

В диссертационный совет Д 002.205.01
при ФГБУН Физико-техническом институте
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Фёдорова Владимира Викторовича «ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ РОСТА, СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФТОРИДОВ (CaF_2 ; MnF_2) И МЕТАЛЛОВ (Co ; Ni)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Успешная разработка и внедрение новых низкоразмерных систем, таких как тонкопленочные гетероструктуры, невозможны без фундаментальных исследований их реальной кристаллической структуры и физических свойств. Целью диссертационного исследования Федорова В.В. являлось изучение процессов формирования и исследование свойств магнитоупорядоченных нано- и гетероструктур на основе фторидов и металлов. В работе исследуются как размерные эффекты – зависимость магнитных свойств ферромагнитных (ФМ) слоев переходных металлов Co и Ni от поверхностной плотности и размера частиц, образующих слой, так и эффекты, связанные с взаимодействием на интерфейсах гетероструктуры (эффекты магнитной близости). С этой целью в работе рост ФМ металлов Co и Ni осуществлялся на поверхности антиферромагнитного (АФМ) фторида – MnF_2 . Системы ФМ/АФМ представляют интерес из-за проявляющегося в них эффекта обменного смещения петли гистерезиса ферромагнетика.

Эпитаксиальный рост фторидов (CaF_2 и MnF_2) в настоящей работе осуществлялся на перспективных с практической точки зрения подложках кремния, что позволило стабилизировать в слоях MnF_2 орторомбическую структуру типа $\alpha\text{-PbO}_2$, наблюдаемую в объемном

материале лишь при больших давлениях. Постоянные решетки выбранных в качестве ФМ материала Co и Ni, допускают эпитаксиальный рост на поверхностях фторидов, а разница в поверхностных энергиях металлов и фторидов способствует росту в виде отдельно стоящих островков, что позволило использовать метод молекулярно-лучевой эпитаксии для создания самоорганизованных массивов наночастиц, с заданной формой, размером и ориентацией решетки. Такой способ формирования массивов наночастиц представляет интерес, как с практической точки зрения, так как не требует применения литографии и решает проблему ориентации частиц, так и с точки зрения фундаментальных исследований в области физики поверхности, например связанных с исследованием процессов зародышеобразования.

Таким образом, цель и задачи диссертационного исследования являются **актуальными** и затрагивают важные на настоящее время проблемы физики конденсированного состояния. Выбранная система (металл/фторид/кремний), использованные методы исследования, а также технологическая составляющая, демонстрируют, что настоящая работа выполнена на весьма *высоком уровне*, с использованием современных и передовых методов.

Для решения поставленных задач в работе применяется большое число современных методик. Например, для исследования морфологии гетероструктур в работе широко применялись методы атомно-силовой, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии. Интегральная оценка производилась методами рентгеновской рефлектометрии и малоуглового рассеяния. Для исследования кристаллической структуры в работе продемонстрировано совместное применение высокочувствительных методов дифракции быстрых электронов и рентгеновской дифрактометрии в геометрии скользящего падения. Существенная часть экспериментов в работе выполнена с применением синхротронных источников рентгеновского излучения.

Достоверность и обоснованность научных положений рецензируемой диссертационной работы обеспечивается корректным выбором современных методов исследований и соответствием комплекса полученных результатов проведенными структурными расчетами и предложенными физическими моделям наблюдаемых явлений.

Данные, представленные в диссертационной работе, получены на основе квалифицированно поставленных экспериментов и находятся в полном соответствии с данными научно-технической литературы. Интерпретация полученных экспериментальных результатов проведена в рамках моделей, признанных широким кругом отечественных и зарубежных исследователей.

Научная новизна работы состоит, прежде всего, в получении Фёдоровым В.В, новых данных о процессах формирования наноразмерных гетероструктур на основе фторидов и металлов, их структурных и магнитных свойствах. Получены также данные о процессах эпитаксиального роста кобальта и никеля на поверхности фторидов CaF_2/Si и $\text{MnF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}$. Найдены режимы, при которых в процессе эпитаксиального роста происходит стабилизация кубической структуры кристаллической решетки кобальта. Показано, что наблюдаемое в работе эпитаксиальное согласование имеет место за счет кратного соответствия постоянных решетки растущего слоя и подложки. Выявлена связь между кратным соответствием постоянных решетки и образованием дефектов упаковки в процессе роста наночастиц. Предложено теоретическое описание наблюдаемых ростовых процессов, делающее возможным создание массивов эпитаксиальных наноразмерных островков металлов, с заданными параметрами.

В работе впервые были созданы гетероструктуры типа ФМ/АФМ на основе антиферромагнитных фторидов, слой ФМ в которых был образован отдельно стоящими эпитаксиальными наноразмерными

островками металлов Co и Ni. Полученные в работе результаты позволили проследить, как изменяются механизм перемагничивания, и другие магнитные свойства системы при переходе от отдельно стоящих частиц к сплошному слою.

Новым научным результатом также является информация о процессах эпитаксиального согласования слоев MnF_2 при росте на поверхности CaF_2/Si . Показано, что реализуемый при согласовании орторомбической решетки MnF_2 с кубической решеткой буферного слоя CaF_2 набор ориентационных доменов, определяется не только симметричными отношениями, но и структурой гетерограницы. Так в зависимости от морфологии поверхности буферного слоя CaF_2 (001) в слое MnF_2 (100) реализуются два или четыре ориентационных домена.

Научная новизна работы состоит также в обнаружении в гетероструктурах ФМ металл – АФМ фторид “эффекта магнитной близости”, и его непосредственного наблюдения при комнатной температуре (300 К), существенно превышающей температуру антиферромагнитного упорядочения MnF_2 ($T_{\text{Нееля}} \sim 67\text{K}$). Образование ферромагнитного упорядочения ионов Mn^{2+} в приграничной области слоя MnF_2 в результате антиферромагнитного обменного взаимодействия со слоем ФМ, открывает перспективы исследования в гетероструктурах магнитных явлений при более высоких, чем ожидается для объемных материалов температурах.

Практическая значимость работы состоит в получении новых технологических результатов, имеющих потенциальную практическую перспективу создания функциональных гетероструктур. В работе разработана технология получения сверхтонких (1-20 нм) ферромагнитных слоев металлов с такими заданными параметрами, как одноосная магнитная анизотропия или коэрцитивная сила. Показано, что величиной анизотропии типа легкая плоскость проявляющейся в массивах ФМ наночастиц Co и Ni можно управлять, изменяя поверхностную плотность частиц. Полученные результаты могут быть

использованы при создании магнитных слоев, применяемых в устройствах хранения информации с магнитной записью, датчиках или перспективных устройствах спинтроники, например таких как спиновые клапаны.

По диссертационной работе можно сделать следующие *замечания*:

1. Представленное в третьей главе работы (разделы 3.2.1-3.2.2) теоретическое описание процессов роста в рамках кинетической модели относится лишь только к росту кобальта на CaF_2 с ориентацией (111). Подобное теоретическое рассмотрение применительно к росту никеля на $\text{CaF}_2(111)$ или к росту металлов на поверхностях CaF_2 с другими ориентациями в работе не проводилось.
2. При анализе влияния кристаллического поля (раздел 5.3.2 стр.167) на экспериментальные спектры поглощения в окрестности L-края иона Mn^{2+} сравниваются со спектрами поглощения объемных кристаллов MnF_2 с тетрагональной структурой типа рутила, полученные же в работе пленки имеют орторомбическую структуру. Также в работе следовало бы проследить влияние кристаллического поля на спектры поглощения не только в зависимости от толщины слоя, но и в зависимости от размера кристаллитов, образующих слой MnF_2 .
3. Основные положения, выносимые на защиту, содержат 7 пунктов; считаю, что это слишком много для кандидатской диссертации. Какие-то из пунктов можно было объединить, кроме того пункты 4 и 6 более похожи на выводы по главе, чем на защищаемые положения.
4. Ряд полученных в работе величин не содержат погрешностей. Например, в таблицах 9 и 10 такие величины, как намагниченность насыщения, удельная намагниченность насыщения и остаточная намагниченность приведены без погрешностей.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации. В проведенном Фёдоровым В.В. исследовании демонстрируется полное соответствие приемов и методов поставленной цели при выполнении значительного объема исследовательской работы, содержащей 151 рисунок и 206 страниц машинописного текста. Цитируемая литература тщательно проработана и содержит 369 ссылок.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Материал представлен в четкой структурно-логической последовательности. Стиль изложения текстовой части и наглядность иллюстративного материала, проведенные эксперименты с применением современных методов, не вызывают нареканий.

Содержание автореферата правильно и полно отражает основные положения диссертации.

Диссертационная работа Фёдорова В.В. выполнена на высоком научном уровне и представляет собой объёмное, глубокое исследование, являющееся существенным научным вкладом в физику конденсированного состояния. Считаю, что содержание диссертационной работы Фёдорова В.В. в полной мере соответствует специальности 01.04.07 «физика конденсированного состояния» и требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук ВАК Минобрнауки РФ, согласно п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842.

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры экспериментальной физики,
ФГБУ ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого

Родный П.А.

29 сентября 2015 г.
195251, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 29,
Тел.: 5527790