы в новых устройствах спинтроники, основанных на явлении гигантского магнитосопротивления. Они позволяют создавать поляризованный поток электронов, которым в дальнейшем можно управлять с помощью спиновой фильтрации. Основным преимуществом таких пленок является низкое энергопотребление при переключении направления намагниченности, что позволяет управлять их состоянием с помощью слабых магнитных полей. Одним из распространенных решений являются сэндвич-системы, построенные из нескольких слоев пленок с различными магнитными свойствами. Поэтому способы регулирования магнитных свойств тонких пленок является актуальной задачей.

На сегодняшний день разработан ряд технологий, позволяющий получать пленки с решеткой антидотов, обладающих заданными параметрами. Такие технологии дают возможность создавать магнитные материалы с заданными значениями намагниченности, коэрцитивной силы и энергии перемагничивания. Однако проведение экспериментальных исследований в широком диапазоне параметров решетки пор является задачей, требующей задействования значительных вычислительных мощностей, что приводит к большим затратам. В связи с этим актуальной является задача выявления общих закономерностей теоретическими методами. Один из таких подходов основан на компьютерном моделировании методом Монте-Карло, в котором используются решёточные модели. Метод компьютерного моделирования хорошо зарекомендовал себя при изучении фазовых переходов в магнитных системах.

Таким образом результаты диссертационной работы актуальны для развития новых направлений спинтроники и имеют прикладное значение.

Общая характеристика содержания диссертации

Диссертация содержит 125 страниц, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Первая глава носит обзорный характер, в ней представлены основные сведения о магнитных свойствах ферромагнитных пленок с решетками пор и методе Монте-Карло для моделирования магнитных материалов.

В следующих трех главах изложены результаты исследований соискателя. Все исследования проведены методом компьютерного моделирования Монте-Карло в рамках модели Изинга.

Во второй главе исследованы фазовые переходы в ферромагнитных пленках с регулярной решеткой пор. Рассматриваются пленки с порами квадратной формы, расположенными в узлах квадратной решетки. Получена зависимость температуры Кюри от размера пор и периода решетки. Наряду со случаем квадратных пор, рассмотрены и поры треугольной формы. Показано, что форма пор слабо влияет на точку фазового перехода. Также установлено, что слабый беспорядок в расположении пор не оказывает влияние на температуру Кюри и критические индексы системы. Кроме того, изучен процесс перемагничивания пленок с решеткой пор в ферромагнитной фазе. Получена зависимость коэрцитивной силы и энергии перемагничивания от периода решетки пор.

Третья глава посвящена исследованию магнитных свойств бислойных пленок с решеткой пор. Рассмотрены системы, включающие магнитотвердый и магнитомягкий слой. Исследован фазовый переход в таких пленках при различных отношениях обменных интегралов и толщинах слоев. Показано, что температура фазового перехода определяется магнитотвердым слоем и параметрами решетки пор. Исследован процесс перемагничивания бислойных пленок, и выявлено влияние размера пор и периода решетки на коэрцитивную силу. Определены условия минимума коэрцитивной силы и энергии перемагничивания. Проведено сравнение с данными по перемагничиванию бислойных пленок, полученных в реальном эксперименте.

В четвертой главе рассмотрено влияние поверхностного магнетизма на свойства ферромагнитных пленок с решеткой пор. Исследованы пленки различной толщины с различными параметрами решетки пор. Построены фазовые диаграммы пленок. Определены условия, при которых решетка пор подавляет поверхностное упорядочивание спинов при парамагнитном

состоянии основного объема пленки и делает невозможным поверхностный фазовый переход. Исследован процесс перемангничивания ферромагнитных пленок с решеткой пор с учетом явления поверхностного магнетизма. Показано, что при различном значении поверхностного обменного интеграла может наблюдаться как уменьшение, так и увеличение коэрцитивной силы при возрастании размера пор. Выявлены условия, при которых решетка пор не оказывает влияния на коэрцитивную силу пленки. Проведено сравнение с данными реального эксперимента.

В Заключение обобщены основные результаты диссертационного исследования.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Обоснованность и достоверность основных выводов и положений

Основные положения и выводы работы являются обоснованными, они базируются на физически обоснованных теоретических моделях и методах компьютерного моделирования ферромагнитных материалов. Для компьютерного моделирования применяются хорошо апробированные метод Монте-Карло, алгоритм Метрополиса и теория конечно-размерного скейлинга. Результаты расчетов сопоставляются с данными реального эксперимента.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 11 изданиях, из них 5 статей в журналах, включенных ВАК в Перечень ведущих рецензируемых журналов и индексируемых в Российских и международных базах цитирования, 6 публикаций в материалах конференций.

Новизна исследований и полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации

Научная новизна результатов диссертации состоит в получении ряда результатов методом компьютерного моделирования Монте-Карло, наибольший интерес из которых представляют следующие:

1. Проведен расчет и анализ фазовых диаграмм наноструктурированных ферромагнитных пленок с регулярной решеткой пор. Получены зависимости температуры фазового перехода и критических индексов от размеров пор и периода их расположения.

2. Исследованы фазовые переходы в бислойных ферромагнитных пленках с решеткой пор. Исследованы как фазовые диаграммы таких материалов, так и процесс их перемангничивания в ферромагнитном состоянии. Показано, что значение температуры Кюри определяется

магнитотвердым слоем. Влияние магнитомягкого слоя проявляется в форме и размере петли гистерезиса. Изучено влияние размеров и периода решетки пор как на температуру фазового перехода, так и на коэрцитивную силу и энергию перемагничивания.

3. Исследовано влияние поверхностного магнетизма на магнитные свойства ферромагнитных пленок с решеткой пор. Показано, что увеличение свободной поверхности, создаваемое решеткой пор, изменяет фазовую диаграмму системы, снижая разность между поверхностной и объемной температурами Кюри.

4. Влияние поверхностного магнетизма на процесс перемагничивания тонких ферромагнитных пленок может привести к увеличению коэрцитивной силы с ростом размера пор.

Научная значимость полученных автором диссертации результатов

Теоретическая значимость диссертации состоит в развитии теории магнитных явлений в наноструктурированных ферромагнитных материалах.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в возможности использования результатов работы при планировании экспериментов и разработки материалов с заданными магнитными характеристиками.

Исследования, проведенные в диссертации, поддержаны Российским Научным Фондом, грант № 23-29-00108 (2023-2024гг).

Замечания по работе

1. В главе 2 на странице 37 указано, что критические индексы не зависят от наличия решетки антидотов и совпадают со значениями для сплошной пленки. При этом на странице 48 показано, что критические индексы изменяются по ступенчатому закону. С чем связано такое противоречие утверждений в разных частях диссертации?

2. В разделе 2.4 исследуется влияние случайного смещения пор из узлов квадратной решетки на магнитные свойства пленки. При этом не указано максимально допустимая величина такого смещения.

3. Петли гистерезиса бислойных пленок в разделе 3.3 имеют ярко выраженный изгиб при отсутствии решетки пор, тогда как увеличение размера пор снижает данное искажение. Необходимо объяснить физические причины такого изменения формы петли гистерезиса.

4. В разделе 4.2 для определения температуры Кюри вычислялась зависимость четырех различных величин от температуры. Необходимо пояснить каким образом находилась точка фазового перехода, если эти методы показывали не согласованные друг с другом значения.

Заключение

В целом, несмотря на указанные замечания, представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая может рассматриваться как научное достижение, состоящее в существенном вкладе в развитие теории магнитных явлений в наноструктурированных материалах.

Диссертация Симаковой Софьи Сергеевны «Исследование наноструктурированных ферромагнитных пленок методом компьютерного моделирования» является законченным научным исследованием, обладающим научной новизной и практической значимостью, что соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 18.03.2023 г), а её автор – Симакова Софья Сергеевна заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 Теоретическая физика.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой теоретической физики
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий», д.ф.-
м.н., профессор

Вам Вахитов Роберт
Миннисламович

Рабочий почтовый адрес: 450076, г. Уфа, ул. 3.
Валиди, 32,

Рабочий телефон: +7(347)229-96-45,

e-mail: VakhitovRM@uust.ru, vakhitovrm@yahoo.com

Докторская диссертация защищена по
специальности:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

«28» августа 2026 г.

