

Директор
Дагестанского федерального
исследовательского центра
Российской академии наук,
академик РАН, д.ф.-м.н.
А.К. Муртазаев

Дагестанского федерального

Исследовательского центра

Российской академии наук,

академик РАН, д.ф.-м.н.

А.К. Муртазаев



2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанский федеральный исследовательский центр Российской академии наук о диссертационной работе Симаковой С.С. «Исследование наноструктурированных ферромагнитных пленок методом компьютерного моделирования», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Актуальность **темы** **диссертационной** **работы.**

Наноструктурированные ферромагнитные пленки являются перспективными искусственными материалами, применяемыми при производстве устройств спиновой электроники. Главной особенностью данных материалов является возможность управления их магнитными свойствами с помощью изменения геометрических параметров. Современные технологии позволяют выполнять наноструктурирование тонких пленок с высокой точностью в широком диапазоне геометрических размеров. Наибольшее распространение получили тонкие пленки с регулярной решеткой пор. Поры в таких решетках располагаются в узлах регулярной сетки и имеют одинаковую форму и размеры. Технологические процессы позволяют получать решетку пор с различным периодом и размером отверстий. Такие пленки применяются для

управления спинполяризованным током в устройствах, использующих эффект гигантского магнитосопротивления.

Как показывают экспериментальные исследования размеры пор и период решетки оказывают влияние на температуру Кюри пленки, коэрцитивную силу и энергию перемагничивания ферромагнитных пленок. Влияние решетки пор определяется не только параметрами решетки, но и материалом, из которого изготовлена пленка. При этом изучение основных закономерностей изменения магнитных свойств от параметров решетки пор требует большого объема опытных исследований и является дорогостоящим. В связи с чем активно применяются методы компьютерного моделирования.

Одним из широко распространенных подходов для исследования магнитных материалов служит метод Монте-Карло, применяемый к спиновым моделям. Алгоритм Метрополиса и теория конечно-размерного скейлинга позволяет исследовать свойства бесконечных систем на основе результатов, полученных для нескольких конечных размеров. Результаты такого моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

В связи с этим можно сделать вывод об актуальности задач, решаемых в диссертационном исследовании.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа изложена на 125 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, а также из списка цитированной литературы, включающего 122 источника.

Во введении описана актуальность работы, поставлена цель и выдвинуты задачи, аргументирована научная новизна и практическая значимость работы, а также сформулированы положения и результаты, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе приведен обзор экспериментальных результатов, полученных для наноструктурированных ферромагнитных пленок. Рассмотрены базовые подходы к моделированию ферромагнитных пленок

методом Монте-Карло с помощью алгоритма Метрополиса в рамках модели Изинга.

Вторая глава посвящена исследованию тонких ферромагнитных пленок с решеткой пор (антиточек) с помощью метода Монте-Карло. Получена зависимость температуры Кюри пленки от периода решетки при постоянном размере пор. Показано, что при малых периодах решетки температура фазового перехода растет по логарифмическому закону. Изучено влияние формы пор на критическую температуру. Показано, что малые случайные смещения отверстий решетки не влияют на ее магнитные свойства. Также изучен процесс перемангничивания тонких ферромагнитных пленок с решеткой пор. Увеличение периода решетки антиточек приводит к росту ширины петли гистерезиса. Найдена зависимость коэрцитивной силы от периода решетки и толщины пленки. Показано, что она растет по нелинейному закону. Вычислены критические индексы системы, которые совпадают со значениями для сплошных пленок при размере пор меньше некоторого порогового значения. При превышении порогового значения система относится к новому классу универсальности.

В третьей главе проведено исследование фазовых переходов и процессов перемангничивания в бислойных пленках с решеткой пор. Рассматриваются тонкие ферромагнитные пленки, состоящие из двух слоев с различными температурами Кюри. Моделирование таких систем осуществляется с помощью модели Изинга с изменяющимся обменным интегралом. Рассмотрены пленки с различным отношением обменных интегралов и различной толщиной слоев. Изучаются пленки с различными параметрами решетки антиточек. Показано, что общая температура фазового перехода определяется магнитотвердым слоем. Температура фазового перехода нелинейно растет с увеличением периода решетки пор и стремится к значению, характерному для сплошной пленки. Показано, что магнитомягкий слой искажает петлю гистерезиса системы. Выявлено, что зависимость коэрцитивной силы от отношения обменных интегралов имеет ярко

выраженный минимум, положение которого не зависит от решетки пор. Такая же зависимость наблюдается для энергии перемагничивания.

В четвертой главе проведено исследование влияния явления поверхностного магнетизма на фазовые переходы и процесс перемагничивания в ферромагнитных тонких пленках с решеткой пор. Решетка пор увеличивает площадь свободной поверхности, благодаря чему влияние поверхностного магнетизма усиливается по сравнению со сплошными пленками. Поверхностный магнетизм наблюдается при отличии значений обменного интеграла на поверхности и в объеме системы. При моделировании пленок вводится два параметра порядка, отвечающих за поверхностное и объемное намагничивание. С помощью компьютерного моделирования показано, что существует минимальная толщина пленки, начиная с которой в системе присутствует поверхностный фазовый переход. Добавление в пленку решетки пор снижает разность температур поверхностного и объемного фазовых переходов. Начиная с некоторого размера пор в системе не происходит поверхностный фазовый переход. Исследования процесса перемагничивания показывает, что при отношении обменных интегралов близких к единице решетка пор снижает коэрцитивную силу и энергию перемагничивания. При больших отношениях обменных интегралов коэрцитивная сила и энергия перемагничивания повышаются при добавлении решетки антиоточек. Существует значение обменных интегралов, при котором параметры решетки пор не влияют на коэрцитивную силу и энергию перемагничивания.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенного исследования.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации, не вызывает сомнений. Публикации выполнены совместно с научным руководителем, а также Белимом С.В. и Бычковым И.В. Автор принимал участие в постановке задач, разработке вычислительной программы, проведении компьютерного эксперимента и обработке его

результатов, а также в анализе полученных результатов, формулировке выводов и заключений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в исследовании наноструктурированных тонких ферромагнитных пленок методом моделирования Монте-Карло. Получены следующие научные результаты, обладающие научной новизной:

1. Исследованы фазовые переходы в тонких ферромагнитных пленках с регулярной решеткой пор, а также процесс их перемангничивания. Впервые теоретически проведен анализ зависимости вида фазовой диаграммы, как от параметров массива пор, так от их формы и слабого беспорядка в их расположении.

2. Исследованы фазовые переходы в тонких бислойных ферромагнитных пленках с регулярной решеткой пор, включающих магнитомягкий и магнитотвердый слои. Впервые теоретически изучены фазовые диаграммы и характеристики процесса перемангничивания при различном отношении обменных интегралов слоев пленки и различных параметрах массива пор.

3. Проведён учет влияния поверхностного магнетизма на фазовые переходы в тонких ферромагнитных пленках с регулярной решеткой пор. Впервые теоретически изучено влияние поверхностной магнитной энергии на фазовые диаграммы тонких ферромагнитных пленок с упорядоченным массивом пор. Впервые получены условия реализации поверхностного фазового перехода в наноструктурированных тонких пленках.

4. Изучено влияние поверхностного магнетизма на процесс перемангничивания тонких ферромагнитных пленок с регулярной решеткой пор. Впервые теоретически показано, что упорядоченный массив пор может приводить к повышению коэрцитивной силы тонких ферромагнитных пленок.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в теоретическом исследовании влияния регулярной решетки пор на фазовые переходы и магнитные явления в ферромагнитных пленках.

Получены общие закономерности изменения температуры фазового перехода, коэрцитивной силы и энергии перемангничивания при изменении параметров наноструктурированных ферромагнитных пленок. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Полученные результаты позволяют прогнозировать свойства тонких наноструктурированных ферромагнитных пленок на этапе проектирования.

Исследования поддержаны Российским Научным Фондом, грант № 23-29-00108.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена использованием хорошо апробированных методов моделирования ферромагнетиков, корректностью обработки результатов компьютерного эксперимента, а также сравнением с данными реального эксперимента.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Публикации и апробация результатов. Материалы диссертации опубликованы в 11 изданиях, из них 5 статей в журналах из списка, рекомендованного ВАК, 2 статьи в журналах, индексируемых в международных базах Scopus (Q2) и Web of Science, 6 публикаций в материалах конференций. Результаты диссертации достаточно полно опубликованы в научных изданиях.

Замечания по диссертации:

1. Во второй главе на странице 37 показано, что при малых периодах решетки зависимость температуры Кюри от периода решетки носит логарифмический характер. Необходимо пояснить до каких пределов выполняется эта зависимость и по какой причине она перестает выполняться для больших периодов.

2. Во второй главе на рисунке 2.9 показано, что выше определенной толщины коэрцитивная сила перестает расти с увеличением толщины пленки и выходит на насыщение. Необходимо пояснить почему происходит

насыщение и как максимальное значение коэрцитивной силы зависит от размера пор.

3. В третьей главе (страница 58) показано, что магнитомягкий слой может приводить к искажению формы петли гистерезиса. Необходимо уточнить параметры пленки и решетки антиоточек, при которых такое искажение происходит.

4. В четвертой главе на фазовых диаграммах кроме поверхностного и обычного фазовых переходов присутствует линия экстраординарного фазового перехода. Однако этот фазовый переход никак не обсуждается и его параметры не исследованы.

5. В гамильтониане (4.1) выбор обменного интеграла для пары спинов, расположенных на свободной поверхности пленки и в первом подповерхностном слое J_{BS} , как геометрическое среднее между обменными интегралами объемных спинов J и поверхностных спинов J_S не обоснован в диссертации.

6. Для более детального анализа поверхностного магнетизма было бы желательно изучить намагниченности монослоев по отдельности. Графики зависимости намагниченности монослоев дали бы информацию о глубине проникновения воздействий поверхностных слоев на объемные спины. При Монте-Карло моделировании это сделать достаточно просто.

Данные замечания не снижают ценности выполненной работы и не влияют на ее положительную оценку. Представленная диссертация выполнена на высоком научном уровне, и обоснованность сформулированных в ней положений и выводов не вызывает сомнений.

Заключение по диссертационной работе. Диссертационная работа Симаковой С.С. «Исследование наноструктурированных ферромагнитных пленок методом компьютерного моделирования» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих существенное значение для развития раздела теоретической физики, связанного с исследованием фазовых переходов в ферромагнитных

материалах. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, изложенным в «Положении о присуждении ученых степеней» (пп. 9-14), утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (в редакции от 18.03.2023 г.), а ее автор, Симакова Софья Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Отзыв ведущей организации на диссертацию Симаковой С.С. «Исследование наноструктурированных ферромагнитных пленок методом компьютерного моделирования» подготовлен Хизриевым К.Ш., врио руководителя Института физики им. Х.И. Амирханова – обособленного подразделения ФГБУН ДФИЦ РАН, к.ф.-м.н.

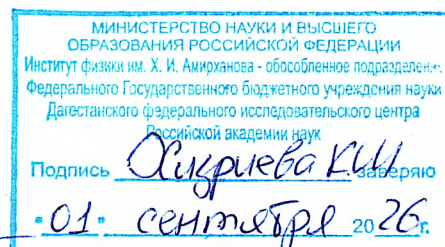
Отзыв рассмотрен и обсуждён на научном семинаре Института физики им. Х.И. Амирханова – обособленного подразделения ФГБУН ДФИЦ РАН 01 сентября 2026 г., протокол № 3, и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Врио руководителя Института физики
им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН
к.ф.-м.н.

К.Ш. Хизриев

Адрес ведущей организации:
367032, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94.
Тел.: +7(8722) 62-89-60,
Факс: +7(8722) 62-89 -60
e-mail: dagphysics@mail.ru

Подпись Хизриева К.Ш. заверяю:
ученый секретарь Института физики
им. Х.И. Амирханова
Дагестанского федерального
исследовательского центра РАН



Абакарова Н.С.