

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.

Диссертационная работа Огнева А. В. посвящена исследованию магнитных свойств различных наноструктур- многослойных пленок с косвенным обменным взаимодействием между слоями, наполосок, нанодисков, причем основное внимание уделяется исследованию взаимосвязи магнитной анизотропии и микромагнитной структуры. Тема работы актуальна по целому ряду причин, имеющих как научное, так и прикладное значение. Традиционная магнитная запись практически достигла предела своих возможностей как по плотности записи, так и по быстродействию и энергопотреблению. Необходимо искать совершенно новые принципы и материалы для сверхплотной и сверхбыстрой магнитной записи и обработки информации. Поэтому столь пристальное внимание во всех ведущих научных центрах мира посвящено изучению магнитных наноструктур – тонких пленок, изолированных наночастиц, массивов наночастиц. В последние несколько лет появились и новые перспективные объекты исследования – вихри и антивихри, скирмионы. Очевидно, что разнообразие возможных спиновых конфигураций в наноструктурах определяется магнитной анизотропией, играющей ключевую роль в образовании микромагнитной структуры. Диссертация посвящена детальному исследованию именно этих магнитных наноструктур и фокусируется на изучении взаимосвязи магнитной анизотропии и микромагнитной структуры. Из вышесказанного следует, что тема диссертации Огнева А.В. актуальна, а появление работ, на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 276 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 276 страниц, в том числе 81 рисунок и 5 таблиц.

Первая глава носит методический характер, в которой описаны методы и подходы, используемые в диссертации. В ней описаны методы получения образцов, методики исследования их структурных, магнитных свойств, магнитосопротивления. Часть оригинальных методик и установок, программного обеспечения создана автором. Вторая глава целиком посвящена многослойным пленкам – в ней исследуется каким-образом магнитная анизотропия влияет на микромагнитную структуру при наличии косвенной обменной связи между слоями, напряжений и диффузии атомов. В третьей главе представлены результаты исследования магнитных свойств нанопроволок. В четвертой

главе рассматриваются объекты в виде диска и изучаются наноструктуры диск на диске и полоска на диске.

Все поставленные задачи и лично изготовленные автором наноструктуры являются новыми, а полученные результаты оригинальны и вносят существенный вклад в понимание влияния магнитной анизотропии на микромагнитную структуру магнитных материалов с пониженной размерностью. Новизна работы определяется решением новых задач, и комплексным экспериментальным и теоретическим исследованием структурных и магнитных свойств наноструктур.

Прежде всего, следует отметить поразительно огромный объем выполненных исследований и полученного экспериментального материала. Второй отличительной особенностью работы является сочетание технологических, экспериментальных и теоретических работ, причем всех на самом современном уровне. Можно констатировать, что по качеству получаемых наноструктур и их всесторонней характеристике работа Огнева А. В. опережает практически все коллективы России. В-третьих, автор сопровождает все исследования микромагнитными вычислениями, а в главе 3 и FORC анализом, что не только украшает работу, но делает ее выводы и достоверными, и значимыми для широкого круга объектов. В-четвертых, на каждом этапе автор не ограничивается фундаментальными исследованиями, но ищет и находит пути практического использования своих результатов, что и привело к получению им 3 патентов на изобретения.

В отзыве невозможно перечислить все многочисленные новые результаты, полученные в диссертации, поэтому приведу только несколько из них, имеющих, по моему мнению, наибольший интерес и значение:

1. Методом термического осаждения на естественно окисленные монокристаллы Si (111) получены многослойные пленки $[\text{Fe}/\text{Pd}]_{10}$ и $[\text{Fe}/\text{Ge}]_{10}$, и разнообразными методами детально исследованы их магнитные свойства и микромагнитная структура. Толщина слоев железа во всех пленках была 1 нм, а толщина слоев палладия и германия варьировалась. Продемонстрировано и объяснено влияние различных факторов, состав, толщина прослоек, напряжения и взаимная диффузия атомов на интерфейсах.

2. Выполнены детальные исследования магнитных, а самое главное микромагнитных, свойств многослойных поликристаллических пленок $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$ с косвенной обменной связью. Предложена модель трехслойной структуры с учетом различных видов анизотропии, билинейного и биквадратичного обмена, обобщена модель случайной анизотропии, рассчитан спектр ФМР. Показано, что осцилляции косвенной обменной связи приводят к осцилляциям коэрцитивной силы, средней анизотропии магнитного блока и радиуса ферромагнитных корреляций. В пленках с антиферромагнитным обменом формируется двухосная магнитная анизотропия и весьма

сложная и нерегулярная доменная структура с доменными границами типа Нееля и «голова к голове», содержащими вихри и антивихри, которые смещаются и аннигилируют при повышении магнитного поля.

3. В главе 3 исследовались эпитаксиальные нанополоски Co на вицинальных поверхностях Si(111) и нанопроволоки Ni. электролитическим методом в матрице пористого оксида алюминия. Изменяя геометрические параметры нанополосок, ориентацию поля, и используя метод FORC, изучены процессы перемагничивания и влияние на них магнитостатического взаимодействия между полосками. Впервые обнаружено, что в процессе переключения намагниченности происходит образование вихрей и их смещение, сопровождающееся изменением полярности границ Нееля.

4. Исследовано перемагничивание нанодисков, массивов нанодисков и систем диск на диске. Выявлен характер перемагничивания в зависимости от различных параметров и области зарождения и аннигиляции вихревого состояния.

5. Предложен способ контроля вихревого состояния с помощью асимметричного магнитостатического взаимодействия в системе «диск на диске» ли «полоска на диске». В частности, показана возможность управления киральностью вихревого состояния и достижения в системе «малый диск на большом» трех устойчивых состояний, что возможно использовать в устройствах магнитной логики.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждается использованием современных методик, большим представленным в работе фактическим материалом, тщательным анализом полученных данных и их сопоставлением с результатами независимых исследований.

По сути сделанных в работе выводов замечаний у рецензента нет. Однако, работа не свободна от недостатков:

1. В диссертации отсутствует обзор. Хотя это стало и достаточно традиционно в последнее время, но хотелось бы в работе видеть изложение результатов работ В. Новосада, на которых ссылается автор, анализ различных микромагнитных подходов и пакетов программ, краткое изложение метода FORC, сравнение результатов для многослойных пленок с предшествующими. Заслуживали бы упоминания и работы по магнитным нанопроволокам, ведущимися на факультете материаловедения в МГУ.
2. Точность измерений констатируется, но не объясняется, а в некоторых случаях и не указывается. Так, не указана точность определения толщины слоев, толщина определялась в большинстве случаев по времени напыления и с помощью КИТ, или точность определения магнитооптического сигнала. Утверждается, что неоднородность поля в зазоре электромагнита «достаточна», погрешность измерения сопротивления 0.03% (стр.40), что требует пояснений.

3. Микромагнитное моделирование – мощный и удобный способ достижения понимания распределения намагниченности. Но этот метод является феноменологическим, применимость его для наноструктур не всегда очевидна, так как ячейка для усреднения магнитных моментов должна быть также наномасштаба. Потом, так и остается проблемой нахождение поверхностной магнитной анизотропии. Эти моменты следовало бы обсудить в работе.
4. Хотя работа хорошо написана и оформлена, имеются и погрешности в оформлении. Иногда, подписи на рисунках и на русском, и на английском, например, это касается единиц для магнитного поля (стр.35). В тексте диссертации работы автора никак не выделены, поэтому читателю каждый раз приходится обращаться к списку литературы. Список сокращений и обозначений приведен в конце диссертации, что также неудобно при чтении.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не затрагивают основного содержания диссертационной работы.

Полученные в работе результаты имеют большое научное значение для физики конденсированного состояния и физики магнитных явлений, а также практическое значение для различных областей применения магнитных свойств, от магнитной записи, магнитных логических устройств, до магнитных сенсоров, в том числе для биомедицинских применений. Автор в работе много внимания уделяет конкретным возможным практическим применениям полученных результатов. Поэтому результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в организациях занимающихся как разработкой новых магнитных наноматериалов, так и ведущих исследования в области магнитной памяти, магнитных сенсоров, тонкопленочных элементов и др., как например, МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Санкт-Петербургский, Уральский, Новосибирский и Тверской университеты, Воронежский технический университет, МИРЭА, Российский научный центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт физики твердого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ РАН РФ им. Иоффе (г. С-Петербург), РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл.), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г.Красноярск), Институт Теоретической и Прикладной Электродинамики РАН (Москва) и др.

Результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Автореферат и публикации автора в престижных научных изданиях точно и полностью отражают полученные в диссертационной работе результаты.

Резюмируя сказанное можно констатировать, что диссертация Огнева А.В. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом

плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание микромагнитной структуры нанобъектов. Диссертационная работа Огнева А.В. является завершенным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как новое крупное достижение в области физики магнитных явлений.

В целом диссертационная работа «Анизотропия и микромагнитная структура низкоразмерных ферромагнетиков» 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

Грановский Александр Борисович
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры магнетизма,
Физический Факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Адрес: 119991, Москва, Ленинские Горы, дом 1, стр.2

Тел. 8 495 939 47 87

Факс 8 495 939 47 87

E-mail: granov@magn.ru

« 31 » января 2017 г.

Грановский А.Б.

Подпись профессора кафедры магнетизма физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова д.ф.-м.н., проф. Грановского А.Б. заверяю

Декан
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
профессор



Сысоев Н.Н.