

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук Сутурина Сергея Михайловича на диссертацию Дубицкого Ильи Семеновича «Поведение локальной намагниченности в ферромагнитных инвертированных опалах в магнитном поле: микромагнитное моделирование и эксперимент», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа посвящена исследованию распределения намагниченности в искусственных периодических трехмерных структурах на основе инвертированных опалов (ИО), состоящих из повторяющихся наноразмерных ферромагнитных квази-кубов и тетраэдров из поликристаллического кобальта или никеля. В работе выполнено микромагнитное моделирование для одной элементарной ячейки ИО и доказано, что в определенном диапазоне магнитных полей система имеет структуру спинового льда. Применяв широкий спектр экспериментальных методик, диссертант показал, что предсказанная микромагнитными расчетами структура спинового льда действительно имеет место в изготовленных и исследованных в работе инвертированных опалах. Можно утверждать, что настоящее исследование является существенным вкладом в развитие науки создания метаматериалов с поддающимися управляемому инжинирингу физическими свойствами.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 153 страницы, 56 рисунков и список литературы из 293 наименований.

Во введении обсуждается актуальность темы исследований, формулируются цели, определяются задачи и объекты исследований. Обосновывается научная новизна, научная и практическая значимость, востребованность и достоверность полученных результатов. Формулируются положения, выносимые на защиту. Указывается личный вклад диссертанта. Описывается структура и содержание работы.

Первая глава дает познавательный обзор современного состояния науки, изучающей магнитное состояние в упорядоченных массивах ферромагнитных наночастиц размерности от 0D до 3D. Особое внимание уделено подробному описанию материалов со структурой спинового льда – как атомного, так и искусственного происхождения, а также инвертированным опалам на основе ферромагнитных материалов.

Вторая глава посвящена описанию методов исследования. Рассмотрен синтез инвертированных опалов на основе кобальта и никеля. Подробно описаны экспериментальные методы, применявшиеся для исследования образцов инвертированных опалов. В работе был использован широкий спектр методик для аттестации магнитных свойств (SQUID, SANS, MFM), морфологии поверхности (AFM, MFM, GISAXS), структурных свойств (SAXS, GISAXS). Описан метод микромагнитного моделирования, применявшийся в работе для описания магнитного состояния структуры инвертированного опала во внешнем магнитном поле.

Третья глава посвящена описанию численного эксперимента по изучению распределения намагниченности в элементарной ячейке ИО на основе кобальта и никеля. Распределение намагниченности рассчитывалось с помощью метода микромагнитного моделирования для различных направлений магнитного поля относительно кристаллографических осей ИО. Важным результатом исследования является то, что в определенном диапазоне полей в рассматриваемых ИО выполняется правило спинового льда. Этот факт позволяет отнести данное исследование к пионерским работам, посвященным искусственным трехмерным системам, с магнитной структурой, во многом аналогичной структуре атомных спиновых льдов. Показано, что правило спинового льда сохраняется также при приложении ограниченного по величине поля вдоль невыгодного для конфигурации 2-in-2-out направления [111]. Показано, что при приложении поля вдоль направления [1-21] в структуре ИО должна появляться неколлинеарная по полю компонента намагниченности. Данное явление может быть использовано в качестве экспериментального подтверждения выполнения правила спинового льда. Для ряда конфигураций рассчитаны кривые магнитного гистерезиса элементарной ячейки. При расчетах принималось во внимание существенное влияние степени деформации микросфер (спекания) исходного коллоидного кристалла на границы применимости правила спинового льда. Найдена оптимальная степень спекания.

В четвертой главе проведено сопоставление результатов микромагнитных расчетов и экспериментальных данных, полученных при помощи SQUID магнитометрии и малоуглового рассеяния нейтронов. Учтено размагничивающее поле, связанное с формой образцов. Двумерные карты малоуглового рассеяния нейтронов измерены для случаев приложения магнитного поля вдоль трех основных кристаллографических направлений ГЦК структуры ИО. Проведено сравнение наблюдаемых карт с расчетным Фурье-образом распределения намагниченности в элементарной ячейке. Проведено сравнение экспериментальной и теоретической зависимости интенсивности рефлексов SANS от величины магнитного поля.

В пятой главе обсуждаются свойства поверхности пленок ИО. Морфология поверхности была исследована с помощью зондовой микроскопии и малоуглового рассеяния при скользящем падении (GISAXS). Впервые магнитные свойства поверхности инвертированных опалов были исследованы с помощью магнитно-силовой микроскопии в зависимости от толщины пленки и магнитного поля. Была проведена интерпретация картин MFM посредством применения микромагнитного моделирования.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

В целом следует отметить высокое качество приведенных в работе иллюстраций, наглядно подкрепляющих приводимые рассуждения. Особенно следует отметить усилия автора по визуализации трехмерного распределения намагниченности в элементарной ячейке.

Научная новизна

Новые и оригинальные результаты, представленные в работе, включают в себя:

- Впервые с помощью численного моделирования установлено выполнение правила спинового льда в инвертированном опале. Установлено влияние спекания микросфер на применимость правила спинового льда.
- Впервые проведено сравнение данных малоуглового рассеяния нейтронов на инвертированных опалах с теоретической интерпретацией с помощью вычисления магнитного форм-фактора элементарной ячейки.
- Впервые проведено исследование и моделирование распределения магнитного поля над поверхностью инвертированных опалов на основе никеля с помощью магнитно-силовой микроскопии.

Практическая значимость

Изучение свойств искусственных периодических наносистем различной размерности является востребованным направлением для создания новых метаматериалов со свойствами, не имеющими аналогов среди материалов естественных. Разработка методик описания, измерения и моделирования подобных систем имеет большую практическую значимость для развития этой области науки. Результаты изучения магнитных свойств инвертированных опалов, представляющих собой периодические массивы ферромагнитных нано-частиц, могут быть также востребованы при разработке фильтров спиновых волн.

Апробация работы.

Материалы работы опубликованы в период 2015 – 2017 гг. в 5 статьях в журналах, индексируемых международными библиографическими базами данных Web of Science и Scopus, а также национальной библиографической базой данных научного цитирования

РИНЦ. Часть результатов представлена в докладах на российских и международных конференциях.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность представленных результатов определяется применением широкого спектра взаимодополняющих современных методик измерения, а также проведением тщательного сравнения полученных экспериментальных результатов с результатами численного моделирования.

Замечания по диссертационной работе

Следует отметить следующие небольшие недостатки представленной работы:

1. Учитывая сложную и интересную 3D структуру намагниченности внутри квазитетраэдров и квазикубов, представлялось бы интересным увидеть более детализированную пошаговую анимацию переворота намагниченности в процессе изменения магнитного поля, возможно, показанную в разных пространственных проекциях. Можно предположить, однако, что столь подробное представление естественно ограничено вычислительными мощностями имеющихся в распоряжении компьютерных систем, а также невозможностью приложения видеоматериалов к манускрипту диссертации.
2. При имеющейся полноте изложения вводной части работы, пожалуй, несколько не хватает подробностей относительно особенностей реализации метода конечных элементов для решения уравнения ЛЛГ.
3. Показанные карты малоуглового рассеяния, по всей видимости, измерены в насыщении. В дальнейшем автор приводит зависимость интенсивности основных рефлексов от величины приложенного поля. Было бы интересно также узнать, имеет ли место при перемагничивании какая-либо эволюция тонкой структуры вне основных Брэгговских рефлексов. Можно ли на основе этой картины сделать заключения об особенностях перемагничивания отдельных частей элементарной ячейки?

Заключение

Диссертация И. С. Дубицкого является полноценным многосторонним научным исследованием, направленным на решение интересной задачи - нахождения распределения намагниченности в искусственно созданной периодической структуре, состоящей из повторяющихся ферромагнитных наноразмерных элементов. В ходе работы диссертантом были получены важные результаты, позволяющие отнести рассмотренные инвертированные опалы к материалам со структурой спинового льда. Найденные закономерности позволили связать особенности изготовления ИО с идеальностью

выполнения в нем правила 2-in-2-out. Экспериментальная часть представлена широким спектром методик, в полной мере освоенных диссертантом. Одновременное использование экспериментальных методик, микромагнитного моделирования и расчета нейтронного рассеяния позволила добиться высокой степени достоверности полученных результатов.

Сделанные выше по тексту замечания, касающиеся уточнения решаемых в диссертации задач, нисколько не умаляют общей положительной оценки данной научно-квалификационной работы. Высокий уровень работы подтверждается уровнем журналов, в которых опубликованы статьи диссертанта. Публикации в научной печати полностью отражают основные результаты работы. Автореферат с достаточной полнотой соответствует основному содержанию диссертационной работы.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа И. С. Дубицкого «Поведение локальной намагниченности в ферромагнитных инвертированных опалах в магнитном поле: микромагнитное моделирование и эксперимент», по актуальности поставленных и решенных задач, по степени достоверности, научной новизне и практической значимости полученных результатов, полностью отвечает требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук (п. 9 Положения о присуждении учёной степени, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 30.07.2014), а её автор – Дубицкий Илья Семенович несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

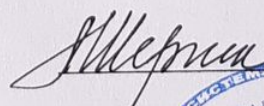
Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник отделения физики
твёрдого тела, лаборатории спектроскопии твёрдого
тела
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физико-технический институт им.
А.Ф. Иоффе Российской академии наук

С.М. Сутурин
194021, С-Петербург,
Ул. Политехническая 26
Тел.: +7-812-2976411
e-mail: suturin@mail.ioffe.ru

Подпись заверяю.

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Д.ф.-м.н.

31 мая 2018 г.

 А. П. Шергин

