

**ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
Гаршина Владимира Валентиновича  
на тему: «Исследование магнитооптических и магнитных свойств  
наноразмерных структур на основе аморфных сплавов и металлов,  
распределенных в диэлектрических и полупроводниковых матрицах»  
по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений**

Магнитные наноконпозиты привлекают большое внимание в связи с их уникальными свойствами и представляют несомненный интерес с фундаментальной точки зрения. Физические свойства наноконпозитов могут заметно отличаться от свойств компонентов, что позволяет получать материалы с уникальными заданными характеристиками. Исследования магнитных наноконпозитов способствуют пониманию особенностей явления перколяции, квантовых размерных эффектов, а также важны для изучения влияния различных типов взаимодействий на свойства неупорядоченных систем. Кроме того, магнитные наноконпозиты обладают большими перспективами для практического применения. В частности, в них наблюдаются гигантское магнитосопротивление, туннельное магнитосопротивление, аномальный эффект Холла и магниторефрактивный эффект. Эти явления могут быть использованы для разработки устройств магнитной памяти и сенсоров магнитного поля.

В зависимости от концентрации наночастиц магнитные наноконпозиты могут проявлять суперпарамагнитные или ферромагнитные свойства. Свойства наноконпозитов существенно зависят от концентрации, материала, размера и формы наночастиц, их распределения по размерам, поверхностных эффектов, образования цепочек наночастиц и т.д. При этом микроструктура и свойства магнитных наноконпозитов могут изменяться в зависимости от технологических условий их производства, а также в результате последующего отжига. Несмотря на многочисленные исследования подобных

структур, до сих пор нет однозначного понимания ряда вопросов, связанных с влиянием состава фаз, микроструктуры и морфологии на магнитные, магнитооптические и транспортные свойства нанокompозитов.

В связи с вышеизложенным тема диссертационной работы Гаршина В.В., посвящённой исследованию влияния фазового состава, структуры и технологических параметров изготовления на магнитооптические свойства нанокompозитов, несомненно, является весьма актуальной.

Диссертация Гаршина В.В. написана хорошим литературным языком, текст изложен на высоком научном уровне. Работа хорошо структурирована, материал представлен последовательно и логично. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, а также списка литературы, включающего 125 ссылок. Общий объём диссертационной работы составляет 145 страниц, включая 60 рисунков и 5 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, а также содержатся сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

В **первой главе** диссертационной работы представлен обзор литературных данных, посвящённых магнитным нанокompозитам и способам их изготовления. Проведён подробный анализ работ по магнитным состояниям нанокompозитов, и большое внимание уделено явлению суперферромагнетизма. Также представлен обзор работ по исследованиям магнитооптических свойств нанокompозитов. В заключительном разделе главы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** изложена феноменология магнитооптических эффектов и представлены методы эффективной среды для теоретического описания свойств нанокompозитов. Приведено подробное описание методик

эксперимента и установок для исследования экваториального эффекта Керра (ЭЭК) и магнитных свойств образцов. Представлено описание исследуемых нанокompозитов и методов их получения.

**Третья глава** посвящена результатам исследований магнитных и магнитооптических свойств нанокompозитов  $\text{CoFeZr-(Al-O)}$ .

В разделе 3.2 представлены результаты исследований для нанокompозитов, полученных методом ионно-лучевого напыления в атмосфере аргона. Установлено, что с увеличением содержания металла происходит переход в смешанное двухфазное магнитное состояние с присутствием как отдельных суперпарамагнитных частиц, так и областей с ферромагнитным упорядочением. При этом дальний ферромагнитный порядок возникает при концентрациях ниже перколяционного порога проводимости. Показано, что в смешанном магнитном состоянии наблюдается нелинейность магнитооптического отклика по намагниченности. Также обнаружено нетипичное поведение зависимостей ЭЭК от магнитного поля в области высоких концентраций магнитной компоненты, характерное для магнитожёстких образцов, что связывается с ростом перпендикулярной магнитной анизотропии в результате формирования столбчатой структуры. Установлено также, что отжиг значительно сильнее влияет на магнитооптические свойства нанокompозитов, чем на магнитные свойства. Показано, что экспериментальные зависимости спектров ЭЭК для нанокompозитов  $\text{CoFeZr-(Al-O)}$  хорошо согласуются с результатами моделирования в рамках симметризованного приближения Максвелла Гарнетта с учётом квазиклассического размерного эффекта и распределения гранул по размерам.

В разделе 3.3 приведены результаты исследований магнитных и магнитооптических свойств нанокompозитов  $\text{CoFeZr-(Al-O)}$ , которые напылялись в атмосфере аргона с добавлением азота. Показано, что порог магнитной перколяции смещается в область более высоких концентраций магнитной фазы по сравнению с нанокompозитами, полученными в

атмосфере чистого аргона. Это обстоятельство указывает на появление нитридных оболочек вокруг металлических гранул. Установлено, что вследствие добавления азота при напылении нанокompозиты имеют более сложный состав с изменённой магнитной микроструктурой в области высоких концентраций металла.

В разделе 3.4 представлены результаты исследований магнитных и магнитооптических свойств нанокompозитов  $\text{CoFeZr-(Al-O)}$ , изготовленных методом послойного напыления в виде слоёв, получаемых в атмосфере аргона, и прослоек, напылённых в атмосфере аргона с добавлением азота. Установлено, что основной вклад в вид спектров и величину ЭЭК таких нанокompозитов вносят слои, полученные в атмосфере чистого аргона. Обнаружено, что нанокompозиты проявляют особенности, характерные для магнитомягких материалов в области концентраций выше порога магнитной перколяции, что свидетельствует об уменьшении перпендикулярной магнитной анизотропии.

В **четвёртой** главе приведены результаты исследования магнитооптических свойств нанокompозитов  $\text{CoFeB-C}$  и  $\text{Co-C}$  с полупроводниковой углеродной матрицей, а также нанокompозитов системы  $\text{CoFeB (SiO}_2\text{)}$  с диэлектрической матрицей. Обнаружено, что вид магнитооптических спектров нанокompозитов  $\text{CoFeB-C}$  слабо зависит от концентрации металлических гранул. Установлено, что в композитах металл-углерод значения магнитного порога перколяции не коррелируют со значениями порога перколяции, определёнными из транспортных измерений. Установлено, что изменения спектров ЭЭК нанокompозитов  $\text{Co-C}$  с увеличением концентрации металла свидетельствуют о переходе от аморфных гранул к кристаллическим гранулам кобальта. Особенности магнитооптических свойств нанокompозитов с полупроводниковой матрицей интерпретированы при помощи модели формирования нанокompозитов с учётом возможности химических реакций углерода с металлами и бором.

В заключении представлены **основные результаты и выводы** диссертационного исследования.

Все полученные автором результаты и положения, выносимые на защиту, обладают научной новизной. Из новых результатов диссертационной работы особый интерес представляют следующие.

1. Для нанокompозитов  $\text{CoFeZr}-(\text{Al}-\text{O})$  методами магнитооптической спектроскопии установлено, что при увеличении концентрации магнитных включений переход от суперпарамагнитного состояния к ферромагнитному происходит через образование смешанного магнитного состояния, включающего суперпарамагнитные гранулы и суперферромагнитные кластеры. Определён порог магнитной перколяции, при котором происходит переход от суперпарамагнитного состояния в смешанное двухфазное магнитное состояние. Показано, что изменение морфологии нанокompозитов в результате термомагнитного отжига приводит к расширению области аномального поведения спектров ЭЭК и к изменению значения порога магнитной перколяции.

2. Впервые исследованы особенности магнитооптических свойств нанокompозитов  $\text{CoFeZr}-(\text{Al}-\text{O})$  при добавлении азота в атмосферу напыления. Установлено, что добавление азота приводит к изменению вида магнитооптических спектров, величины магнитооптического отклика и к смещению порога магнитной перколяции в область более высоких концентраций магнитной компоненты, что связано с возникновением нитридных оболочек вокруг металлических гранул.

3. Установлено, что особенности магнитооптических свойств нанокompозитов  $\text{CoFeB}-\text{C}$  и  $\text{Co}-\text{C}$  с полупроводниковой матрицей связаны с частичным смешиванием компонентов и образованием новых метастабильных фаз углерода с бором или ферромагнитными металлами в результате процессов самоорганизации при формировании нанокompозита.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что полученные результаты существенно расширяют представления о магнитной

микроструктуре и морфологии магнитных нанокompозитов разного состава и могут быть использованы для развития технологий получения новых нанокompозитных материалов с заданными свойствами для применений в различных областях техники.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, основывается на использовании современного научного оборудования, стандартных методов статистической обработки данных и подтверждается воспроизводимостью экспериментальных результатов. Обоснованность полученных результатов и выводов подтверждается согласием экспериментальных данных с результатами, ранее полученными в других магнитооптических исследованиях для аналогичных систем, а также хорошим согласием с результатами теоретического моделирования магнитооптических свойств для исследованных нанокompозитов.

Основные результаты работы полностью отражены в 8 публикациях в авторитетных российских и международных журналах. Полученные результаты были представлены на 5 всероссийских и международных конференциях, и должная апробация результатов диссертации не вызывает сомнений. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

К диссертационной работе Гаршина В.В. имеются небольшие **замечания.**

1. Часть рисунков в Главе 3 несколько перегружена экспериментальными зависимостями ЭЭК для различных концентраций металлической компоненты. Представляется, что удобней было бы привести только полевые и спектральные зависимости ЭЭК для каждой области концентраций металла, соответствующей определенному магнитному состоянию нанокompозитов.
2. Сравнение экспериментальных спектральных зависимостей ЭЭК с результатами моделирования в рамках симметризованного приближения Максвелла Гарнетта проведено только для образцов  $\text{CoFeZr}-(\text{Al}-\text{O})$ , изготовленных в атмосфере аргона. Однако для

нанокompозитов, которые напылялись в атмосфере аргона с добавлением азота, такое сравнение почему-то не представлено.

3. Результаты теоретического моделирования спектров ЭЭК удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для композитов CoFeZr-(Al-O) (рисунок 3.18). В то же время, при высоких значениях концентрации металлической компоненты положение отрицательного максимума ЭЭК в теории и эксперименте существенно различается. Однако причины возникновения такого расхождения в работе не обсуждаются.
4. В разделе 3.3 при анализе ЭЭК в нанокompозитах CoFeZr-(Al-O), полученных при напылении в атмосфере аргона с добавлением азота, целесообразно было бы добавить рисунки со сравнением с зависимостями ЭЭК для образцов, изготовленных в атмосфере чистого аргона.
5. Формулы составов нанокompозитов CoFeZr-(Al-O) в работе представляются различными способами (как с индексами, так и без них). На мой взгляд, следовало бы придерживаться единого способа обозначения составов образцов.


Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основного содержания работы и не изменяют общей положительной оценки диссертации Гаршина В.В.

Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений и критериям, определённым пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, и диссертация оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Гаршин Владимир Валентинович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
электрофизики новых функциональных материалов  
Института теоретической и прикладной электродинамики  
Российской академии наук (ИТПЭ РАН)  
Бузников Никита Александрович  
Дата

  
29 ноября 2024 г.

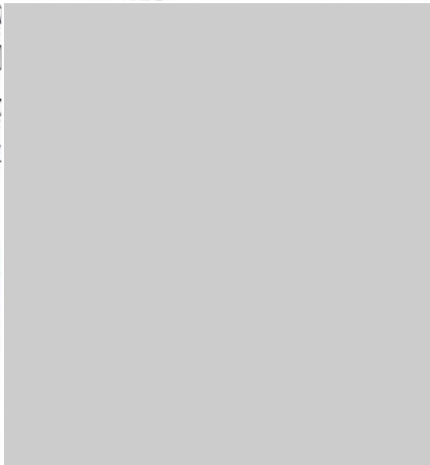
Контактные данные:

тел.: +7 (495) 485-9945, e-mail: buznikov@itae.ru  
Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация: 1.3.12. Физика магнитных явлений

Адрес места работы:

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теоретической и прикладной электродинамики  
Российской академии наук (ИТПЭ РАН)  
Тел.: +7 (495) 484-2683. Электронная почта: itae@itae.ru

Подпись Бузникова Н.А. по;  
Заместитель директора ИТПЭ  
по научной работе по информатическим  
вычислительным технологиям  
д.ф.-м.н., доцент

  
Владимир Николаевич