

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию 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».**

Тонкие магнитные пленки и мультислойные системы на их основе относятся к классическим объектам, вызывающим постоянный интерес исследователей ввиду применимости многих их уникальных свойств в устройствах микро- и нанoeлектроники. Разработка, изучение и практическое применение новых тонкопленочных систем на основе 3d- и 4f-металлов, проявляющих необычные физические свойства, является одной из актуальных задач современного материаловедения и физики магнитных явлений. Особую актуальность представленным в диссертации результатам придает систематичность и масштабность проведенных исследований, которые развивают представления об особенностях и механизмах влияния размерного и структурного факторов на формирование свойств магнитных тонкопленочных систем.

Целью работы А.В. Свалова являлось установление, интерпретация и феноменологическое описание общих закономерностей влияния размерного и структурного факторов на магнетизм пленок и многослойных структур на основе 3d- и 4f-металлов.

Для достижения поставленной цели автором работы был решен целый комплекс важных и значимых для развития физики магнитных явлений научных и высокотехнологических задач, связанных как с получением, так и прецизионным исследованием тонких многослойных магнитных пленок различного состава.

Цель и уровень задач, решаемых в диссертационной работе, несомненно, соответствуют уровню докторской диссертации.

Представленные в диссертации полномасштабные экспериментальные исследования включают как технологии получения тонкопленочных объектов, так и комплексное изучение их свойств с привлечением широкого спектра современного оборудования. Так, в частности, для контроля состава образцов использовались рентгеноспектральный микроанализ, рентгенофлуоресцентный и Оже-спектральный анализы. Для изучения структурного состояния плёнок были использованы методы электронной и атомно-силовой микроскопии, а также рентгеновской дифракции. Изучение магнитных свойств проводилось с помощью высокочувствительных вибрационного и СКВИД-магнетометров, анизометра, рефлектометрии поляризованных нейтронов, магнитооптической магнитометрии и магнитной силовой микроскопии и Керр-микроскопии. Для анализа экспериментальных данных применялись методы численного моделирования. Использование современного научно-исследовательского оборудования, апробированных методик экспериментальных исследований свидетельствуют о высокой степени достоверности полученных результатов. Несомненным достоинством работы является и то, что автор для каждого эксперимента дает физическое объяснение, предлагает конкретные модели и доведенные до количественного результата расчеты. Именно такой подход определил значимость и новизну работы.

В работе представлены многочисленные новые и полезные результаты. Остановимся на некоторых из них, имеющих, по моему мнению, наибольшее значение.

Впервые выявлено и объяснено влияние толщины буферного слоя Ti на структуру и магнитные свойства плёнок пермаллоя. Показано, что такое влияние заключается в текстурировании пермаллоя кристаллической структурой титана. При этом установлено, что собственная кристаллическая структура пленок титана определяется их толщиной. Очень значимым

результатом, полученным автором работы, является выявление того факта, что слоистое наноструктурирование является эффективным фактором влияния на перпендикулярную магнитную анизотропию плёнок пермаллоя.

Установлено, что магнитные свойства плёнок кобальта могут быть управляемо модифицированы за счёт их наноструктурирования внутренними немагнитными прослойками кремния. Важную роль при этом играют прослойки Co-Si, характеризующиеся гранулированной структурой и суперпарамагнитным поведением гранул Co.

Показано, что функциональные свойства плёночных сред с однонаправленной анизотропией на основе пермаллоя и антиферромагнетика FeMn изменяются при специальной процедуре охлаждения от температур, превышающих температуру блокировки, или за счёт низкотемпературного отжига при температурах до 200°C. Определены механизмы, ответственные за такое изменение.

Определены основные закономерности изменения магнитных свойств аморфных ферромагнитных плёнок Gd-Co при наноструктурировании. На примере многослойной системы  $[\text{Gd}_{22}\text{Co}_{78}/\text{Ti}]_n$  показано, что уменьшение толщины магнитных слоёв в диапазоне  $10 \pm 1$  нм приводит к изменению температурной зависимости спонтанной намагниченности, уменьшает температуру магнитного упорядочения, изменяет спонтанную намагниченность основного состояния.

Установлены, что многослойные плёнки типа  $[\text{Gd-Co/Co}]_n$  могут быть квалифицированы как искусственные слоистые ферромагнетики, в которых под действием магнитного поля наблюдается индуцированный пороговый переход в состояние с неколлинеарной магнитной структурой. На величину критического поля перехода и закономерности протекания ранней стадии деформации магнитной структуры существенное влияние оказывают внешние слои Co, характеризующиеся ослабленной обменной связью с внутренними магнитными слоями. Предложена модель температурной зависимости критического поля вблизи состояния магнитной компенсации,

основанная на представлениях о слабоанизотропном объёмном ферромагнетике с учетом коррекции величины межслойного обменного взаимодействия, отражающей особую роль внешних слоёв Co.

Вместе с тем, к работе можно предъявить следующие **замечания**:

1. Среди возможных причин возникновения перпендикулярной магнитной анизотропии в плёнках пермаллоя в работе рассматриваются магнитоупругая анизотропия, магнитокристаллическая анизотропия и анизотропия формы элементов столбчатой микроструктуры плёнок. К сожалению, в работе отсутствуют температурные исследования перпендикулярной анизотропии плёнок FeNi, а они могли бы дать дополнительные веские основания для заключения о природе данной анизотропии.

2. При поиске оптимальной толщины прослойки, при которой наблюдался минимум коэрцитивной силы, исследовались трехслойные структуры типа FeNi/Ti/FeNi. Затем найденная толщина прослойки использовалась и в многослойных импедансных системах  $[\text{FeNi/Ti}]_n$ . В диссертации отсутствует обоснование корректности экстраполяции найденной для трехслойных структур оптимальной толщины прослойки на случай многослойных плёнок  $[\text{FeNi/Ti}]_n$  с большим числом магнитных слоев.

3. В первой главе диссертации автор приводит результаты подробных исследований о влиянии условий приготовления (давление рабочего газа, скорость напыления, наличие и материал буферного слоя) на структуру и магнитные свойства плёнок FeNi, на основании которых выбираются оптимальные условия получения, которые затем используются при приготовлении исследованных в дальнейшем многослойных плёнок пермаллоя. При этом в диссертации отсутствуют сведения о том, проводился ли подобный поиск оптимальных условий напыления для плёнок других типов: Co, Gd, Tb, Gd-Co.

Однако вышперечисленные замечания не снижают общей очень положительной оценки диссертации и ее высокого научного уровня.

Результаты проведённых исследований могут быть использованы организациями, в которых проводятся исследования в области получения и применения магнитных наноструктур: МГУ им. М.В.Ломоносова (г. Москва), Российский научный центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г.Красноярск), Институт физики твёрдого тела РАН РФ (п. Черноголовка Московская обл.), ФТИ РАН РФ им. Иоффе (г. С-Петербург), Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (Москва), РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл.), Сибирский и Дальневосточный федеральный университеты, Тверской университет, Воронежский технический университет и др.

По результатам диссертационной работы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях А.В. Сваловым опубликованы 58 статей, получены 2 патента на изобретения. Материалы диссертации были представлены на более чем 50 Международных и Всероссийских научных конференциях и симпозиумах, что свидетельствует о высокой степени апробации результатов исследований.

Содержание автореферата в полной мере отражает результаты исследований и выводы, представленные в диссертации.

Результаты исследований, проведенных А.В. Сваловым, могут быть квалифицированы как решение крупной задачи в области физики магнитных явлений – выявление влияния размерного и структурного факторов на магнитные свойства многослойных магнитных пленок нанометровой толщины.

Считаю, что диссертационная работа «Влияние размерного и структурного факторов на магнетизм многослойных пленок на основе 3d- и 4f-металлов» соответствует паспорту заявленной специальности и полностью отвечает всем требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждено постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.

с изменениями от 21 апреля 2016 г. №335), а ее автор, Свалов Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Гаврилюк Алексей Александрович

доктор физико-математических наук, доцент,

профессор кафедры общей и экспериментальной физики,

Физический Факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет».

Адрес: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, дом 1

раб. тел: 8(3952)521253

сот. тел: 89

E-mail: zubr@api.isu.ru

« 12 » мая 2017 г. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Гаврилюк Алексей Александрович

