

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Перовой Натальи Николаевны
на тему: «Магнитооптическое зондирование наноструктурированных
магнитных материалов»
по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений

Актуальность темы исследования

В последние годы наблюдается устойчивый и постоянно возрастающий интерес к нанотехнологиям как к одному из ключевых драйверов научно-технического прогресса. Этот интерес не случаен: он во многом вызван уникальными, зачастую аномальными свойствами наноматериалов, которые открывают принципиально новые возможности в самых разных областях человеческой деятельности — от медицины и энергетики до авиастроения и электроники. Если на заре развития нанотехнологий основное внимание уделялось синтезу и изучению простейших наночастиц, то современный этап характеризуется переходом к конструированию сложных, функционально ориентированных наносистем.

Наноматериалы позволяют создавать устройства и системы, которые были невозможны при использовании только классических, объемных материалов. Среди наиболее ярких примеров можно выделить сверхпрочные и сверхлегкие металлические сплавы, по прочности превосходящие сталь при массе, сравнимой с пластиком; функционирующие одноатомные транзисторы, которые в перспективе позволят преодолеть физические пределы законов Мура; высокоэффективные солнечные элементы на основе перовскитных квантовых точек, демонстрирующие рекордные показатели преобразования энергии; суперконденсаторы с гигантской удельной емкостью, способные заряжаться за секунды и хранить энергию, сравнимую с аккумуляторными батареями; а также принципиально новые катализаторы для производства «зеленого» водорода, которые многократно ускоряют реакции расщепления воды. Все эти достижения становятся возможными именно благодаря проявлению квантово-размерных эффектов на наноуровне.

Особое место в ряду наноматериалов занимают магнитные наноматериалы. Их уникальность заключается в том, что они служат платформой для создания так называемых «умных» систем, поведением которых можно управлять дистанционно и прецизионно с помощью внешнего магнитного поля. В отличие от электрического поля, магнитное поле не

требует контакта с объектом и безопасно для большинства биологических систем, что открывает широкие перспективы для биомедицинских приложений — адресной доставки лекарств, магнитной гипертермии, сепарации клеток.

Актуальность исследований в этой области обусловлена фундаментальным физическим фактом: при переходе вещества в наноразмерное состояние (характерные размеры обычно составляют менее 100 нанометров, а во многих случаях — десятков нанометров) его магнитные свойства кардинальным образом меняются по сравнению с объемным аналогом. В массивном ферромагнетике мы имеем доменную структуру, тогда как в наночастице может существовать только один магнитный домен, что коренным образом меняет механизмы перемагничивания. Это приводит к появлению таких эффектов, как суперпарамагнетизм (когда наночастица ведет себя как гигантский магнитный момент, флуктуирующий подобно парамагнитному атому), обменное смещение петли гистерезиса, гигантское магнитосопротивление (открытое в многослойных наноструктурах) и ряд других явлений. Каждый из этих физических эффектов является перспективной основой для новых технологий: от сверхплотных жестких дисков (CPP-GMR) и спиновой электроники до микроволновых поглотителей и высокочувствительных магнитных сенсоров.

Степень разработанности проблемы. Несмотря на впечатляющий прогресс в области синтеза и исследования магнитных наноматериалов, достигнутый за последние два десятилетия, многие вопросы остаются открытыми. Существующие методы диагностики не всегда позволяют в полной мере охарактеризовать локальные магнитные конфигурации наномасштабных объектов. В частности, требуют дальнейшего развития и совершенствования высокоразрешающие методы исследования свойств магнитных наноматериалов, способные работать в реальных условиях их функционирования (при различных температурах, в магнитных полях, в жидких средах). Особую остроту приобретает задача корреляции магнитных свойств с морфологией, структурой и химическим составом нанообъектов на индивидуальном уровне.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы Н.Н. Перовой не вызывает сомнений. Работа направлена на решение важной научно-технической задачи, связанной с развитием методологии исследования магнитных наноматериалов, что соответствует мировым трендам в области физики конденсированного состояния, материаловедения и нанотехнологий.

Полученные в диссертации результаты лягут в основу новых подходов к неразрушающему контролю качества наноматериалов, что имеет как фундаментальное, так и прикладное значение для дальнейшего прогресса в этой стремительно развивающейся области.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка работ диссертанта по теме диссертации и списка литературы. Общий объем работы составляет 157 страниц, включая 59 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 196 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности результатов, апробации и публикациях, а также описаны личный вклад автора и структура диссертации.

Первая глава диссертационной работы носит обзорный характер и посвящена систематическому анализу современных представлений о наноструктурированных магнитных материалах. В центре внимания находятся ключевые классы таких систем, которые в настоящее время вызывают наибольший интерес со стороны фундаментальной физики конденсированного состояния и прикладного материаловедения. К ним относятся, в первую очередь, нанокомпозиты, представляющие собой гетерогенные системы с магнитными наночастицами, внедрёнными в немагнитную или диэлектрическую матрицу; многослойные структуры с чередующимися магнитными и немагнитными слоями толщиной от долей до единиц нанометров; а также аморфные (стеклообразные) и нанокристаллические системы, сочетающие в себе ближний порядок в расположении атомов с высокой плотностью дефектов и границ зёрен. Такой широкий охват позволяет выявить общие закономерности и специфические особенности магнитного поведения материалов при переходе к наноразмерному состоянию. Рассмотрена роль внешних воздействий при изменении магнитных свойств изучаемых материалов.

Вторая глава диссертационной работы посвящена подробному описанию экспериментальных методик, которые были использованы для исследования магнитных свойств наноструктурированных материалов. В первую очередь, рассматривается магнитооптическая Керр-спектроскопия. Этот метод позволяет получать спектральные зависимости магнитооптических параметров в широком диапазоне длин волн, что даёт

ценную информацию об электронной структуре и типе магнитного упорядочения. Дополняет его Керр-микроскопия — визуализационная техника, с помощью которой можно непосредственно наблюдать доменную структуру поверхности магнитного материала и её эволюцию во внешнем магнитном поле. Разрешение этого метода позволяет изучать перестройку доменных границ, процессы зарождения и движения доменов, что особенно важно для анализа неоднородных и наноструктурированных систем. Наряду с магнитооптическими техниками, в работе широко применяется вибрационная магнитометрия (VSM — Vibrating Sample Magnetometry). Этот метод является одним из наиболее точных и распространённых способов измерения интегральных магнитных характеристик материалов. В конце главы приведен перечень исследованных образцов и описание особенностей их изготовления, что формирует основу для анализа магнитных и магнитооптических свойств в последующих главах.

Третья глава посвящена анализу результатов исследования нанокомпозитных и многослойных систем. Рассматриваются концентрационные зависимости, перколяционные переходы, особенности магнитооптического отклика и доменной структуры. Описаны закономерности перехода от суперпарамагнитного к ферромагнитному состоянию и показана роль морфологии и межфазных взаимодействий. Получен ряд новых оригинальных результатов, показано, что на основе проведенных исследований можно утверждать, что в условиях малой толщины и ограниченного объёма ферромагнитной фазы магнитный отклик определяется слабо взаимодействующими независимыми магнитными моментами гранул. Сформулированы выводы, обобщающие полученные результаты.

В четвертой главе представлены результаты исследований аморфных и нанокристаллических материалов. Рассматривается влияние термообработки и поверхностной модификации на магнитные свойства, доменную структуру и процессы перемагничивания. Особое внимание уделено роли анизотропии и магнитных неоднородностей. В конце главы приведены выводы, сформулированные на основе полученных результатов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы в целом.

Научная новизна и значимость результатов

Автором получен ряд новых результатов, представляющих особый интерес. Среди них хочется отметить следующие:

- разработан комплексный подход к магнитооптическому зондированию, объединяющий Керр-магнитометрию, Керр-спектроскопию и Керр-микроскопию с вибрационной магнитометрией;

- установлены закономерности изменения магнитооптического отклика в нанокompозитах при варьировании концентрации магнитной фазы;

- выявлены концентрационные пороги переходов между суперпарамагнитным, суперферромагнитным и ферромагнитным состояниями;

- определено влияние параметров многослойных структур на спектральные особенности магнитооптического отклика;

- выявлена роль приповерхностных эффектов (нанокристаллизация, структурная модификация) в формировании магнитных свойств аморфных материалов;

- продемонстрирована высокая чувствительность магнитооптических методов к локальной магнитной неоднородности.

Полученные автором результаты обладают научной новизной и представляют интерес для дальнейшего развития фундаментальных исследований в области физики магнитных явлений и магнитооптики, а также для практического использования.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается детальным анализом литературы, комплексным использованием современного экспериментального оборудования, выбором методов, взаимным сопоставлением данных магнитооптических и магнитометрических измерений, а также согласованностью полученных результатов с данными, представленными в научной литературе.

Результаты работы доложены на международных и российских конференциях и опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

При ознакомлении с диссертационной работой возникли следующие замечания:

1. Описание исследуемых образцов во второй главе страдает излишней лаконичностью и ограничивается одной таблицей на странице 62.
2. Практически на всех графиках в диссертации отсутствуют указания на погрешности. Некоторые пояснения о погрешности приводятся, но они не понятны. Например, указывается, что среднеквадратическая погрешность не превышала 10^{-4} рад, что соответствует доверительному интервалу 95 %. Не понятна единица измерения погрешности, ведь

использовался экваториальный эффект, где происходит изменение интенсивности.

3. Хотелось бы видеть ссылки на собственные работы автора выделенными, чтобы не искать их по списку литературы.
4. Дается определение магнитооптической спектроскопии на основе эффекта Керра: «метод исследования магнитных и электронных свойств материалов, основанный на регистрации спектральной зависимости вращения плоскости поляризации и изменения эллиптичности света, отражённого от поверхности магнетика». Между тем в данной работе применяется экваториальный эффект Керра, где изменяется интенсивность света.
5. Можно ли утверждать, что МО эффект является высокочувствительным, если величина эффекта порядка 10^{-3} .
6. Рис. 14. Приведены данные для микрокристаллического Со и поликристаллического Со, которые в значительной степени различаются. Между тем представляется, что морфологической разницы нет. Не очень понятно, зачем такие данные приводятся.
7. Следовало бы пояснить, что понимается под суперферромагнитным упорядочением.
8. При обсуждении формирования магнито неоднородного состояния указывается на нелинейность приповерхностных петель гистерезиса без формирования устойчивых доменных структур. Но намагниченность суперпарамагнитных частиц также является нелинейной.
9. В многослойных системах возможны интерференционные эффекты, которые могут приводить к усилению МО эффектов. Эти вопросы в работе не обсуждаются.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки выполненной работы.

Автореферат и публикации автора полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Общее заключение по диссертации:

Диссертация Перовой Натальи Николаевны является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи в области физики магнитных явлений, связанной с разработкой комплексного подхода к исследованию магнитных нанокompозитных материалов.

Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к

работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует пп. 3, 4 паспорта специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Соискатель Перова Наталья Николаевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Панина Лариса Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технологии материалов электроники НИТУ «МИСИС»

27.04.2026



Контактные данные:

119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1. Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Институт новых материалов, кафедра технологии материалов электроники.



Подпись Л.В. Паниной удостоверяю

