

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Буйлова Никиты Сергеевича
«Атомное и электронное строение многослойных наноструктур с металлокомпозитными слоями и немагнитными прослойками»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

Диссертация Буйлова Никиты Сергеевича «Атомное и электронное строение многослойных наноструктур с металлокомпозитными слоями и немагнитными прослойками» посвящена исследованию природы межатомных взаимодействий на межфазных границах и интерфейсах в многослойных наноструктурах (МНС) двух типов $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$ и $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$ с разным содержанием металлической, диэлектрической (SiO_2) и углеродной компонент, инверсным расположением двух последних фаз в металлокомпозитных слоях или в прослойках, а также изучению влиянию этих взаимодействий на магнитные свойства многослойных наноструктур.

Актуальность работы. Одной из важнейших задач физического материаловедения является разработка и создание новых материалов, обладающих комплексом уникальных физических свойств. Современная технология даёт возможность формировать сложные гетерогенные структуры, состоящие из нескольких различных фаз и организованные на наноразмерном уровне. Типичными примерами таких структур являются доперколяционные наногранулированные композитные материалы металл–диэлектрик или многослойные наноструктуры с дискретными (композитными) слоями. В том случае, когда металлическая фаза формируется из ферромагнитного материала гетероструктуры проявляют целый комплекс магнитных и магнитотранспортных свойств, которые невозможны в обычных объёмных (блочных) материалах. Вместе с тем, серьёзной проблемой наноструктурированных многофазных сред является межфазное взаимодействие на интерфейсах, которое существенным образом сказывается на свойствах и характеристиках гетероструктур. Особенно это важно в том случае, когда ферромагнитные металлические фазовые включения контактируют с оксидной фазой. В силу наноструктурированности данных объектов исследовать межфазное взаимодействие чрезвычайно сложно. В связи с этим работа по исследованию многослойных наноструктур $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$ и

$[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$ с помощью широкого набора современных методов, позволяющих определить локальное окружение атомов, тип химических связей и получить информацию об электронном строении вещества без сомнения является актуальной, важной и своевременной.

Диссертация Буйнова Н.С. представляет собой методически очень качественное, комплексное исследование в котором было задействовано большое число неразрушающих методов изучения твердых тел: рентгеновская дифракция (РД), рентгеновская рефлектометрия (РР), ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия (УМРЭС), инфракрасная (ИК) спектроскопия, спектроскопия рентгеновского поглощения XANES (X-ray absorption near edge structure) и EXAFS (Extending X-ray absorption fine structure) с использованием синхротронного излучения (СИ), а также метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с послойным удалением слоев ионным травлением. Для получения информации о магнитных свойствах исследованных МНС, были изучены спектральные и полевые зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК).

В ходе комплекса проведённых исследований автором получен ряд **новых и важных результатов**, среди которых можно выделить следующие.

В работе впервые показано что в МНС $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$ с углеродом в составе металлокомпозитных слоев сохраняется планарность интерфейсов, установлено, что вокруг металлических гранул в композитных слоях образуются карбо-боридные оболочки/полу-оболочки, экранирующие металлы от образования силицидов и способствующие сохранению исходных кластеров из магнитных 3-d металлов.

В МНС $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$ с диоксидной матрицей металлокомпозитных слоев наблюдается снижение качества интерфейсов. Образовавшиеся вокруг металлических гранул металло-окси-боридные оболочки также препятствуют образованию силицидов 3-d металлов, однако железо активно связывается с кислородом матрицы.

Впервые были определены межатомные расстояния и координационные числа атомов Fe и Co в МНС $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$ и $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$ и показано, что различия в распределении локальной парциальной плотности

электронных состояний зависят как от концентрации металлической компоненты CoFeB в металлокомпозитных слоях МНС (выше или ниже порога перколяции), так и от химических связей на межфазных границах.

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в получении, обработке и расчете всех экспериментальных данных, в формулировании выводов по проделанным исследованиям, в представлении полученных результатов на международных и всероссийских научных конференциях.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты расширяют фундаментальные представления о механизмах самоорганизации, происходящих при формировании многокомпонентных наноструктурированных материалов, а также объясняют влияние межатомных взаимодействий на межфазных границах и интерфейсах на магнитный порядок, реализуемый в исследуемых МНС. Таким образом, полученные данные могут быть использованы при совершенствовании существующих и разработке новых методов и технологических приёмов формирования подобных наноструктур.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, изложенных в диссертации, определяется использованием комплекса современных, неразрушающих и информативных методов, таких как ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия, инфракрасная спектроскопия, спектроскопия рентгеновского поглощения с использованием Курчатовского источника синхротронного излучения, предоставляющих информацию о межатомных взаимодействиях как на интерфейсах, так и на межфазных границах, о локальной электронной структуре металлических кластеров CoFeB, о координационных числах и межатомных расстояниях, а также многократной воспроизводимостью экспериментальных результатов.

Вместе с тем, имеются следующие замечания.

1. В тексте диссертации несколько раз подчеркивается, что многослойные наноструктуры являются аморфными. Вывод об этом сделан на основе рентгеновской дифракции тонких пленок, нанесённых на ситалловые подложки. Очевидно, что сигнал от массивной подложки гораздо более интенсивен, по сравнению с сигналом от тонкой пленки, которая к тому же

наноструктурированная. Сигнала от пленки просто не видно на фоне пиков от ситалла. Более того, в работе показано, что бор, являющийся аморфизатором в сплаве CoFeB, формирует карбиды, таким образом, частично удаляется из металлического сплава. Следовательно, гранулы из сплава CoFe, не содержащего аморфизатора (бора), с высокой степенью вероятности должны быть кристаллическими.

2. В работе исследованы две многослойные системы с одинаковым набором фаз: CoFeB, C и SiO₂. Однако, в одной системе концентрация металлической фазы в композитных слоях составляет 34 ат.%, а в другой системе - в два раза больше (60 ат.%). Поэтому наблюдаемая в экспериментах разница в магнитных свойствах двух исследованных систем определяется именно этим: доперколяционные композиты с ферромагнитной фазой всегда суперпарамагнитны, а за порогом перколяции они всегда проявляют ферромагнитные свойства. Маловероятно, чтобы это зависело от химических связей на интерфейсе. Роль химических связей можно было бы выявить лишь в случае одинаковой концентрации ферромагнитной фазы в многослойных наноструктурах.

3. При анализе результатов рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии многослойных структур (CoFeB)₆₀C₄₀/SiO₂]₂₀₀ установлено, что при проникновении кислорода через поверхность пленки в её объем железо окислено на толщине почти в два раза больше, чем кобальт (26 и 16 нм, соответственно). Однако интерпретации этого факта в работе нет.

4. На рисунках следовало бы указывать не номера образцов (№1, №3, №4 и т.п.), а толщину бислоя, тем более, что она измерялась. Это прежде всего относится к рис. 3.5, 3.6, 3.20, 3.21, 4.5, 4.6, 4.19, 4.20.

Заключение. Несмотря на сделанные замечания общее впечатление о диссертации положительное. Замечания не ставят под сомнение новизну и значимость выносимых на защиту положений и выводов. Результаты, полученные автором, обладают высокой научной и практической значимостью и будут востребованы при дальнейших фундаментальных исследованиях и прикладных разработках.

Работа прошла хорошую апробацию на различных всероссийских и международных конференциях и семинарах, по результатам которых были

опубликованы 4 статьи в ведущих журналах из перечня ВАК, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Основные результаты диссертации в полной мере отражены в этих опубликованных работах.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация Буйнова Н.С., представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение ряда задач, имеющих существенное значение для физики конденсированного состояния. Тематика и содержание диссертации полностью соответствуют формуле специальности 01.04.07 - «физика конденсированного состояния».

Диссертация «Атомное и электронное строение многослойных наноструктур с металлокомпозитными слоями и немагнитными прослойками» по своей актуальности и новизне, достоверности и совокупности полученных результатов, а также уровню их апробации в полной мере соответствует всем требованиям п. 9 - 11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями постановления Правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335), а её автор, Буйлов Никита Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «физика конденсированного состояния».

Профессор кафедры физики твердого тела,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 - «физика конденсированного состояния»),

профессор


23.10.2020

Стогней Олег Владимирович

394026, Московский проспект 14,
Телефон: +7(473) 246-66-47

e-mail: sto@sci.vrn.ru

Первый проректор ВГТУ

Проздов И.Г.

