

О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертацию Мищенко Ильи Никитича «Развитие многоуровневых моделей магнитной динамики однодоменных частиц для описания кривых намагничивания и мёссбауэровских спектров магнитных наноматериалов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **05.27.01** – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Диссертационная работа И.Н. Мищенко посвящена исследованию магнитной динамики ансамблей наночастиц, которые в последнее время привлекают всё большее внимание в связи с возможностью их применения в новых устройствах и технологиях, таких как магнитные и магнитооптические средства записи информации, феррожидкости, ЯМР-томография, биомедицина, а также в других областях. Это определяет **актуальность** проведения систематических исследований их структурных и магнитных свойств, и необходимость адекватного анализа полученных экспериментальных данных. Кроме эффектов поверхности, ключевое отличие наночастиц от массивных материалов состоит в значительном влиянии на их поведение тепловых возмущений, которые нельзя игнорировать при исследовании таких объектов. Это требует развития новых подходов, учитывающих необычные термодинамические и магнитные свойства нанокompозитов.

В настоящее время феноменологические модели магнетизма однодоменных частиц основаны на рассмотрении их суммарного магнитного момента, и в основном применимы лишь к ферромагнетикам. Описание веществ с антиферромагнитным упорядочением сводится к упрощённому представлению о ферримагнетизме (т.е. наличие нескомпенсированного магнитного момента), при котором обменное взаимодействия между магнитными подрешётками часто не учитывается. При этом случай равных моментов подрешёток вообще выпадает из поля зрения. В то же время именно антиферромагнетики привлекают всё большее внимание учёных и технологов из-за существования в них высокочастотных обменных мод терагерцового диапазона, благодаря чему эти материалы оказываются весьма перспективными для технологии сверхвысокочастотной радиотехники и электроники.

Диссертационная работа И.Н. Мищенко посвящена развитию новых моделей магнитной динамики наночастиц разной магнитной природы и исследованию специфических свойств наноматериалов методами магнитометрии и гамма-резонансной спектроскопии, что делает тему диссертационной работы **актуальной и своевременной**.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, основных выводов и содержит 125 страниц, в том числе 2 приложения, 28 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 104 наименований.

Во **введении** автор определяет область исследования и даёт общую характеристику работы, формулирует основные положения диссертации, обосновывает актуальность, научную новизну и практическую значимость полученных результатов.

Первая глава содержит обзор работ, касающихся получения, использования и изучения частиц нанометрового размера. Рассматриваются стандартные модели магнетизма однодоменных частиц: петли гистерезиса в представлении Стонера и Вольфарта, релаксация магнитного момента в двухуровневой модели Нееля, тепловые флуктуации намагниченности в подходе Брауна. Излагаются основы эффекта Мёссбауэра и гамма-резонансной спектроскопии. Подробно обсуждается универсальная форма мёссбауэровских спектров магнитных наночастиц в модели Джонса и Шриваставы, учитывающей случайные переходы между соседними состояниями частицы под действием тепловых возмущений. Приводятся выражения для формы релаксационных гамма-резонансных спектров магнитных наночастиц при электрическом квадрупольном расщеплении ядерных уровней.

Далее диссертант проводит точное сравнение картин магнитной динамики в представлениях Нееля и Джонса–Шриваставы и обосновывает алгоритм расчёта скорости релаксации в многоуровневой модели как наименьшего ненулевого собственного значения трёхдиагональной матрицы случайных переходов. Рассмотренные универсальные подходы применены к исследованию магнитных фазовых переходов в Кондо-соединении CePdSn методом мёссбауэровской спектроскопии на ядрах ^{119}Sn . Здесь впервые проведен количественный анализ распределения магнитных сверхтонких полей на ядрах олова, и установлена связь характера распределения со значениями релаксационных параметров. Также определена величина энергии анизотропии доменов в области температур антиферромагнитного упорядочения.

Вторая глава посвящена развитию теории магнитной динамики наночастиц во внешнем магнитном поле. Описывается квантовая статистика магнитных наночастиц в представлении их средних моментов, впервые рассматриваются случайные квантовые переходы между стационарными состояниями частицы и обосновывается классическое приближение для релаксации. Квантовый подход используется для расчёта равновесных кривых намагничивания ансамбля однодоменных частиц и для случая нетекстурированных систем. В классическом пределе доказывается универсальный характер поведения начальных участков кривых намагничивания.

Далее, здесь приводятся алгоритмы расчёта мёссбауэровских спектров в случае релаксации магнитных наночастиц во внешнем магнитном поле в

классическом приближении. Созданный на этой основе диагностический программный комплекс применяется для исследования процессов магнитной релаксации в коммерческих образцах фармацевтической феррожидкости. Определены характерные величины энергии магнитной анизотропии частиц и их распределение по размерам.

В третьей главе описываются особенности термодинамики идеальных антиферромагнитных наночастиц (с двумя магнитными подрешётками). Рассматривается динамика двух равных магнитных моментов подрешёток, связанных обменным взаимодействием и находящихся в поле аксиальной магнитной анизотропии. Рассмотрены случаи аксиально симметричного решения уравнений движения и общий случай нутаций намагниченностей подрешёток, определяемый двумя интегралами движения: полной энергией моментов и их суммарной проекцией на ось анизотропии. Проанализировано влияние специфичной магнитной динамики антиферромагнитных частиц на форму их мёссбауэровских спектров. Описывается квантовая статистика идеальных антиферромагнитных частиц и проводятся расчёты их термодинамических характеристик. Доказывается тождественность квантово-механического и макроскопического подходов в предельном случае высоких макроспинов магнитных подрешёток.

Далее, разработанные новые модели динамики антиферромагнитных частиц применяются автором для анализа мёссбауэровских спектров и определения фазового состава ультратонких порошков трёхвалентного оксида железа. В отличие от стандартного подхода, требующего введения дополнительной слабомагнитной компоненты для описания спектров, диссертант применил свою модель релаксации. Это позволило ему согласованно описать наблюдаемую экспериментальную картину и определить основные параметры антиферромагнитных наночастиц – энергию их анизотропии и силу обменной связи подрешёток. В результате исследуемые образцы были идентифицированы как антиферромагнитная модификация, характерная для гематита Fe_2O_3 .

Таковы основные результаты работы И.Н. Мищенко.

По диссертационной работе можно сделать несколько замечаний:

1. По-видимому, описанные в работе модели (трактовки мессбауэровских спектров) в большинстве случаев относятся к диэлектрическим магнетикам, в которых магнитное поле на ядре мессбауэровского атома возникает от локализованного магнитного момента. В «тяжелофермионном» соединении CePdSn магнитное поле на ядре диамагнитного олова индуцируется спин-поляризованными делокализованными электронами. Вероятно, физика релаксации этих процессов отличается от ситуации в материалах с железом? Кроме того, не совсем понятно как тут проявляется понятие однодоменности наночастиц.

2. С точки зрения терминологии неясен переход от «спина» к «магнитному моменту» и наоборот. При сопоставлении квантовой и классической моделей автор употребляет такие выражения как «магроспины», «большие спины магнитных подрешеток». Необходимо более четкое определение этих понятий. Чем отличаются «большие спины» от магнитных моментов подрешеток ?

3. Для более четкой последовательности изложения материала, решение задачи на собственные значения релаксационной матрицы, построенное в первой главе, стоило обобщить на случай наличия внешнего магнитного поля.

4. Подписи к заимствованным рис. 1г и рис. 3, не содержат ссылок на соответствующие оригинальные работы.

5. В целом диссертация и автореферат написаны хорошим языком, однако имеются немногочисленные опечатки, неточности и жаргонные выражения («микромагнитные вычисления», «тяжелофермионное соединение»), в некоторых формулах нет пояснений к приведенным индексам.

Сделанные замечания в большей части носят характер пожеланий и не влияют на общую высокую оценку диссертации. Полученные в работе результаты следует считать **достоверными**, а выводы диссертации достаточно **обоснованы** и обладают **новизной**.

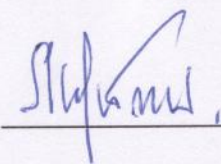
Закключение. По моему мнению, диссертационная работа И.Н. Мищенко удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат и публикации по теме диссертационной работы полностью отражают ее содержание.

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится решение ряда актуальных и важных задач физики приборов на квантовых эффектах. С помощью новой методики диагностики магнитных частиц и кластеров нанометровых размеров впервые исследованы магнитные флуктуации в соединении CePdSn, проведена подробная характеристика коммерческих образцов феррожидкости ARA-250 и представлены убедительные свидетельства формирования фазы гематита в наночастицах Fe_2O_3 при размерах зёрен порядка 3 нм. Полученные **новые результаты** представляются вполне надёжными и достоверными и могут быть учтены при разработке новых устройств и приборов сверхвысокочастотной радиотехники и наноэлектроники.

Считаю, что в своей работе И.Н. Мищенко проявил широкую эрудицию в нескольких научных направлениях, получил интересные как в научном, так и в прикладном отношении результаты, а также сделал по ним обоснованные выводы. Содержание работы и форма его представления соответствуют

требованиям пунктов 9 - 14 "Положения о порядке присуждения ученых степеней" ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 года за № 842 (пункт 28), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Мищенко Илья Никитич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

05.12.2016



Любу́тин Игорь Савельевич,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния)
профессор, заведующий Отделом ядерных методов и магнитных структур
ФГУ ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Служебный адрес, телефон:

119333, Российская Федерация, г. Москва,
Ленинский проспект, 59,
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
Тел.: 8 (499) 135-6250
Электронная почта: lyubutinig@mail.ru

Подпись И.С. Любутина подтверждаю:

Учёный секретарь
Федеральное государственное учреждение
Федеральный научно-исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук

кандидат физ.- мат. наук
Телефон: 8 (499) 135-63-11, Факс: 8 (499) 135-10-11,
Электронная почта: office@crys.ras.ru



Ю.А. Дьякова