

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию ГРЕЧИШКИНА Ростислава Михайловича «Доменная структура ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений в области магнитных фазовых переходов», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности
01.04.11 – Физика магнитных явлений

Диссертационная работа Гречишкина Ростислава Михайловича посвящена экспериментальному изучению механизмов эволюции мартенситной и магнитной доменной структуры ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений, которые привлекают внимание исследователей, как своими необычными физическими свойствами, так и широким практическим применением в различных технических устройствах.

Последние десятилетия ознаменованы резким ростом активности физических и прикладных исследований известных и создаваемых вновь функциональных магнитных материалов (ферроиков), свойства которых организуют или конструируют таким образом, чтобы они могли удовлетворять конкретному назначению. Поиск новых функциональных материалов является одной из важнейших задач физического материаловедения и физики конденсированного состояния.

Фундаментальной особенностью ряда магнитоупорядоченных мультиферроидных металлических сплавов является возможность управления их свойствами с помощью внешних воздействий – температурных, механических, напряжений, электрического и (или) магнитного поля. Яркими представителями этого класса материалов являются мультиферроики на основе сплавов Гейслера $Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga$. Уникальное сочетание целого ряда перспективных для практических применений аномалий физических свойств привлекло к их исследованию большое количество исследовательских групп.

Несмотря на бурный всплеск числа публикаций по рассматриваемой тематике, многие фундаментальные вопросы формирования свойств ферроиков остаются нерешёнными. В особой мере это относится к магнитоупорядоченным соединениям, в которых сочетание ферромагнетизма и структурных фазовых превращений открывает новые перспективы для создания устройств, с помощью которых возможно управление формой и размерами рабочих элементов при наложении внешнего магнитного поля. Специфическая особенность магнитоупорядоченных ферроиков заключается в том, что взаимодействующими сторонами здесь выступают большие скоррелированные ансамбли структурных и ферромагнитных доменов.

Представляется вполне очевидным, что выяснение механизмов магнитоиндукционных явлений в этих сплавах и разработка технически ценных материалов должно проводиться параллельно с экспериментальными исследованиями их мартенситной и магнитной доменной структуры. Такие исследования представляют и самостоятельный интерес для развития теории макро- и микрогетерогенных магнетиков. Особую ценность в этом отношении имеют прямые наблюдения доменной структуры. Однако именно этому направлению исследований до последнего времени уделялось минимальное внимание. Такое положение вещей связано, по всей видимости, с тем, что

при внешней простоте экспериментальное исследование доменной структуры остаётся достаточно сложным и трудоёмким. Ни один из множества известных способов наблюдения доменной структуры не является универсальным, и в реальной работе приходится использовать комбинации различных методик.

Изложенные обстоятельства определяют **актуальность** разрабатываемого в диссертации Гречишкина Р.М. методологического подхода к комплексному экспериментальному исследованию взаимосвязанных процессов формирования магнитной и мартенситной доменной структуры ферромагнитных материалов ферроидного типа.

Диссертация содержит 234 страницы и 139 рисунков, состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель исследований, обоснована научная новизна полученных результатов, показана практическая значимость наблюдаемых явлений, изложены основные положения работы, выносимые на защиту. Первая глава диссертации является обзорной. В ней подробно рассмотрены работы, описывающие мартенситные превращения в сплавах Гейслера с памятью формы и показано, что в таких сплавах особенно велика роль доменной структуры. Подробно рассмотрены механизмы поведения доменной структуры при ориентационных фазовых переходах в интерметаллических соединениях. Убедительно показана необходимость развития взаимодополняющих экспериментальных методов для выявления и исследования мартенситной и магнитной доменной структуры.

Вторая глава посвящена рассмотрению методологии магнитооптических исследований доменной структуры и магнитных свойств. Особое внимание уделяется развитию разработанного автором комплементарного подхода к выявлению и анализу механизмов эволюции взаимодействующих ансамблей мартенситной и магнитной доменной структуры при температурных воздействиях. Описаны авторские решения оптических схем для магнитооптической визуализации микро и макрораспределений магнитных полей и поля вихревых токов.

В третьей главе представлены впервые полученные диссидентом экспериментальные результаты по исследованию доменной структуры и магнитных свойств интерметаллических соединений с анизотропией «лёгкая плоскость» $DyCo_{5,2}$, $TbCo_{5,1}$ и Sm_2Fe_{17} с плоскостной магнитной анизотропией. Магнитооптическими методами обнаружена анизотропия шестого порядка в базисной плоскости гексагонального соединения $TbCo_{5,1}$. При систематическом исследовании процессов водородного охрупчивания и реакций азотирования порошков Sm_2Fe_{17} доказано образование периферийной зоны толщиной порядка 50 мкм с чётко выраженной структурой 180° -ных доменов. Полученные результаты четко показывают, что магнитооптические наблюдения доменной структуры обеспечивают получение такой информации о составе и свойствах отдельных частиц порошка, которая недоступна для интегральных магнитометрических измерений на порошковых ансамблях.

Четвертая глава посвящена изучению мартенситной и магнитной доменной структуры моно-, поли- и нанокристаллических сплавов Гейслера разного состава. Совместное применение методов термомагнитного анализа (ТМА) для определения температуры мартенситных и магнитных переходов и параллельные прямые наблюдения мартенситной и магнитной доменной структуры позволили автору наблюдать магнитный тепловой эффект Баркгаузена в микрокристаллах $NiMnGa$ сплавов Гейслера, связанный со скачкообразной перестройкой мартенситных доменов. Методами светлополевой и

поляризационной оптической микроскопии диссертанту удалось наблюдать процессы формирования и перестройки мартенситной доменной структуры и даже количественно оценивать деформации. Показано, существование взаимосвязи между мартенситными двойниками и магнитными доменами и выявлены условия взаимодействия границ мартенситных доменов с дефектами кристаллической структуры. Полученные в четвертой главе результаты показывают, что основные закономерности формирования и взаимодействия взаимосвязанных структур мартенситных и магнитных доменов моно-, поликристаллических ферромагнитных сплавов Гейслера $\text{Co}_{2+x}\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}$ и $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ подобны друг другу.

В пятой главе рассмотрены вопросы возможностей практического применения результатов исследования.

Среди наиболее существенных научных результатов, имеющих важное научное и практическое значение, хотелось бы отметить следующие:

1. Развитие экспериментальной методологии комплексных исследований магнитной и мартенситной доменной структуры ферроидных материалов в их взаимосвязи между собой.
2. Установление комбинированными методами термомагнитного анализа и прямых оптических и магнитооптических наблюдений новых проявлений эффекта Баркгаузена – взаимосвязанных термоиндукционных скачкообразных процессов перестройки кристаллической структуры и магнитного состояния ферромагнитных материалов с эффектом памяти формы.
3. Предложение новой концепции термоуправляемых постоянных магнитов на основе двухподрешёточных высококоэрцитивных соединений с ферримагнитным типом упорядочения и её апробация.
4. Разработка новых аспектов цифровой дифференциальной поляризационно-оптической микроскопии магнитоупорядоченных материалов, обладающих двойным лучепреломлением. Предложенные алгоритмы обработки измерительной информации позволяют повысить качество изображений и расширить информативные возможности оптической микроскопии.
5. Построение на основе уникальных трёхмерных наблюдений существующих взаимосвязанных структур мартенситных и магнитных доменов в массивных поликристаллах $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ схем кооперированной структуры мартенситных и магнитных доменов.

Обоснованность научных положений и выводов, обсуждаемых в диссертации, подтверждается подробным описанием экспериментальных методов исследования и анализа доменной структуры, основанных на магнитооптической визуализации с помощью твердотельных одноосных и планарных индикаторных сред. Представленные в диссертации подходы подкреплены физическим обоснованием качественной и количественной оценки микрораспределения магнитных полей, что позволяет понять особенности получения результатов и убедиться в их достоверности.

Рукопись диссертации в целом хорошо оформлена и содержит много прекрасных иллюстраций. Вместе с тем, можно отметить ряд недочётов.

(1) На серии рис. 5.3 (с.183 диссертации) представлена доменная структура монокристалла $GdCo_3Cu_2$ до и после инверсии спонтанной намагниченности. Изображения (c) и (d), как и следовало ожидать для одноосных МОИП, являются бинарными, в отличие от кадров (a) и (b), на которых видны три (?) градации серого. Что это – ошибка в эксперименте или опечатка? Далее, на кадре (e), одна из фаз имеет внутреннюю вторичную ДС, а вторая фаза не имеет. Какова причина этого?

(2) На рис. 5.7 (с. 188) не указана геометрия съёмки – полярный или продольный эффект Керра? Отсутствие этих данных не позволяет произвести расшифровку структуры доменов.

(3) Рис. 3.4 (с.113 дисс.), перегружен второстепенными деталями, для разбирательства которых требуются несоразмерные усилия и траты времени. Кроме того, в уменьшенном виде в тексте автореферата (с. 14) чтение пояснительных обозначений вообще становится весьма проблематичным.

(4) Рисунок 27 (с. 29 автореферата) читается с трудом из-за низкого разрешения.

Указанные недостатки не снижают положительного впечатления о диссертации в целом. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, написана логически последовательно и понятным языком. По существу, она определяет основы комплементарного исследования структурных и магнитных фазовых превращений в сплавах Гейслера и высокоанизотропных редкоземельных соединениях с переходными металлами, а также указывает новые возможности их практического применения.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на тщательной отработке методик и калибровке измерительных устройств разработанных в процессе подготовки диссертации экспериментальных установок, корреляции полученных экспериментальных результатов с результатами работ экспериментаторов из других научных организаций и результатами теоретических работ. Материалы диссертации обсуждались более чем на 25 российских и международных конференциях и семинарах различного уровня, подробно опубликованы (50 работ) и защищены патентами (6 патентов). Они получили признание у специалистов и цитировались в литературе.

Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации

Практическая ценность диссертации определяется, прежде всего, разработкой новых эффективных методик исследования процессов перемагничивания и реализацией методик в виде действующих экспериментальных установок. Ряд устройств, разработанных для магнитооптических установок, имеют самостоятельную практическую значимость. Полученные в работе результаты вносят существенный вклад в понимание механизмов перемагничивания в условиях взаимодействия магнитных доменов со структурными доменами в области фазовых превращений сплавов с памятью формы. Это расширяет возможности практического применения этих сплавов. На основании результатов проведенных исследований процессов перемагничивания пленок предложены и защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами новые магнитооптические устройства: магнитные сенсоры температуры, магнитооптические способы количественной визуализации и топографирования магнитных полей.

Результаты работы могут быть использованы в Институте радиотехники и электроники РАН, Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, Институте общей физики РАН, Институте физики металлов УРО РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, Московском институте электронной техники и др.

Диссертация Гречишко Р.М. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на современном уровне, она содержит новые подходы к решению актуальных задач. Достоверность результатов и обоснованность выводов не вызывают сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Полученные в работе результаты могут быть использованы в работе лабораторий и научных центров, занимающихся исследованиями магнитных материалов.

Диссертация Гречишко Р.М. «Доменная структура ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений в области магнитных фазовых переходов» является законченной квалификационной работой и по актуальности, достоверности, научной новизне, теоретической и практической значимости отвечает требованиям п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени доктора наук (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.13 с изменениями от 21.04.2016 г. №335), а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник кафедры магнетизма
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Елена Александровна
Ганьшина

5.12.2016 г.

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2
e-mail: eagan@mail.ru
тел.: 89036890379

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора Ганьшиной Елены Александровны
удостоверяю.

ДЕКАН

Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Профессор

Н.Н. Сысоев