Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Огнева Алексея Вячеславовича «Анизотропия и микромагнитная структура низкоразмерных ферромагнетиков», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Последние годы характеризуются повышенным интересом к исследованиям физических свойств структур пониженной размерности, в том числе магнитных свойств. Это актуально, прежде всего, с точки зрения повышения плотности информации, разработки новых логических устройств и элементов памяти. Кроме того, известно, что основные свойства наноструктур могут отличаться от соответствующих свойств макроскопических тел, например более высокие значения обменного взаимодействия у магнитных наноматериалов и т.п. Магнитные свойства наночастиц могут определяться многими факторами, и систематическое исследование их влияния на магнитные свойства является важным направлением. Экспериментальное изучение вихревого состояния в наноструктурах и разработка способов управления им, изучение коллективного поведения в массивах нанообъектах также представляет отдельный интерес.

Диссертационная работа Огнева А.В. посвящена изучению влияния магнитной анизотропии на микромагнитную структуру систем пониженной размерности и управлению процессами перемагничивания в них. В задачи диссертации входило установление влияния анизотропий различной природы, в том числе наведенной формой структур, морфологией подложки, индуцированной напряжениями и т.п. на доменную структуру нанообъектов. Важной задачей также являлась разработка способов управления киральностью вихревого состояния в наноразмерных дисках и исследования магнитных свойств упорядоченных массивов таких объектов.

Актуальность диссертационной работы Огнева А.В. и решаемых в ней проблем и задач не вызывает сомнений. Работа выполнена на высоком научном и экспериментальном уровне, а представленный выбор объектов исследований покрывает широкий спектр наноструктур - от пленок до наноточек и их массивов, что позволяет рассматривать полученные результаты в качестве обобщающих.

Содержание диссертации

Работа состоит их введения, четырех глав и заключения, содержит 279 станиц текста, 81 рисунок, 5 таблиц и список цитированной литературы из 276 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, формулируется цель и задачи работы, изложены основные защищаемые положения, отражены научная новизна и практическая значимость диссертации.

Первая глава является методической и посвящена технологии получения объектов исследований – магнитных структур пониженной размерности. Также в граве приведен детальный обзор экспериментальных методов исследований структуры, морфологии, магнитной структуры и магнитосопротивления. Описана методика микромагнитного моделирования.

Результаты исследований и их обсуждения занимают три следующие главы, скомпонованные по признаку размерности объектов исследований – пленки, нанопроволоки и наноточки.

Во второй главе автор рассматривает магнитную структуру многослойных плёнок и влияние на неё ряда структурных параметров (напряжения в пленках, структурное качество границ раздела (интерфейсов) и т.п.) и косвенной обменной связи. Для плёнок Fe, разделенных немагнитной прослойкой на основе Pd и Ge (Раздел 2.1) показано, что структура границ раздела оказывает существенное влияние на магнитные свойства таких систем. В случае системы $[Fe/Ge]_{10}$ наблюдается размытие границы вследствие взаимной диффузии атомов Ge и Fe и формированию слабомагнитных и немагнитных фаз, что приводит к падению намагниченности. Граница раздела в плёнках с прослойкой Pd напротив, как утверждается в диссертации, резкая, хотя данных исследований поперечного среза не приводится. С другой стороны, большое несоответствие параметров решеток Fe и Pd приводит к образованию деформаций и дислокаций несоответствия, что индуцирует дополнительную магнитоупругую анизотропию. На основе такой интерпретации автор объясняет поведение намагниченности, коэрцитивной силы и тонкой магнитной структуры плёнок как функции толщины немагнитной прослойки.

Далее в этой главе рассматриваются магнитные свойства поликристаллических плёнок с косвенным обменным взаимодействием (Раздел 2.2) и доменная структура в таких же плёнках (Раздел 2.3). В качестве объектов исследования выступают системы со слабой (Co/Cu/Co) и сильной (Co/Ru/Co) антиферромагнитной связью. В первом случае автором показано, что доменная структура является сложной (малые размеры доменов и сложная форма доменных границ) вследствие флуктуаций магнитной анизотропии и косвенной обменной связи. Исследовано влияние величины обменной связи (которую изменяли с помощью длительного термического отжига) на доменную структуру и магнитные свойства. Во втором случае автор особое внимание уделяет плёнкам с антиферромагнитной связью, для которых сравнительно большие размеры доменов позволили детально изучить структуру доменных границ. Комбинируя экспериментальные данные, полученные с помощью методов Лоренцевой и магнитной силовой микроскопий, с результатами численного микромагнитного моделирования, Огневу А.В. удалось установить, что доменные границы в таких плёнках состоят из участков Неелевского типа и участков типа «голова-к-голове», разделенных вихрями и антивихрями. Проанализировано поведение вихрей и антивихрей в магнитном поле, показано их движение по доменным стенкам и аннигиляция. По результатам

исследований, изложенных в этой главе, автором предложен способ улучшения характеристик магнитных носителей информации.

Третья глава посвящена исследованию магнитных свойств нанопроволок и нанополосок различной природы – самоорганизованные на ступенчатых поверхностях (Раздел 3.1), вырезанные из сплошных пленок (Раздел 3.3) и полученные электролитическим осаждением в матрицу Al_2O_3 с последующим химическим травлением (Раздел 3.2). Для получения проволок различной ширины методом самоорганизации автором была разработана оригинальная методика с использованием поверхностного силицида меди (реконструкция 5,55×5.55-Cu). Анализируя процессы перемагничивания в структурно сплошных и несплошных проволоках Огнев А.В. делает вывод о влиянии магнитостатического взаимодействия на увеличение коэрцитивной силы. Сравнение экспериментальных данных и теоретических результатов позволило предложить модель перемагничивания через образование и движение поперечной доменной границы.

В разделе 3.2 автор исследует еще один вариант магнитной анизотропии, в этом случае наведенной деформацией. Объектом этих исследований выступили отдельные проволоки Ni, манипуляции с которыми производили кантилевером зондового микроскопа. Надо отметить, что кристаллическая структура проволок в этом разделе изучена лучше, чем любых других объектов в данной работе. Привлечение просвечивающей электронной микроскопии и микродифракции позволило Огневу А.В. установить характер деформаций: разлом по межзеренной границе и коалесценция зерен для случаев малого и большого радиусов кривизны, соответственно. Влияние деформации на микромагнитную структуру отдельных проволок было изучено при помощи магнитно-силовой микроскопии и микромагнитного моделирования. Установлено, что магнитная анизотропия, возникающая в проволоках вследствие деформации, изменяет направление оси легкого намагничивания, что приводит к развороту вектора намагниченности в проволоке и формированию ламинарной доменной структуры.

В следующем разделе (3.3) исследованы полоски Co, вырезанные из сплошной эпитаксиальной пленки. В отличие от случая самоорганизованных полосок (Раздел 3.1), в данном случае полоски могут располагаться как параллельно ступеням подложки, так и перпендикулярно, что приводит к еще одной магнитной анизотропии. Автором предложен способ управления магнитной структурой и процессами перемагничивания в нанополосках, используя конкуренцию между энергиями двух конкурирующих магнитных анизотропий – анизотропией, наведенной формой полоски и анизотропией, наведенной ступенями подложки. Показано зарождение вихрей в доменных границах в процессе перемагничивания, смещение которых сопровождается изменением полярности доменных стенок и переключением намагниченности в доменах.

В четвертой главе автор рассматривает магнитные свойства квази-нульмерных структур (наноточек). Раздел 4.1 является вводным, где проанализированы литературные данные по процессам перемагничивания в наноточках посредством вихревого состояния, а также обсуждаются основные понятия и параметры модели «жесткого» вихря

(полярность, киральность) и типичные способы их контроля. Далее обсуждаются влияние геометрических размеров (диаметр нанодисков – раздел 4.2.1, толщина нанодисков – раздел 4.2.2 и несовершенство формы - 4.2.3) и магнитной анизотропии (раздел 4.3) на процессы перемагничивания. Магнитная анизотропия наводилась так же, как и в случае с полосками – ступенями вицинальной подложки кремния.

Для контроля киральности наноструктур обычно используется асимметрия формы либо неоднородное магнитное поле. В данной работе предлагается подход, который заключается в создании контролируемой асимметрии магнитостатического взаимодействия (Раздел 4.4). Для этого автором созданы и исследованы наноструктуры, состоящие из нанодисков и расположенных на них нанополосок (структуры D+S) или нанодисков меньшего размера, как описано в разделе 4.4. В структурах D+S управление киральностью вихревого состояния диска осуществлялось изменением ориентации однодоменного состояния в нанополоске, о чем убедительно свидетельствуют данные магнитно-силовой микроскопии и микромагнитного моделирования. Структуры, состоящие из малого диска на большом диске («диск на диске») могут иметь не два, а три устойчивых состояния вследствие того, что малый диск может находиться как в однодоменном состоянии, так и вихревом. Это открывает перспективы использования их в троичной логике. В данном разделе описаны способы формирования подобных асимметричных наноструктур, приведены и объяснены результаты исследований магнитной структуры, а также рассмотрены магниторезистивные свойства массивов наноструктур. Для оценки параметров быстродействия магнитной памяти проведены исследования динамических свойств наноструктур. Далее в разделе 4.5 приведены результаты исследований магнитных свойств массивов наноструктур. Систематически исследованы процессы перемагничивания в массивах наноразмерных дисков, упакованных в различные типы решеток с различными расстояниями между элементами и различным числом элементов массива. Обнаружена немонотонная зависимость поля зарождения вихря от числа наноструктур в массиве, которую невозможно объяснить с учетом только статического взаимодействия между дисками. Используя динамические представления (распространение коллективных спиновых волн в массиве), автору удалось получить аналитические выражения для дисперсионного соотношения коллективной моды спиновых волн, а также поля зарождения вихря в массиве взаимодействующих точек, которые показали хорошее согласие с экспериментальными данными.

Достоверность полученных научных результатов несомненна и обеспечивается комплексным корректным применением современных методов анализа, при котором результаты одного метода подкреплены результатами другого, а также хорошим согласием экспериментальных данных с результатами численного микромагнитного моделирования. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Новизна результатов и их научная значимость подтверждена публикациями диссертанта. По теме исследований опубликовано 35 работ, из них 34 статьи в журналах,

входящих в перечень рецензируемых научных журналов ВАК РФ, а также 3 патента на изобретение и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Общие замечания по диссертационной работе

1. В главе, посвященной многослойным пленкам (гл. 2.1), показана связь между структурой границы раздела (магнитные/немагнитные компоненты) и магнитными свойствами всей системы, однако структура границы раздела прямыми экспериментальными методами (например, микроскопия поперечного среза) не исследована.

2. Самоорганизованные нанополоски Co, а также полоски, вырезанные из эпитаксиальной пленки Co, были приготовлены на вицинальной поверхности кремния. Насколько понятно из работы, все эксперименты с нанополосками проведены на образцах только с одним углом разориентации – 4°, т.е. ни высота, ни плотность ступеней не варьировалась. Кроме того автор называет «ступенями» то, что принято называть «сгустками ступеней (или эшелонами ступеней)» (step bunch), так как термин «ступень» обычно относится к ступеням моноатомной высоты (0,3 нм для кремния). В данной же работе высота ступеней достигала 10 нм.

3. Магнитная структура нанополосок, вырезанных из эпитаксиальной пленки Co (Раздел 3.3), была детально исследована методом МСМ, тогда как для самоорганизованных нанополосок Co (Раздел 3.1) такие исследования проведены не были. Таким образом, вывод автора о процессах перемагничивания самоорганизованных нанополосок через зарождение и смещение доменных стенок не достаточно подкреплен экспериментально.

4. Во введении, в «теоретической и практической значимости» указано, что массивы магнитных нанополосок могут стать основой магниторезистивной памяти с подвижными доменами, однако ни в тексте диссертации, ни в автореферате упоминаний о таких устройствах не обнаружено. Принцип действия такой памяти и анализ характеристик изученных массивов, которые делают их пригодными для работы в этих устройствах, были бы уместны.

5. Небольшие замечания по оформлению работы:

- некоторые рисунки в диссертации очень маленького размера, что затрудняет их анализ, особенно это касается СТМ изображений;
- в качестве сокращенного названия метода дифракции быстрых электронов иногда используется русскоязычная аббревиатура – ДБЭ, иногда англоязычная RHEED. Это же касается СТМ (STM).
- некоторые специфические термины (например, RKKY-модель, sd-смешанная модель, FORC и т.п.) вводятся без пояснения или хотя бы расшифровки.

Отмеченные выше недостатки, которые носят дискуссионный характер, не являются принципиальными и не снижают ценность полученных главных результатов и диссертационной работы в целом.

Заключение

Диссертация по актуальности, новизне, масштабу проведенных исследований и по совокупности полученных результатов полностью соответствует профилю диссертационного совета, паспорту заявленной специальности и требованиям, предъявляемым ВАК Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней" в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями от 21.04.2016 г. № 335), а её автор, Огнев Алексей Вячеславович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Грузнев Димитрий Вячеславович

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Отдела физики поверхности,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5.
Тел. +7 (423)231 04 39
Факс +7 (423)231 04 52
E-mail: gruznev@iacp.dvo.ru

«20» февраля 2017 г. ____ ____ Грузнев Д.В.

Подпись в.н.с. д.ф.-м.н., Грузнева Д.В. заверяю
Ученый секретарь ИАПУ ДВО РАН
К.т.н. Змеу С.Б.