

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Свалова Андрея Владимировича «Влияние размерного и структурного факторов на магнетизм многослойных пленок на основе  $3d$ - и  $4f$ -металлов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа Свалова А.В. посвящена экспериментальному исследованию влиянию многочисленных факторов, и в первую очередь структурных особенностей и толщин слоев, на магнитные свойства многослойных пленок на основе  $3d$ - и  $4f$ -металлов. Тема работы актуальна по целому ряду причин, имеющих как научное, так и прикладное значение. Тонкие магнитные пленки являются основой современной микроэлектроники, спинтроники, оптоэлектроники, сверхплотной магнитной записи, магнитных сенсоров и др. Управление магнитными свойствами пленок является ключевым фактором развития технологии, причем, очевидно, что искусственно создаваемые многослойные структуры обладают практически неисчерпаемыми перспективами в силу возможности комбинирования различными магнитными материалами и их структурным состоянием (кристаллическое, аморфное, нанокристаллическое), варьирования толщинами слоев и прослоек. Лишь обнаружение только одного из свойств многослойных систем – гигантского магнитосопротивления привело к возникновению новых направлений в физике магнитных явлений и важным практическим применениям. Однако, многие вопросы физики многослойных систем остаются неясными, именно в силу того что многие факторы влияют на магнитные свойства. Поэтому необходим комплексный подход с использованием самых современных прецизионных методик и оригинальных способов вычленения различных механизмов. Из вышесказанного следует, что тема диссертации Свалова А.В. актуальна, а появление работ, на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 299 страниц, в том числе 172 рисунка и 11 таблиц.

В первой главе приведены результаты исследования многослойных пленок на основе  $3d$  металлов, а именно, на основе FeNi и Co/Si. Вторая глава посвящена

изучению обменного смещения в двухслойных и трехслойных пленках, содержащих FeNi. В третьей главе анализируются влияние толщины и структуры слоёв редкоземельных металлов в многослойных плёнках Gd и Tb с различными типами немагнитных прослоек на их магнитные свойства. Четвертая глава содержит изложение результатов по магнитным свойствам и индуцированным фазовым переходам в пленках типа GdCo/Co. Наконец, в пятой главе даны примеры практического использования некоторых из полученных результатов.

Прежде всего, следует подчеркнуть, что во многом новизну и значимость работы определяет то, что все исследуемые образцы получены лично Сваловым А.В., причем на им модернизированных и адаптированных применительно к поставленной задаче установках УРМЗ -013; УРМЗ -014; LEYBOLD HERAEUS Z550; АТС ORION 8 UHV; Classic 500 Pfeiffer Vacuum. Именно это и позволило автору целенаправленно выбирать материалы слоев и прослоек, параметры напыления, варьировать в широких пределах толщины слоев, и главное – получать высококачественные, прекрасно аттестованные образцы. Второй важной отличительной особенностью является использование разнообразных методик аттестации состава, структуры, качества поверхностей (рентгеновский микроанализ, рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеновский фотоэлектронный и Оже-спектральный анализ, методы электронной и атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифракции), использование разнообразных магнитометрических и магнитотранспортных методик, и самых современных методов, таких как, например, малоугловое рассеяние рентгеновских лучей при скользящем падении (GISAXS), рефлектометрии поляризованных нейтронов, Керровской микроскопии с разрешением по глубине. Часть измерений проведена в широком интервале полей (до 90 кЭ) и температур (до 4 К). Третьим достоинством работы является детальный анализ всех без исключения экспериментальных данных, с обсуждением разных моделей и концепций, с привлечением математической обработки. Все это и обуславливает новизну диссертационной работы Свалова А.В.

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. В диссертации успешно развита и продемонстрирована концепция наноструктурирования как способа изучения различных факторов, влияющих на

магнитные свойства, и как эффективная методика достижения высоких параметров. В частности, эта концепция была применена к пленкам пермаллоя и гадолиния. Например, в первой главе показано, что наноструктурирование толстых плёнок пермаллоя прослойками Ti и Gd-Co позволяет подавить "закритическое состояние", обеспечить высокую магнитную мягкость плёночных структур, что в свою очередь и позволило создать высокочувствительные прототипы магнитных сенсоров (пятая глава).

2. Показано, что Ti может быть успешно применен в качестве подложки, буферного слоя или прослоек в многослойных пленках, причем кристаллическая структура Ti сильно изменяется при варьировании его толщины.

3. Неожиданные результаты получены относительно природы обменного смещения в трехслойных пленках FeNi/FeMn/FeNi. Показано, что однонаправленная магнитная анизотропия, возникающая на границе раздела слоев, зависит и от спиновой конфигурации в объёме антиферромагнитного слоя.

4. Структурная неоднородность в тонких слоях гадолиния и сильная зависимость температуры Кюри от толщины слоев гадолиния, приводят к размытию фазового перехода второго рода в многослойных пленках Gd/Ti, и, как следствие, к расширению температурного диапазона значительного магнитокалорического эффекта. То есть наноструктурирование может быть использовано для совершенствования магнитокалорических материалов.

5. Доказано, что поведение сопротивления в магнитном поле содержащих редкоземельные элементы многослойных пленок не связано с гигантским магнитосопротивлением, а определяется изотропным магнитосопротивлением, типичным для ферромагнитных металлов, и анизотропным магнитосопротивлением, обусловленным влиянием спин-орбитального взаимодействия на рассеяние носителей тока.

6. В рамках модели коллинеарного ферримагнетизма дано последовательное объяснение магнитных свойств и индуцированных магнитных фазовых переходов в многослойных плёнках [Gd-Co/Co]<sub>n</sub>.

7. На основе детального анализа структурных свойств, поведения намагниченности, магнитосопротивления в многослойных пленках, содержащих как слои 3d, так и 4f металлов предложена и реализована на примере системы Gd-Co/Co/Cu/Co концепция термочувствительного спинового клапана.

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 первой главе выполнено детальное исследование магнитных пленок пермаллоя, и автор нашел условия достижения высоких параметров. Однако не приводятся данные по удельному сопротивлению, которые лучше характеризуют образцы, чем анизотропное магнитосопротивление (АМС), не обсуждается механизм поля старта для страйп-структуры и причины, ограничивающие значения коэрцитивной силы и АМС.
2. При обсуждении низкотемпературных минимумов и максимума на Рис. 3.20 обнаруженных в многослойных пленках  $[Tb/Ti]_n$ , автор приходит к выводу, что минимумы не связаны с эффектом Кондо, а максимум не находит объяснения. Однако наряду с эффектом Кондо существуют и другие механизмы минимума (слабая локализация, электрон-электронные корреляции, двухуровневые системы и др), которые не упоминаются. Появление же максимума, в окрестности температуры блокировки, по-видимому, связано с увеличением беспорядка в магнитной системе при начальном увеличении температуры, так как этот максимум наблюдается только для систем суперпарамагнитных частиц.
3. При анализе магнитных свойств многослойных структур, в частности  $Co/Si$ , возможность межслойного обмена через диэлектрическую или полупроводниковую прослойку, не принимается во внимание. Хотя, строго говоря, вопрос о таком обмене, который может быть как ферромагнитного, так и антиферромагнитного типа через примеси в прослойке, выходит за рамки данной диссертации, упомянуть его при наличии тонких слоев  $Si$  было бы целесообразно.
4. Хотя работа хорошо написана и оформлена, имеются и погрешности в оформлении. В тексте диссертации работы автора никак не выделены, поэтому читателю каждый раз приходится обращаться к списку

литературы. На мой взгляд, список литературы к каждой главе, а не сквозной, является неудобным. Некоторые термины, как например, “термическое намагничивание”, “острота кристаллической структуры“, “магнитная дезактивация” нельзя признать удачными. Не указано какой именно эффект Керра использовался и при какой длине волны и угле падения. Встречаются и опечатки (стр. 12, 29, 116, 130, повторение предложения на стр. 188 и др.), хотя их число и обычно для диссертаций.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и ни в коей мере не затрагивают основного содержания диссертационной работы.

Полученные в работе результаты имеют большое научное значение для физики магнитных явлений, а также практическое значение для различных областей применения магнитных свойств от магнитной записи до магнитных сенсоров. Автор в пятой главе показал конкретные возможные применения и создал прототипы магнитных сенсоров. Поэтому результаты работы можно рекомендовать для ознакомления и использования в организациях занимающихся как разработкой новых тонкопленочных магнитных материалов, 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 Свалова А.В. посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и практическом плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание влияния структурных особенностей и размерного фактора на магнитные свойства многослойных пленок. Диссертационная работа Свалова А.В. является законченным

научным исследованием, которое может быть квалифицировано как новое крупное достижение в области физики магнитных явлений.

В целом диссертационная работа «Влияние размерного и структурного факторов на магнетизм многослойных пленок на основе 3d и 4f металлов» 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, Свалов А.В., 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](mailto:granov@magn.ru)

« 17 » апреля 2017 г.

Грановский Александр Борисович

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.