

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Мистонов Александр Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ
ИНВЕРТИРОВАННЫХ ОПАЛОПОДОБНЫХ СТРУКТУР МЕТОДАМИ
МАЛОУГЛОВОЙ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ И СКВИД-МАГНИТОМЕТРИИ

01.04.07 — физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2013

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

- Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Григорьев Сергей Валентинович
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник
Дмитриенко Владимир Евгеньевич
Институт кристаллографии им. Шубникова РАН,
г. Москва
- кандидат физико-математических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник
Клементьев Евгений Станиславович
Национальный исследовательский центр «Курча-
товский институт», г. Москва
- Ведущая организация: Объединённый институт ядерных исследований,
г. Дубна

Защита состоится 14 февраля 2013 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.232.33 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Россия, Санкт-Петербург, Ульяновская ул., д.1. Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, конференц-зал НИИФ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Лезов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. История магнетизма насчитывает уже не одну тысячу лет. «Чудесные» свойства магнитного железняка использовали в Древнем Китае, Индии и Греции. С тех пор природа магнитных явлений притягивает внимание естествоиспытателей всего мира. И хотя к настоящему моменту в этой области уже выполнена колоссальная экспериментальная и теоретическая работа, сделано множество открытий и изучен целый ряд удивительных явлений, таких как сила Лоренца, эффект Фарадея, закон Ампера, эффект Мейснера и другие, осталось ещё много нерешённых задач. Отдельное место среди них занимают исследования сложных магнитных структур как природного, так и искусственного происхождения, таких, как спиновые жидкости, геликоидальные магнетики и фрустрированные магнетики.

Опалоподобные структуры (ОПС), являющиеся искусственным аналогом природного полудрагоценного камня — опала, в настоящее время широко применяются в различных областях науки и техники благодаря своим уникальным оптическим свойствам. Эти свойства обусловлены пространственной структурой опалов, которая представляет собой плотнейшую упаковку сферических микрочастиц. Опалоподобные структуры в виде плёнки площадью порядка нескольких квадратных сантиметров и толщиной до 20 микрон получают путём самоорганизации микрочастиц в гексагональные плотноупакованные слои, толщиной в половину микрона (диаметр частиц). Если затем пространство между частицами заполнить каким-нибудь материалом, а исходные сферические частицы удалить, то получится так называемая инвертированная опалоподобная структура (ИОПС). Естественно, что её пространственная структура совпадает со структурой полостей исходного опала. В зависимости от типа заполнителя можно получать самые разнообразные физические свойства — оптические, пьезоэлектрические, тепловые, магнитные и прочие, которые зависят не только от свойств материала-заполнителя, но и от периодичности опалоподобной структуры.

Ферромагнитные инвертированные опалоподобные структуры представляют собой трёхмерный метаматериал — ферромагнитную сетку нанопроволок со сложным, неоднородным распределением намагниченности внутри этой сетки. Трудность создания качественных инвертированных опалоподобных структур из ферромагнитного материала приводит к тому, что число научных групп, занимающихся их исследованием крайне мало. При исследовании их магнитных свойств необходимо использовать не только интегральные методы стандартной магнитометрии, но и методы нейтроно-

графии. Однако, изучение магнитной структуры с периодом в 500 нм возможно лишь на пределе разрешения самых современных установок малоугловой дифракции. Поэтому, магнитные свойства этих наноструктур к настоящему моменту изучены недостаточно. При этом, исследование ферромагнитных ИОПС представляет интерес как с точки зрения их практического применения в качестве магнитооптических сенсоров, магнитных кантеливеров и других магнитных устройств, так и с точки зрения развития теории фрустрированного магнетизма и её адаптации к наноструктурам.

Целью настоящей диссертационной работы является изучение магнитных свойств инвертированных опалоподобных наноструктур на основе никеля и кобальта, а также определение зависимости этих свойств от пространственной структуры ИОПС, типа материала-заполнителя и влияния внешнего магнитного поля.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие основные задачи:

1. Аттестовать структуру инвертированных опалоподобных кристаллов на основе никеля и кобальта методами сканирующей электронной микроскопии и ультрамалоугловой дифракции синхротронного излучения.
2. Аттестовать фазовый состав и структуру материалов-заполнителей методом широкоугольной дифракции синхротронного излучения.
3. Изучить влияние магнитожёсткости/магнитомягкости материала-заполнителя, пространственной анизотропии инвертированной опалоподобной структуры и двумерной анизотропии плёнки на магнитные свойства образцов инвертированных опалоподобных кристаллов методом магнитометрии с применением сверхпроводящего квантового интерференционного магнетометра (СКВИД-магнитометрии).
4. Исследовать зависимость поведения средней намагниченности инвертированных опалоподобных структур на основе никеля и кобальта от магнитного поля при различных углах между направлением вектора напряжённости внешнего магнитного поля и плоскостью образца для образцов различной толщины. Основываясь на полученных результатах, определить механизмы перемагничивания, реализующиеся в таких объектах.
5. Провести исследование поведения магнитной структуры во внешнем магнитном

поле в ферромагнитных инвертированных опалоподобных наноструктурах на основе никеля и кобальта методом малоугловой дифракции поляризованных нейтронов.

6. На основе полученных данных построить модель распределения намагниченности внутри никелевых и кобальтовых инвертированных опалоподобных структур при различных значениях величины и направления вектора напряжённости внешнего магнитного поля.

Научная новизна. Основные результаты исследования ферромагнитных инвертированных опалоподобных структур на основе никеля и кобальта, получены впервые и включают следующее:

1. Впервые достоверно определена структура ИОПС на основе Ni и Co, а также атомная структура материалов-заполнителей методами ультрамалоугловой и широкоугольной дифракции синхротронного излучения.
2. Впервые проведено детальное исследование кривых перемагничивания инвертированных опалоподобных кристаллов на основе Ni и Co для углов между направлением вектора напряжённости внешнего магнитного поля и плоскостью образца от 0° до 90° методом СКВИД-магнитометрии.
3. Впервые проведены измерения магнитной структуры ИОПС на основе Ni и Co методом малоугловой дифракции поляризованных нейтронов.
4. На основании данных малоугловой дифракции поляризованных нейтронов предложена новая модель для описания распределения локальной намагниченности в инвертированном опалоподобном кристалле на различных этапах процесса намагничивания.

Научная и практическая ценность. Результаты работы представляют несомненный интерес для развития теории фрустрированного магнетизма трёхмерных пространственноупорядоченных наноструктурированных магнитных систем. Представленные в работе исследования являются основой комплексной методики изучения магнитных наносистем со сложной пространственной геометрией.

На основе полученных результатов расширен круг применения магнитных инвертированных опалоподобных наноструктур в различных областях науки, техники, приборостроения, медицины и других.

Кроме того, полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе в качестве частей лекционных курсов или практических работ, в частности, по методам исследования магнитных свойств наноструктур и фрустрированному магнетизму.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аттестована кристаллографическая структура и определена степень дефектности плёнок инвертированных опалоподобных структур (ИОПС) на основе никеля и кобальта методом ультрамалоугловой дифракции синхротронного излучения. Установлено, что в образцах доминирует ГЦК структура с большим количеством двойников и периодом решётки 650 ± 10 нм.
2. Измерены кривые перемагничивания ИОПС на основе Ni и Co для плёнок различной толщины с приложением магнитного поля под разными углами к плоскости плёнки образца ИОПС. Показано наличие 2 разных механизмов перемагничивания плёнок ИОПС, характерных для приложения поля к направлению, близкому к нормали и в плоскости плёнки образца, независимо от материала плёнки и от её толщины.
3. Впервые измерены карты интенсивности малоугловой дифракции поляризованных нейтронов от ИОПС на основе Ni и Co в широком диапазоне величин магнитного поля, приложенного в направлениях $[\bar{1}2\bar{1}]$, $[11\bar{1}]$ и $[\bar{1}10]$ ГЦК структуры ИОПС.
4. Установлено, что магнитная система ИОПС распадается на домены с размером меньшим постоянной решетки ИОПС, т.е. полностью разупорядочивается при $H = H_c$, но совпадает с пространственной структурой ИОПС, когда приложено сильное магнитное поле. При этом, базовый элемент ИОПС разбивается на несколько доменов — по числу перемычек, соединяющих кубы и тетраэдры базового элемента, а вектор локальной намагниченности перемычки направлен вдоль одной из 4 осей типа $\langle 111 \rangle$. С приложением магнитного поля возникает 4 магнитных подсистемы перемычек, каждая из которых перемагничивается при своём собственном магнитном поле H_{ci} .
5. Построена модель распределения намагниченности в ферромагнитных инвертированных опалоподобных структурах, принимающая в рассмотрение аналог

«правила льда» для магнитных систем, согласно которой количество магнитных моментов входящих в куб или тетраэдр должно равняться количеству исходящих из него магнитных моментов.

6. Показано, что такая модель приводит в возникновению составляющей намагниченности, перпендикулярной приложенному магнитному полю. Расчёт магнитного сечения рассеяния нейтронов, выполненный на основе этой модели, находится в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Апробация работы. Результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и школах:

1. XLII-XLVI Зимняя школа Петербургского института ядерной физики (Санкт-Петербург, 2008-2012 гг.);
2. еждународное совещание по рассеянию поляризованных нейтронов в конденсированных веществах PNCMI-2008, -2010 -2012 (Токай, Япония, 2008 г., Дельфт, Нидерланды, 2010 г., Париж, Франция 2012 г.);
3. XX Совещание по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния РНИКС-2008, -2010, -2012 (Гатчина, 2008 г., Москва, 2010 г., Санкт-Петербург, 2012 г.);
4. Зимняя молодёжная школа-конференция WSNMR (Санкт-Петербург, 2008 г.);
5. XIV Международная конференция по малоугловому рассеянию SAS-2009 (Оксфорд, Великобритания, 2009 г.);
6. Международная конференция по магнетизму ICM (Карлсруэ, Германия, 2009 г.);
7. Совещание «Опалоподобные структуры» (Санкт-Петербург, 2010 г., 2012 г.);
8. V европейская конференция по нейтронному рассеянию (Прага, Чехия, 2011 г.);
9. Международная конференция «Дни дифракции» (Санкт-Петербург, 2011 г.);
10. XXII Международный конгресс и генеральная ассамблея международного кристаллографического союза (Мадрид, Испания, 2011 г.)

11. Международная тихоокеанская конференция IQEC/CLEO-2011 (Сидней, Австралия, 2011 г.)
12. Синхротронный и нейтронный бельгийско-голландский семинар (Амстердам, Нидерланды, 2011 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 129 наименований. Работа изложена на 174 страницах и содержит 51 рисунок и 1 таблицу

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель и поставлены задачи исследования, определены объекты исследований, показана научная новизна полученных результатов, их практическая и научная значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

Первая глава диссертации представляет литературный обзор по теме исследования. Глава состоит из трёх разделов. В первом даётся определение опалоподобных структур (ОПС), основных методов их синтеза, таких как естественная седиментация, упорядочение микросфер под давлением, метод вертикального осаждения и электрофорез. Кроме того, представлен обзор методов синтеза инвертированных опалоподобных структур (ИОПС) — золь-гель метод, полимеризация органических прекурсоров, осаждение солей и химическая конверсия, осаждение наночастиц с последующим спеканием и электрохимическое осаждение. Последний параграф первого раздела посвящён описанию оптических свойств ОПС. Во втором разделе представлен небольшой обзор современных исследований магнитных свойств ИОПС. В третьем разделе вводится понятие геометрической магнитной фрустрации, рассматриваются простейшие фрустрированные системы, а также фрустрированные трёхмерные ферромагнитные кристаллы с решёткой пирохлора — спиновый лёд. Показано, что распределение магнитных моментов в такой структуре должно подчиняться «правилу льда», в котором формулируется, что в одной тетраэдрической ячейке такого кристалла спины магнитных атомов должны быть направлены так, что два «указывают» внутрь тетраэдра, а два — вне его. После чего сделан обзор современных исследований

материалов со свойствами спинового льда, а также геометрически фрустрированных наноструктурированных объектов.

Вторая глава посвящена аттестации прямых и инвертированных опалоподобных структур методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), широкоугольной и ультрамалоугловой дифракции синхротронного излучения. Методом СЭМ показано, что опалоподобные структуры, использовавшиеся в качестве шаблона для создания ИОПС состоят из микросфер диаметром 520 ± 10 нм, в то время как размер сферических полостей, оставшихся после удаления микросфер в процессе создания ИОПС на основе никеля и кобальта равен 460 ± 10 нм. Определена толщина x (число гексагональных слоёв) полученных ИОПС. Для никеля $x = 3.5, 7, 8, 17, 26$ слоёв, а для кобальта $x = 3.5, 7, 11$ слоёв.

Эксперименты по ультрамалоугловому рассеянию синхротронного излучения показали, что и полистерольные ОПС, и ферромагнитные ИОПС обладают преимущественно ГЦК-упорядочением с периодичностью структуры 740 ± 10 нм и 650 ± 10 нм, соответственно, что хорошо согласуется с данными СЭМ. При этом единичный элемент ИОПС представляет собой совокупность кубов и тетраэдров, с вогнутыми гранями, и соединёнными перемычками вдоль направлений типа $\langle 111 \rangle$ (рис. 1). На основании данных измерений картин дифракции при различных углах между направлением излучения и плоскостью образца установлено наличие дефектов, таких как сбивка упорядочения гексагональных слоёв вдоль направления $[111]$, незначительная разориентация структурных доменов и плоскости двойникования. Кроме того, кобальтовые ИОПС более разупорядочены, что, вероятно, связано с анизотропией кристаллической структуры осаждённого кобальта.

Методом широкоугольной дифракции синхротронного излучения показано, что в ИОПС на основе никеля осаждён кристаллический никель в ГЦК-фазе. При этом, кристаллиты никеля в основном ориентированы произвольно, однако около 10% из них располагаются так, что их плоскости (200) параллельны поверхности образца. В ИОПС на основе кобальта осаждено 95% ГПУ-фазы кристаллического кобальта и 5% ГЦК-фазы. Таким образом, доказано, что основу ИОПС составляет материалы-ферромагнетики.

В третьей главе представлены результаты исследования ИОПС на основе никеля и кобальта методом магнитометрии с помощью сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД-магнитометрии). В ходе исследования получены кривые

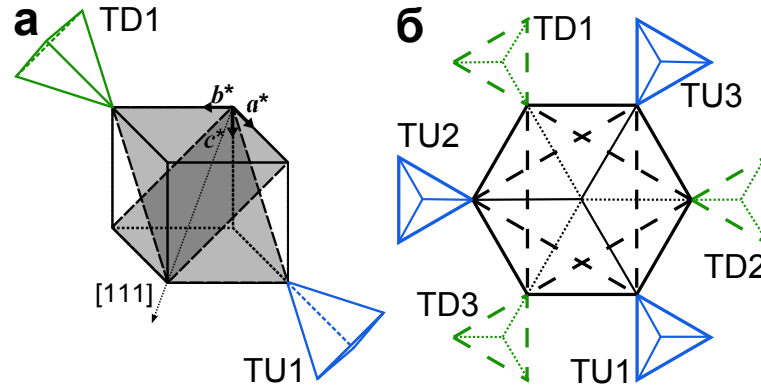


Рис. 1. Вид трёхмерного идеализированного единичного элемента (а) и его проекции на плоскость (111) с присоединёнными тетраэдрами от четырёх соседних элементов (б).

перемагничивания для образцов Ni_x ($x = 3.5, 7, 8, 17$ и 26 слоёв) и Co_x ($x = 3.5, 7, 11$ слоёв) в диапазоне полей от -5 Тл до 5 Тл и при углах между направлением поля и нормалью к плоскости образца в диапазоне $[0^\circ \div 90^\circ]$ (рис. 2).

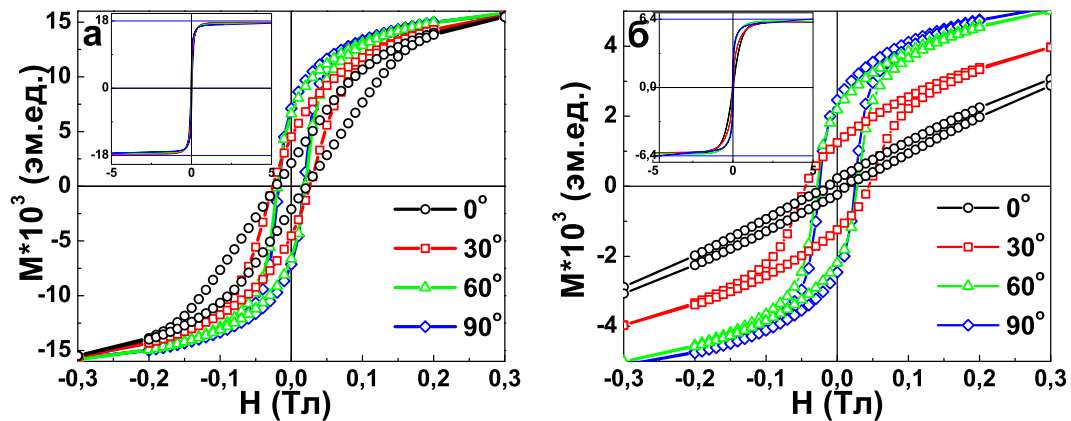


Рис. 2. Кривые перемагничивания для инвертированных опалоподобных кристаллов Ni_{26} (а) и Co_{11} (б) в зависимости от угла θ

Было показано, что двумерная анизотропия плёнки ИОПС приводит к заметному размагничиванию образцов при приложении магнитного поля перпендикулярно плоскости образца. Установлено, что анизотропия атомарной кристаллической структуры кобальта оказывается значимой при небольших толщинах образца ($x = 3.5$), и приводит к непланному поведению намагниченности в малых полях.

Из кривых перемагничивания определялась коэрцитивная сила образца H_c и строились её зависимости от угла поворота образца, которые схожи с аналогичными кривыми, полученными на других системах магнитных нанобъектов и отличаются от кривых, полученных от сплошных плёнок Ni и Co . На основании этих измерений сделан вывод о том, что в ИОПС перемагничивание происходит через два механизма.

Когерентный поворот магнитных моментов наблюдается при приложении поля перпендикулярно плёнке ИОПС и завихрения намагниченности внутри наноэлементов — «кёрлинг» — при приложении поля в плоскости плёнки. При этом, появление такого механизма, как «кёрлинг», определяется напрямую наличием наноструктуры в ИОПС образцах.

Таким образом, методом СКВИД-магнитометрии показано влияние на намагниченность таких факторов как плёночная анизотропия и анизотропия кристаллографической атомарной структуры материала-заполнителя. Однако обнаружено, что данный метод в силу своей интегральной природы не позволяет полноценно исследовать магнитную структуру в ИОПС.

Четвёртая глава посвящена исследованию магнитной структуры ИОПС на основе никеля в магнитном поле методом малоугловой дифракции поляризованных нейтронов. Представлено описание метода, включающее схему экспериментальной установки, а также основные выражения, используемые при обработке экспериментальных данных. Эксперименты проводились таким образом, что внешнее магнитное поле H , величиной до 150 мТл прикладывалось перпендикулярно падающему пучку нейтронов и вдоль кристаллографической оси $[\bar{1}2\bar{1}]$ (позиция I) инвертированного опала или вдоль оси $[11\bar{1}]$ (позиция II), находящейся под углом 19° к пучку. В результате были получены картины дифракции при различных значениях величины поля.

Анализ азимутальных угловых зависимостей интенсивности нейтронного рассеяния показал, что семейство плоскостей (202) было одинаково намагничено вдоль направления внешнего магнитного поля при $H = 150$ мТл;

В ходе исследования было проанализировано три вклада в рассеяние: ядерный, магнитный и ядерно-магнитный интерференционный. Самый значительный из них — ядерный. Он даёт информацию о структуре инвертированного опалоподобного кристалла, которая хорошо согласуется с данными анализа методом ультрамалоугловой дифракции синхротронного излучения. Полевая зависимость интерференционного вклада в дифракционные пики даёт картину процесса перемагничивания соответствующих рассеивающих плоскостей. Было показано, что образец легче намагничивается вдоль оси $[11\bar{1}]$ по сравнению с осью $[2\bar{4}2]$, что связано с геометрической формой инвертированного опалоподобного кристалла.

Анализ полевых зависимостей магнитного рассеяния также показал, что намагничивание происходит легче при приложении поля вдоль оси $[11\bar{1}]$, чем при при-

ложении вдоль оси $[2\bar{4}2]$. «Ступенчатость» полевых зависимостей для рефлекса $02\bar{2}$ (рис. 3) связана с поэтапным намагничиванием отдельных частей магнитной системы ИОПС.

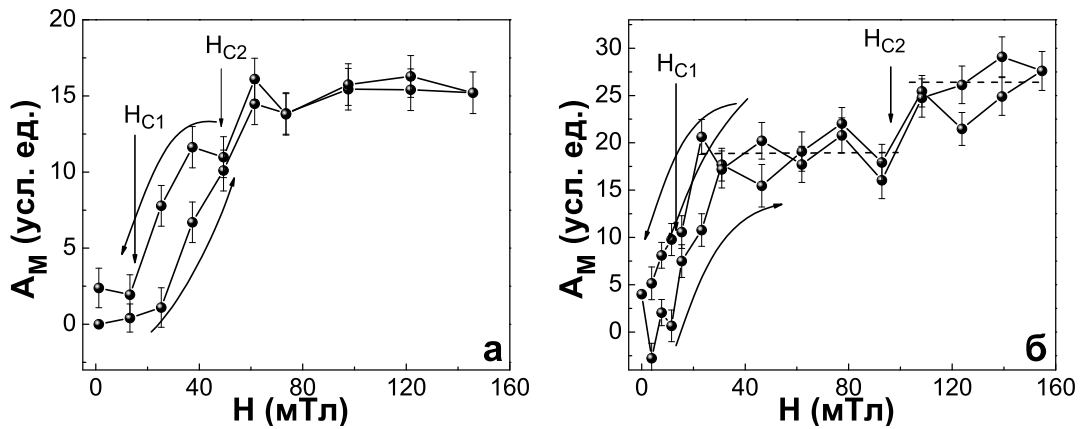


Рис. 3. Интенсивность магнитного вклада A_M для рефлекса $02\bar{2}$ как функция приложенного магнитного поля для $H \parallel [2\bar{4}2]$ (а) и для $H \parallel [11\bar{1}]$ (б)

Чистое магнитное рассеяние соответствующих Брэгговских пиков связано со сложным распределением линий магнитного потока в геометрической сети октаэдрических и тетраэдрических частиц, набор которых составляет основу структурного элемента инвертированной опалоподобной структуры. В этом смысле малоугловое рассеяние поляризованных нейтронов является прямым методом измерения этой сложной магнитной сети, возникающей в процессе намагничивания таких инвертированных опалоподобных структур.

К сожалению, в случае с никелевыми ИОПС, магнитное рассеяние слабее ядерного и статистика полученных результатов не очень высока, поэтому на основании этих результатов можно лишь примерно оценить распределение намагниченности внутри ИОПС. Для получения лучшей статистики магнитного вклада были проведены аналогичные эксперименты с кобальтовыми ИОПС, где магнитное рассеяние значительно преобладает над ядерным.

В пятой главе приводятся результаты двух экспериментов по малоугловой дифракции нейтронов на кобальтовых инвертированных опалоподобных структурах. В обоих случаях эксперименты проводились в двух геометриях — образец устанавливался перпендикулярно нейтронному пучку, а поле направлялось в плоскости образца вдоль осей $[\bar{1}2\bar{1}]$ (позиция I) и $[\bar{1}10]$ (позиция II), однако в первом эксперименте использовались поляризованные нейтроны и максимальная напряжённость поля составляла 200 мТл, а во втором — пучок нейтронов был неполяризован, а максимальная

величина поля достигала 1.2 Тл.

Анализ угловых азимутальных зависимостей интенсивности нейтронного рассеяния показал, что в отличие от никелевых ИОПС, плоскости семейства $\{202\}$ кобальтовых ИОПС неоднородно намагничиваются в поле до 200 мТл вдоль оси $[\bar{1}2\bar{1}]$. То есть, направление намагниченности в образце отклоняется от направления вектора внешнего магнитного поля, но эти отклонения периодичны и определяются осями симметрии инвертированного опалоподобного кристалла.

Анализ зависимости интенсивности магнитного рассеяния поляризованных нейтронов от величины поля (эксперимент 1) также показал, что магнитная структура, соответствующая магнитным рефлексам $02\bar{2}$ (рис. 4) и $20\bar{2}$ (рис. 5) не намагничивается при значении поля 200 мТл. При этом, наблюдается заметный гистерезис при намагничивании и размагничивании образцов.

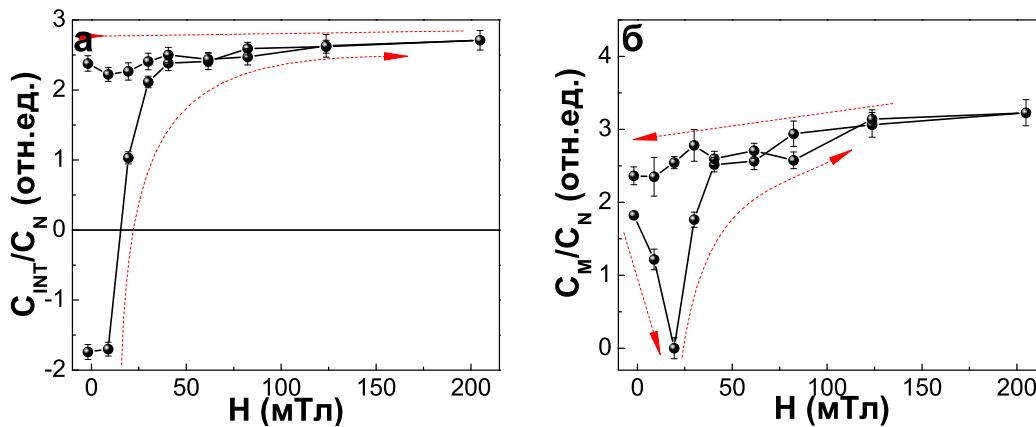


Рис. 4. Полевые зависимости интерференционного C_{INT}/C_N (а) и магнитного C_M/C_N (б) вкладов, нормированных на ядерный вклад для рефлексов типа $20\bar{2}$ ($\alpha = 90^\circ$) в позиции I.

В эксперименте 2 было показано, что полевые зависимости интенсивности магнитного рассеяния в диапазоне полей до 200 мТл хорошо согласуются с аналогичными кривыми, полученными в эксперименте 1, что говорит о воспроизводимости экспериментальных данных.

Показано, что полевые зависимости для рефлексов $02\bar{2}$ и $20\bar{2}$ в позиции I (рис. б) демонстрируют несколько «критических» полей, как и в случае с никелевыми ИОПС. В частности, наблюдается несколько точек скачкообразного роста интенсивности магнитного рассеяния. «Ступенчатость» этих зависимостей, вероятнее всего, связана с поэтапным намагничиванием отдельных частей магнитной системы ИОПС.

На основании полученных данных, можно утверждать, что сложное распределе-

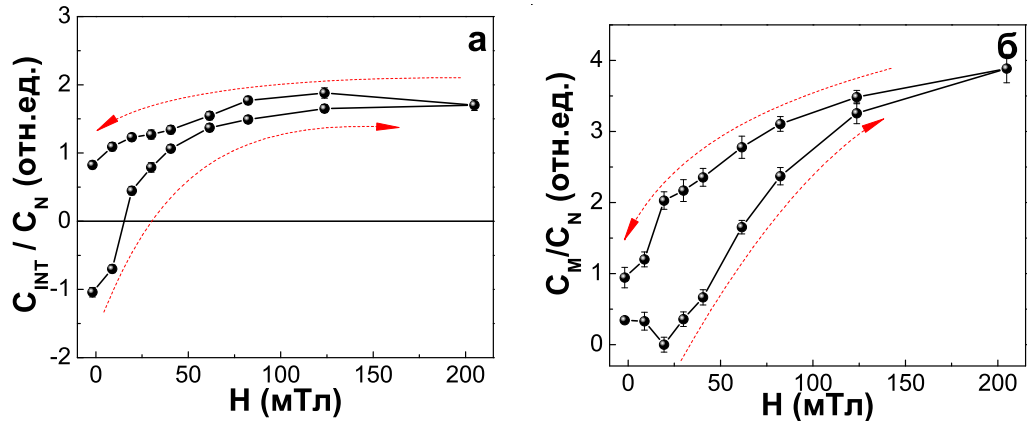


Рис. 5. Полевые зависимости интерференционного C_{INT}/C_N (а) и магнитного C_M/C_N (б) вкладов, нормированных на ядерный вклад для рефлексов типа $02\bar{2}$ ($\alpha = 30^\circ$) в позиции I.

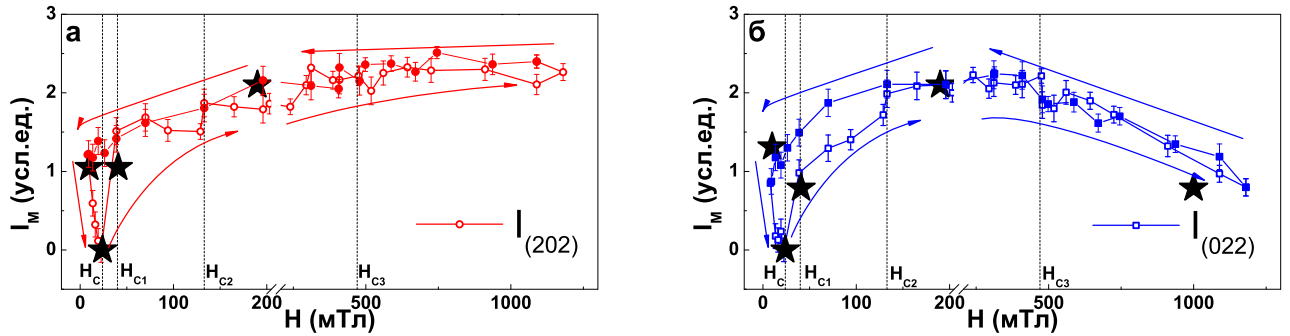


Рис. 6. Полевые зависимости интенсивностей магнитных вкладов для ИОПС Co_{11} , $\mathbf{H} \parallel [\bar{1}2\bar{1}]$ при $\mathbf{Q}_{202} \perp \mathbf{H}$ (а) и при \mathbf{Q}_{022} , расположенным под углом 30° к направлению поля \mathbf{H} (б). Заполненные кружки — «прямой» ход по полю, пустые кружки — обратный ход

ние намагниченности, продиктованное пространственной геометрией ИОПС представляет собой суперпозицию магнитных подсистем, которые переходят в намагниченное состояние при различных значениях напряжённости внешнего магнитного поля в процессе намагничивания образца.

Сравнение данных о магнитной системе полученных из малоуглового рассеяния нейтронов с результатами СКВИД-магнитометрии показывает различие, обусловленное тем, что СКВИД-магнитометрия является интегральным методом измерения намагниченности, в то время как метод малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов «даёт» значение намагниченности в хорошо определённой точке Q-пространства.

В шестой главе построена феноменологическая модель распределения намагниченности в ферромагнитных инвертированных опалоподобных структурах, учи-

тывающая «правило льда», характерное для трёхмерных фрустрированных магнетиков.

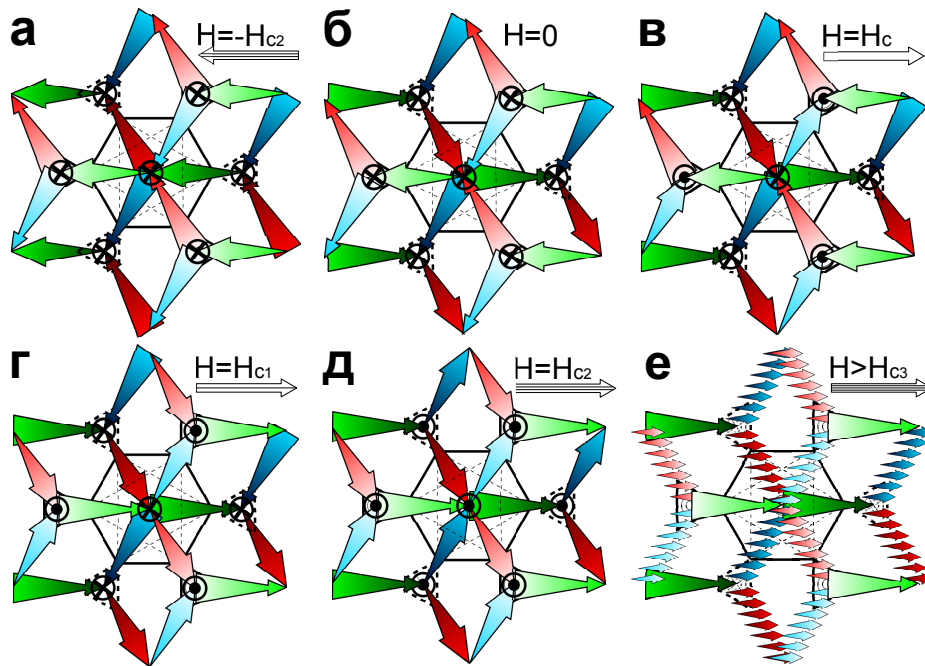


Рис. 7. Распределение намагниченности в ИОПС на различных этапах процесса перемагничивания — при $H = -H_{c2}$ (а), при $H = 0$ (б), при $H = H_c$ (в), при $H = H_{c1}$ (г), при $H = H_{c2}$ (д), при $H > H_{c3}$ (е). Изинговские магнитные векторы, направленные вдоль осей типа $\langle 111 \rangle$ показаны стрелками. Диагональные стрелки — векторы в плоскостях (220) и (022) , а горизонтальные — в плоскости (202) . Те из них, что лежат в более высокой плоскости (111) — светлее.

Основополагающие утверждения представленной модели заключаются в следующем. Во-первых, благодаря анизотропии пространственной структуры инвертированного опалоподобного кристалла векторы локальной намагниченности, определяющие магнитное поведение такого объекта, можно считать векторами изинговского типа, направленными вдоль осей типа $[111]$, и образующими, тем самым, четыре магнитные подсистемы. Во-вторых, вплоть до высоких полей, части единичного элемента ИОПС подчиняются «правилу льда» — количество векторов локальной намагниченности «входящих» в каждый куб или тетраэдр равно количеству векторов «выходящих» из них. И, в-третьих, при приложении поля направления векторов локальной намагниченности, обладающие положительной проекцией на направление поля являются энергетически выгодными.

На основании такой модели рассмотрен процесс намагничивания инвертированной опалоподобной структуры при приложении магнитного поля вдоль кристаллографических осей $[\bar{1}2\bar{1}]$ (рис. 7) и $[\bar{1}10]$. Показано, что процесс перемагничивания

происходит путём попарных переворотов векторов локальной намагниченности.

Вычислено значение средней намагниченности ИОПС с учётом созданной модели. Утверждается, что при приложении поля вдоль кристаллографических осей типа $\langle 121 \rangle$ возникает компонента намагниченности, перпендикулярная вектору напряжённости магнитного поля и плоскости образца. Были вычислены также значения интенсивности магнитного рассеяния нейтронов на основе построенной модели и показано, что они находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами.

В заключении диссертации представлены основные результаты и выводы, благодарности и список использованной литературы.

Основное содержание диссертационной работы изложено в работах:

1. S.V. Grigoriev, K.S. Napolskii, N.A. Grigoryeva, A.V. Vasilieva, A.A. Mistonov et al., Phys. Rev. B, 79, 2009, 045123
2. В.В. Абрамова А.С. Синицкий, Н. А. Григорьева, С. В. Григорьев, Д. В. Белов, А. В. Петухов, А. А. Мистонов и др., ЖЭТФ, т. 136, вып.1(7), с.1-7, 2009
3. A. A. Eliseev, D.F. Gorozhankin, K.S. Napolskii, A.V. Petukhov, N.A. Sapoletova, A.V. Vasilieva, N.A. Grigoryeva, A.A. Mistonov et al, JETP Letters, v. 90, 4, p. 297-303, 2009
4. K.S. Napolskii, N.A. Sapoletova, D.F. Gorozhankin, A.A. Eliseev, A.V. Petukhov, D.V. Byelov, A.A. Mistonov et al., Langmuir, v. 26(4), pp. 2346-2351, 2010
5. А.В. Васильева, С.В. Григорьев, Н.А. Григорьева, А.А. Мистонов и др., Физика твёрдого тела, т. 52, вып. 5, с. 1017-1020, 2010
6. A.V. Vasilieva Grigoryeva, N. A., Mistonov, A. A. et al., J. of Phys.: Confer.Ser., v.247, 012029 – 012035 (2010).
7. Н.А. Саполетова, Мартынова Н.А., Напольский К.С., Елисеев А.А., Лукашин А.В., Петухов Д.И., Кушнир С.Е., Васильева А.В., Григорьев С.В., Н.А. Григорьева, Мистонов А.А. и др., Физика твёрдого тела, 2011, т. 53, вып.6, 1064-1068.
8. N.A. Grigoryeva, A.A. Mistonov et al., Physical Review B, 84, 2011, 064405(13).
9. А.К. Самусев, И.С. Синев, К.Б. Самусев, М.В. Рыбин, А.А. Мистонов и др., Физика твёрдого тела, 2012, т. 54, вып. 10, 1946
10. M. Kostylev, A. A. Stashkevich, Y. Roussignie, N. A. Grigoryeva, A. A. Mistonov et al., Phys.Rev.B v. 86, 184431(2012)

Благодарности

Автор диссертации благодарит Григорьева Сергея Валентиновича и Григорьеву Наталью Анатольевну за научное руководство, терпение и неоценимую помощь в ходе выполнения настоящей работы.

Автор выражает благодарность Нине Саполетовой, Кириллу Напольскому и Андрею Елисееву за синтез исследованных в диссертационной работе образцов. Автор выражает признательность Голландско-бельгийской линии DUBBLE ESRF, Виму Бауману, Андрею Петухову и Дмитрию Белову за возможность непосредственного участия в экспериментах по ультрамалоугловому рассеянию синхротронного излучения, Швейцарско-норвежским линиям SNBL ESRF (особенно Дмитрию Чернышеву) за возможность проведения экспериментов по широкоугольному рассеянию синхротронного излучения, научно-исследовательскому центру GKSS (особенно Хельмуту Эккерлебе и Андреасу Шрайеру) за предоставленную возможность проведения экспериментов по малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов, Междисциплинарному ресурсному центру по направлению «Нанотехнологии» СПбГУ (особенно Антону Бондаренко и Владимиру Михайловскому) за проведение сканирующей электронной микроскопии, а также Институту физики конденсированного состояния Технического университета г. Брауншвайга (особенно Дирку Менцелю, Йоахиму Шёнесу и Питеру Лемменсу) за возможность проведения магнитометрических измерений. Кроме того, автор благодарит сотрудников Петербургского института ядерной физики (особенно Вадима Дядькина, Александру и Андрея Чумаковых) за плодотворные обсуждения полученных результатов, своих друзей и жену за участие и моральную поддержку.