

## 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 учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений*

**Актуальность темы.** В последние годы, в связи с интенсивным развитием спинтроники, микроэлектроники, информатики, а также других научных направлений на стыке различных областей науки особое внимание уделяется искусственно созданным магнитным материалам в виде тонкопленочных многослойных структур. В связи с этим, создание многослойных магнитных тонкопленочных наноструктур, управляемых магнитным и электрическим полями, а также изучение влияния размерного и структурного факторов на магнитные свойства таких наноструктур на основе 3d- и 4f-металлов является одной из актуальных задач физики магнитных явлений и конденсированного состояния. Именно этим исследованиям и посвящена диссертационная работа Свалова А.В.

На момент начала исследований методы получения магнитомягких тонкопленочных наноструктур с заданными магнитными свойствами были ограничены: не были понятными многие особенности влияния размерного и структурного факторов на магнитные свойства этих искусственных магнитных материалов, а также наличия слабомагнитных и немагнитных прослоек, структурной неоднородности слоев, не были известны параметры, необходимые для оптимизации функциональных свойств магнитных наноструктур с гигантскими магнитотранспортными эффектами, не были изучены многие особенности перемагничивания многослойных тонкопленочных структур. Совокупность этих проблем определило направление исследований автора диссертации, состоящее в установлении, интерпретации и феноменологическом описании общих закономерностей влияния размерного и структурного факторов на магнетизм пленок и многослойных структур на основе 3d- и 4f-металлов.

Для решения этих проблем в начале автором были изучены магнитные свойства тонкопленочных систем FeNi и FeNi/Ti, FeNi/FeMn, а также Co/Si. В этих системах его интересовало, каким образом магнитные свойства пленок и тонкопленочных структур зависят от скорости осаждения слоев, материала буферного слоя, состава межслойных интерфейсов, атмосферы (вид газа, давление) и температуры отжига. Решение этих проблем определило не только направление исследований в диссертации, но и стимулировало отработку технологии получения высококачественных пленок и тонкопленочных структур.

Другими объектами исследования влияния размерного и структурного факторов на магнетизм многослойных структур были такие структуры как TbCo/FeNi, Tb/Ti, Tb/Si, GdTb/Ti, Gd/Ti и GdCo/Co. В этом большом ряде многослойных структур автор решал проблемы термического воздействия, влияния прослоек из Ti и Si, а также магнитной анизотропии и толщины слоев на структуру, магниторезистивные, магнитные и на магнитокалорические свойства многослойных пленок Gd/Ti и на магнитные фазовые переходы для GdCo/Co.

Важным актуальным практическим направлением диссертации в процессе решения проблемы особенностей перемагничивания многослойных тонкопленочных структур является создание высокочувствительных датчиков магнитного поля на основе многослойных структур FeNi/x (x=Ti, Gd, Gd-Co), в том числе на гибких подложках, а также создание спиновых клапанов на основе систем FeNi/FeMn и Gd-Co.

Из выше сказанного следует, что выбранное Сваловым А.В. направление диссертационного исследования, посвященное изучению влияния размерного и структурного факторов на магнитные свойства тонкопленочных структур на основе 3d- и 4f-металлов, является **актуальным**.

Все исследования, представленные в диссертации, проводились в рамках государственных программ и при поддержке грантов РФ, что также свидетельствует об актуальности темы диссертации.

**Структура и основное содержание работы.** Диссертация написана в соответствии с ГОСТ 7.0.11-2011. Содержание диссертации соответствует формуле Паспорта специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 299 страницах, включая 172 рисунка, 11 таблиц и список литературы из 431 наименования.

**Во введении** приведен краткий обзор литературы, связанный с объектами исследования, дано обоснование выбора метода получения пленочных систем, отмечены нерешенные проблемы на момент начала работы над диссертацией, связанные с процессами перемангничивания многослойных тонкопленочных структур, с влиянием на магнитные свойства пленочных систем размерного и структурного факторов, типа прослоек и неоднородности слоев. Дано обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена описанию метода получения и аттестации пленок FeNi, Ni<sub>0.75</sub>Fe<sub>16</sub>Cu<sub>5</sub>Mo<sub>4</sub>, многослойных тонкопленочных структур FeNi/Ti, Co/Si, изучению влияния на магнитные свойства пленочных структур технологических параметров (скорость осаждения, давление в камере, давление аргона, температура подложки и отжига, время отжига), толщины слоев и наличия буферных слоев. На примере многослойных пленок FeNi/Gd-Co предложен новый способ формирования положительной ферромагнитной связи между магнитными слоями путем замены немагнитных прослоек на слабомагнитные. Важным результатом проведенных исследований является обнаружение изменения кристаллической структуры буферного слоя Ti (образование ГЦК структуры) в системе Ti/Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> в зависимости от толщины Ti, которое оказывает существенное влияние на гистерезисные свойства системы.

**Во второй главе** изучается характер изменения внутреннего обменного смещения в пленках FeNi/FeMn, FeNi/FeMn/FeNi и TbCo/FeNi от температуры отжига и магнитной структуры промежуточного слоя. Важным итогом исследований, на мой взгляд, является обнаружение фазового расслоения в структуре FeNi/FeMn за счет диффузии ионов Mn, которое возникает в процессе отжига пленочной структуры, а также существенное влияние этого расслоения на величину обменного смещения.

**В третьей главе** представлены оригинальные результаты изучения влияния наличия прослоек различного типа из Ti или Si различной толщиной на магнитные, магниторезистивные и магнитокалорические свойства многослойных пленок Gd и Tb. Автором экспериментально было установлено, что при толщине РЗМ слоев менее 10 нм в многослойных пленках происходит уменьшение температуры Кюри и появляются признаки присутствия суперпарамагнитной фазы и фазы типа «спиновое стекло». Важным практическим результатом этих исследований является разработка способа целенаправленного изменения магнитокалорических свойств многослойных пленок Gd/Ti, вызванного появлением структурных неоднородностей в процессе наноструктурирования пленок.

**Четвёртая глава** посвящена изучению особенностей магнитных свойств композиционно-неоднородных многослойных пленок, содержащих как 3d-, так и РЗ-металлы, таких как GdCo/Co, GdCo/Ti и Gd-Co/X/Co (X=Si, Ti, Cu). В начале этой главы был проведен детальный литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований особенностей магнитных свойств многослойных пленок 4f/3d-металл, были определены проблемы, решение которых осуществил автор. Им было доказано, что изменение толщины магнитных слоев, создание внешних слоев Co и введение немагнитных прослоек в многослойных пленках позволяет целенаправленно управлять обменной связью между магнитными слоями вплоть до создания искусственной коллинеарной магнитной структуры. Важным итогом исследований в этой главе является определение физических и

технологических параметров необходимых для создания многослойных пленок Gd-Co/Co, в которых происходят магнитные фазовые переходы, индуцированные внешним магнитным полем.

В пятой главе рассмотрены прикладные аспекты результатов изучения влияния размерного и структурного факторов на магнитные свойства многослойных структур FeNi/X (X=Ti, Gd, Gd-Co), FeNi/FeMn и Gd-Co. Автором определены оптимальные условия необходимые для создания высокочувствительных датчиков магнитного поля как для технического применения, так и для биодетектирования, а также для создания термочувствительного спинового клапана.

В заключении сформулированы научные результаты, полученные в диссертации. Список литературы содержит достаточно полную библиографию по вопросам, рассмотренным в работе, а автореферат полностью отражает содержание диссертации.

**Научная новизна результатов диссертационной работы.** Все, решаемые в диссертации задачи являются **новыми**. Они вносят существенный вклад в понимание – проблемы изменения магнитных свойств многослойных пленок пермаллоя в результате их текстурирования за счет изменения толщины и кристаллической структуры буферного слоя; – проблем формирования наведенной магнитной анизотропии и стабилизации гистерезисных свойств в слоистых наноструктурированных пленочных магнитных материалах; – вопросов изменения магнитных и магнитотранспортных свойств многослойных пленок при создании немагнитного межслойного интерфейса; – вопросов создания искусственной коллинеарной тонкопленочной магнитной структуры, магнитными фазовыми переходами которой можно управлять магнитным полем; – вопросов разработки физических принципов действия устройств на основе тонкопленочных магнитных наноструктур в виде термочувствительного спинового клапана и высокочувствительных датчиков магнитного поля.

Наиболее важными результатами являются следующие.

1. Определены физические факторы, влияющие на магнитные свойства большого ряда тонкопленочных наноструктур на основе 3d- и 4f-металлов, и определены технологические параметры необходимые для стабилизации магнитных свойств таких структур.
2. Обнаружено, что изменение кристаллической структуры буферного слоя Ti в системе Ti/Fe<sub>20</sub>Ni<sub>80</sub> оказывает существенное влияние на магнитную анизотропию и гистерезисные свойства тонкопленочных структур.
3. Установлено, что магнетизм многослойных наноструктур Co/Si может быть контролируемо модифицирован за счёт наноструктурирования многослойных пленок с немагнитными прослойками.
4. Определены закономерности изменения структуры пленок Gd/X и Tb/X (X=Si, Ti) при изменении толщины слоев 4f-металла, периода мультислоев, типа и толщины немагнитного межслойного интерфейса.
4. Выявлены физические параметры необходимые для создания искусственной коллинеарной тонкопленочной магнитной структуры на основе пленок Gd-Co/Co, в которой имеет место магнитный фазовый переход, индуцированный внешним магнитным полем.
5. Установлены связи между параметрами наноструктурирования и магнитными свойствами 4f-металлов в многослойных пленках Gd/Ti, Tb/Ti и Tb/Si, позволяющие управлять магнитокалорическим эффектом.
6. Определены физические параметры и технологические условия необходимые для создания высокочувствительных датчиков магнитного поля как для технического применения, так и для биодетектирования, а также для создания термочувствительного спинового клапана на основе тонкопленочных магнитных наноструктур.

**Степень достоверности результатов и обоснованность выводов** диссертации обеспечивается использованием как оригинальных, так и хорошо апробированных экспериментальных методик, теоретических моделей и воспроизводимостью результатов, полученных на различных магнитных образцах (тонкие пленки, многослойные

тонкопленочные структуры с магнитными и немагнитными межслойными интерфейсами, с дополнительными слоями подмагничивания, с разным типом подложки), ясным физическим смыслом установленных закономерностей, тщательным сравнительным анализом полученных экспериментальных результатов исследования с теорией и большим объёмом литературных данных. Результаты опубликованы в двух патентах РФ на изобретение и почти в шести десятках статей центральных и зарубежных журналов, включенных в перечень ВАК, и прошли апробацию на Всесоюзных, Всероссийских и Международных конференциях.

**Практическая значимость полученных результатов** способствует расширению представлений о природе спин-зависимых явлений в планарных наноструктурах, позволяет создать новые магнитные функциональные материалы для устройств микроэлектроники и спинтроники. Она подтверждена наличием двух патентов РФ на изобретение и разработкой прикладных устройств, описанных в главе 5.

#### **Замечания к диссертационной работе.**

1. За исключением прикладных исследований в главе 5, все магнитные и магнитотранспортные исследования в остальных главах были проведены в статическом режиме (постоянное магнитное поле), что существенно сужает практическую значимость результатов, полученных в диссертации.
2. Автор раскрыл влияние процессов диффузии ионов Mn на магнитные свойства пленок. Однако при рассмотрении процессов влияния межслойных интерфейсов из Si, Ti и Cu автор не раскрыл, каким образом на формирование магнитных и магнитотранспортных свойств многослойных пленочных структур влияют процессы миграции этих ионов как при отжиге, так и при выдержке образцов при комнатной температуре в течение длительного времени? В этой связи, особенно следует выделить Si с малым ионным радиусом.
3. Не во всех главах автор указал погрешности измерений, что затрудняет проводить оценку характера поведения экспериментальных и рассчитанных данных. В отличие стандартного оформления рисунков в диссертации, некоторую часть рисунков автор оформил в виде данных берущих начало не от нуля, а от промежуточных точек. Почему-то это касается преимущественно немагнитных параметров, таких как изменение энтропии, показателя преломления, электросопротивления, константы молекулярного поля, магнитного импеданса, «ГМС».
4. Для аттестации «слоистости» многослойных структур автор использовал такие методики как высокоразрешающая электронная микроскопия и малоугловая рентгеновская дифракция. При этом полученные результаты носили, скорее, качественный характер. Использование же малоугловой рентгеновской рефлектометрии позволило бы получить и количественные параметры интерфейсов, в частности, шероховатость. Вместе с тем, возникает вопрос, почему рефлектометрия поляризованных нейтронов была использована только при изучении многослойных плёнок GdCo/Si/Co/Si, а не для всех многослойных тонкоплёночных структур.
5. В работе предложен способ формирования положительной (ферромагнитной) связи между магнитными слоями в многослойных структурах, а именно, использование прослоек из относительно слабомагнитного материала, в качестве которого использовались Gd и аморфный сплав Gd-Co. Автор не даёт развёрнутого объяснения, почему введение прослоек Gd-Co способно обеспечить необходимую положительную связь между слоями FeNi в гораздо более широком интервале толщин, чем введение прослоек Gd.
6. В работе не обсуждаются причины влияния размерного фактора на температуру Кюри многослойных плёнок на основе 3d- металлов, как это было сделано для многослойных плёнок Gd и Tb.

Указанные недостатки не снижают ценность работы и не затрагивают основного содержания диссертации.

**Заключение.** Диссертационная работа *Свалова Андрея Владимировича* выполнена на высоком научном уровне и представляет собой самостоятельное завершённое научное исследование, в котором содержится решение важных

научных задач, позволяющих построить более полную картину формирования магнитных свойств пленок и многослойных пленочных структур и указать пути практического применения этих, искусственно созданных, магнитных функциональных материалов.

Аннотация диссертации и опубликованные работы автора в высокорейтинговых научных изданиях полностью отражают научную новизну и содержание работы.

Считаю, что диссертационная работа “Влияние размерного и структурного факторов на магнетизм многослойных пленок на основе 3d- и 4f-металлов” по своей актуальности, научному уровню, объёму решаемых задач и завершённости исследований отвечает всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, **Свалов Андрей Владимирович**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11-физика магнитных явлений.

Официальный оппонент  
Главный научный сотрудник,  
зав. лабораторией магнитных полупроводников  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки им. М.Н. Михеева Института физики металлов УрО РАН,  
доктор физ.-мат. наук,

  
Сухоруков Юрий Петрович  
« 10 » 04 2017 г.

Почтовый адрес: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

Тел.: (343)1234567

E-mail: suhorukov@imp.uran.ru

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН,

кандидат физ.-мат. наук

  
Татьяна Петровна Суркова