

**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.

В настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной физики твердого тела является изучение фундаментальных свойств и практическое применение аморфных гетероструктур. С фундаментальной точки зрения аморфные наногранулированные среды оказались интересными объектами с туннельным электронным транспортом, ярко выраженными размерными эффектами и сложными магнитными свойствами, обусловленными однодименностью ферромагнитных наногранул, изолированных друг от друга диэлектриком. Если в качестве одной из фаз использовать переходные металлы Fe, Co, Ni или их сплавы, то можно получить магнитные нанокомпозиты с перспективами использования в области ВЧ и СВЧ электромагнитного излучения, востребованных в спинtronике и микроэлектронике.

Одним из направлений интенсивных экспериментальных и теоретических исследований является изучение влияния состава и структуры наногетероструктур, образовавшихся в процессе самоорганизации, на магнитные, магнитооптические и магнитотранспортные свойства.

Несмотря на большое количество работ в этой области, до сих пор отсутствует ясность в понимании процессов, сопровождающих структурную перестройку вещества, в которых значительную роль играют взаимодействия магнитных наночастиц между собой, с матрицей и с подложкой, при определяющем влиянии размерных и поверхностных эффектов. В связи с этим диссертационная работа Буйлова Н.С., посвященная исследованию особенностей атомного и электронного строения, фазового состава, межатомных взаимодействий и их влияния на магнитные

свойства многослойных наноструктур (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 магнитного сплава CoFeB и инверсным расположением неметаллических фаз С и  $\text{SiO}_2$  в металлокомпозитных слоях или в прослойках, является **актуальной**.

Для достижения сформулированной в диссертационной работе цели и решения поставленных задач диссертант использовал комплекс современных экспериментальных методов диагностики атомной структуры и фазового состава вещества: рентгеновскую дифракцию, рентгеновскую рефлектометрию, ультрамягкую рентгеновскую эмиссионную спектроскопию, инфракрасную спектроскопию, рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию, спектроскопию рентгеновского поглощения: XANES (X-ray absorption near edge structure) и EXAFS (Extending X-ray absorption fine structure). Для получения информации о магнитных свойствах образцов МНС были исследованы спектральные и полевые зависимости экваториального эффекта Керра.

**Основные новые результаты работы** заключаются в следующем:

- Показано, что в металлокомпозитных слоях МНС, в зависимости от содержания металлической компоненты выше или ниже порога переколяции, на межфазных границах металлических кластеров CoFeB с окружающей матрицей образуются либо тонкие карбо-боридные оболочки/полуоболочки в матрице из углерода, не препятствующие контактам металлических кластеров в МНС  $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$ , либо более толстые металло-окси-боридные оболочки в матрице из  $\text{SiO}_2$ , препятствующие контактам металлических кластеров в МНС  $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$ .

- Образование таких карбо-боридных или металло-окси-боридных оболочек вокруг кластеров CoFeB экранирует их от образования силицидов 3d- металлов на межфазных границах и на интерфейсах.

- Относительное содержание металлической компоненты CoFeB в композитных слоях МНС выше или ниже порога переколяции и химические связи на межфазных границах определяют различия в распределении локальной парциальной плотности электронных состояний и координационных числах атомов Fe и Co в МНС двух типов

$[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$  и  $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$  и их ферромагнитные или суперпарамагнитные свойства.

- С помощью подгонки Фурье образов спектров EXAFS показано, что в МНС  $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$  с содержанием металлических кластеров  $x=60$  ат.% выше порога перколяции, атомы Со и Fe имеют сопоставимые координационные числа  $N_{\text{Fe}}=6.78$  и  $N_{\text{Co}}=7.68$ , свидетельствующие в пользу сохранении кластеров исходного сплава, что согласуется с результатами магнитооптических исследований о ферромагнитном состоянии МНС.

- В МНС  $[(\text{CoFeB})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{46}$  с содержанием металлических кластеров  $x=34$  ат.% до порога перколяции в диоксидной ( $\text{SiO}_2$ ) матрице атомы Со и Fe имеют существенно различные координационные числа  $N_{\text{Co}}=6.70$  и  $N_{\text{Fe}}=3.37$  из-за окисления атомов железа и частичного разрушения кластеров исходного сплава, что также согласуется с результатами магнитооптических исследований о суперпарамагнитном состоянии этой МНС.

**Достоверность** приведенных в диссертации результатов исследований обеспечивается использованием современного сертифицированного диагностического оборудования не только ЦКП ВГУ, но и ЦКП ЮФУ и Синхротронного Центра Курчатовского Института, а также современных программных комплексов для обработки данных и моделирования.

Выводы, сделанные в диссертации, следуют из полученных достоверных данных и не противоречат современным научным представлениям.

**Научная и практическая значимость** полученных в диссертационной работе Буйлова Н.С. результатов обусловлена тем, что они расширяют современные представления о физических и физико–химических процессах, происходящих при формировании новых материалов в виде сложных гетерофазных аморфных многослойных наносистем с разным содержанием магнитного сплава CoFeB в металлокомпозитных слоях и инверсным расположением неметаллических фаз С и  $\text{SiO}_2$  в композитных слоях или в прослойках. Комплекс данных, приведенных в работе, может быть использован для оптимизации технологических режимов получения многослойныхnanoструктур с металлокомпозитными слоями и

немагнитными прослойками, а также более эффективного управления электромагнитными свойствами подобных МНС.

Текст автореферата в полной мере отражает содержание диссертации. Выносимые на защиту положения соответствуют основным результатам и выводам работы. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в список изданий, рекомендованных ВАК, и в международные базы цитирования WoS и Scopus. Содержание диссертации, приведенных результатов, сделанных выводов и выдвигаемых на защиту положений соответствует указанной специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Тем не менее, следует обратить внимание автора на ряд представленных ниже замечаний:

1. Глава 1, по моему мнению, перегружена многочисленными цитируемыми экспериментальными данными, которые в дальнейшем диссертант практически не использует при обсуждении собственных оригинальных результатов.

2. Среди большого объема полученных автором экспериментальных результатов отсутствуют собственные электронномикроскопические оценки размеров металлических гранул, которые в диссертации именуются кластерами.

3. На рисунке 3.3 представлены Si  $L_{2,3}$ -спектры наноструктуры  $[(\text{CoFeB})_{60}\text{C}_{40}/\text{SiO}_2]_{200}$  для слоев 10 нм и 60 нм. Анализируя полученные результаты, автор делает вывод о соответствии спектров исследуемых структур спектрам, характерным для оксидов кремния, которые приведены на рисунке 3.4. Для наглядности стоило хотя бы для одного из исследуемых образцов привести сопоставление с эталонным спектром.

4. В оформлении диссертации так же присутствует ряд неточностей и описок, например, с.68 «низкоэнергетическая область XANES обладает высокой длинной свободного пробега электронов...», с. 69 рис. 2.13 - отсутствует ссылка на источник.

Однако сделанные замечания не снижают общего впечатления о высоком научном уровне полученных результатов, их новизне, достоверности и практической значимости.

## **Заключение**

В заключении следует отметить, что диссертация Буйлова Никиты Сергеевича «Атомное и электронное строение многослойных наноструктур с металлокомпозитными слоями и немагнитными прослойками» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе критериям, установленным п.9-11, 13, 14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. №335), а её автор, Буйлов Никита Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

*Согласна на обработку моих персональных данных*

*19.10.2020г.*

**Официальный оппонент**

Яловега Галина Эдуардовна  
доктор физико-математических наук  
(специальность 01.04.07 - «физика конденсированного состояния»),  
доцент,  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,  
физический факультет,  
кафедра физики наносистем и спектроскопии,  
заведующий



ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»  
Почтовый адрес: 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105  
Тел.: +7(863) 218-40-00  
Электронный адрес: info@sfedu.ru

Членский секретарь Совета  
Мирошниченко О.С.