

**УТВЕРЖДАЮ**

**Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского государственного  
Университета**

\_\_\_\_\_ /С.В. Аплонов/

«    » \_\_\_\_\_ 2017 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургского государственного университета на диссертационную работу Гребенюка Георгия Сергеевича **«Фотоэлектронная спектроскопия сверхтонких магнитных пленок 3d-металлов и их силицидов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

#### **Актуальность темы диссертации.**

Диссертационная работа Гребенюка Г. С. посвящена проблеме формирования на поверхности кремния магнитных пленок металлов группы железа (а также их сплавов и силицидов) предельно малой толщины. Такие пленки представляют большой интерес для спинтроники и активно исследуются в последние годы. Особенно перспективны они для решения задач интеграции магнитных устройств в микросхемы, создаваемые с помощью стандартной кремниевой технологии. Однако разработка новых приборов на этой основе упирается в недостаточную изученность механизмов формирования и магнитных свойств интерфейсов металл-кремний. Многие вопросы, касающиеся роста ультратонких слоев ряда металлов на кремнии, оптимальных условий синтеза силицидных фаз и закономерностей возникновения ферромагнетизма

в этих системах все еще остаются неясными и требуют дальнейшего изучения. В этом плане диссертационная работа Гребенюка Г. С., в которой в одинаковых экспериментальных условиях впервые исследованы изменения химического состава, электронного строения и магнитных свойств ультратонких пленок 3d-металлов и их силицидов в зависимости от толщины пленок, а также механизмов их формирования несомненно **является актуальной** и способствует дальнейшему развитию представлений о фундаментальных свойствах низкоразмерных магнитных структур и возможности их применения в современной наноэлектронике и спинтронике, в первую очередь в системах, создаваемых на базе стандартных кремниевых технологий.

Для проведения исследований в диссертационной работе Гребенюка Г.С. использовался комплекс современных и хорошо апробированных методов исследования поверхности, в первую очередь, основанных на использовании синхротронного излучения. Для изучения электронной структуры, состава и стехиометрия поверхности исследуемых систем, а также их изменений процессе их формирования широко использовались методы фотоэлектронной спектроскопии остовных уровней и валентной зоны высокого энергетического разрешения, в том числе фотоэлектронной спектроскопии со спиновым разрешением. Магнитные свойства пленок изучались с методом линейного магнитного дихроизма. Морфология формируемых систем и структура поверхности изучалась методами атомно-силовой микроскопии и дифракции медленных электронов. Значительная часть исследований проведена с использованием научного оборудования Российско-германской лаборатории в центре синхротронного излучения BESSY II. Синтез и характеристика исследуемых пленок проводились в условиях сверхвысокого вакуума. Корректность полученных результатов подтверждена сопоставлением их с литературными данными, имеющимися для некоторых из изученных систем, и теоретическими расчетами. Основные выводы диссертации и все защищаемые положения обоснованы достаточно убедительно, и их **достоверность** сомнений не вызывает.

В диссертационной работе проведены детальные исследования механизмов формирования сверхтонких магнитных пленок 3d-металлов (Fe, Co, Mn) и их силицидов на различных поверхностях монокристаллического кремния, включая вицинальные поверхности, изучена электронная структура и фундаментальные физико-химические свойства синтезированных объектов. Изучены изменения их фазового состава, проанализированы начальные стадии роста пленок данных 3d-металлов на основных гранях монокристаллического кремния, детально исследованы реакции силицидообразования, проанализирована взаимосвязь элементного и фазового состава пленок, их электронного строения и магнитных свойств, выявлены особенности ферромагнитного упорядочения и магнитной анизотропии формируемых магнитных структур. Исследованы механизмы самоорганизации магнитных наноструктур на ступенчатых (вицинальных) поверхностях кремния.

Можно выделить следующие наиболее важные результаты и достижения диссертационной работы:

1. Детально исследованы начальные стадии роста пленок кобальта, железа и марганца на поверхности кремния на трех основных гранях кремния – Si(100), Si(111) и Si(110). Установлены закономерности изменений фазового состава и электронного строения пленок с увеличением их толщины.

2. Выявлено, что для кобальта на всех поверхностях рост пленок начинается с образования сверхтонкого слоя интерфейсного моносилицида, на котором формируется пленка твердого раствора кремния в кобальте с постепенным переходом к пленке металлического кобальта. На поверхности этой пленки происходит сегрегация атомов кремния.

3. Найдены условия синтеза стабильных силицидов кобальта и марганца, а также метастабильной ферромагнитной фазы  $\text{Co}_3\text{Si}$  на различных гранях монокристаллического кремния методом твердофазной эпитаксии. Выявлены закономерности и пороги протекания термостимулированных твердофазных реакций.

4. Исследованы магнитные свойства систем Fe/Si и Co/Si, и обнаружено, что ферромагнитное упорядочение вдоль поверхности носит пороговый характер и наступает после нанесения 0.6-0.7 нм металлического слоя. При этом происходит резкое изменение направления вектора намагниченности от перпендикулярного к поверхности к параллельному поверхности.

5. Установлены закономерности формирования наноструктур железа на ступенчатых поверхностях кремния с использованием принципа самоорганизации наноструктур. Исследовано влияние морфологии поверхности подложки на магнитные свойства ультратонких слоев железа на кремнии. Обнаружена магнитная анизотропия пленок, образующихся на вицинальной грани.

6. Изучены закономерности формирования межфазных границ Si/Co и Si/Fe. Исследованы особенности роста сверхтонких двухслойных пленок на основе Fe и Co при разной последовательности их нанесения. Показано, что данные пленки образуют единую магнитную систему. При этом, меняя последовательность нанесения слоев кобальта и железа можно изменять свойства формируемой пленки.

7. Разработана методика синтеза на кремниевых подложках сверхтонких (около 2 нм) ферромагнитных пленок сплава Гейслера  $\text{Co}_2\text{FeSi}$ , перспективных для использования в спинтронике, методом реактивной эпитаксии с послеростовым отжигом образца. Разработана методика формирования тонких пленок данного сплава с использованием барьерного слоя  $\text{CaF}_2$  на поверхности кремния с последующей твердофазной эпитаксией компонент сплава.

**Научная новизна** работы заключается в детальном комплексном исследовании начальных стадий формирования пленок 3d-металлов (Fe, Co, Mn) на сингулярных и вицинальных поверхностях монокристаллов кремния, которое позволило установить закономерности изменений фазового состава и электронного строения пленок с увеличением их толщины. Найдены условия синтеза стабильных силицидов кобальта и марганца, а также метастабильной ферромагнитной фазы  $\text{Co}_3\text{Si}$  на различных гранях монокристаллического кремния в режиме твердофазной эпитаксии. Выявлены условия формирова-

ния ферромагнитных фаз и изучены размерные зависимости магнитных свойств сверхтонких пленок железа и кобальта на кремнии, обнаружен пороговый характер их ферромагнитного упорядочения. Изучено влияние морфологии систем на магнитные свойства формируемых пленок. Разработана методика синтеза на кремниевых подложках сверхтонких ферромагнитных пленок сплава Гейслера на основе кобальта, перспективных для использования в спинтронике. Отличительной особенностью методики является создание барьерного слоя  $\text{CaF}_2$  с последующей твердофазной эпитаксией компонент сплава.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 156 страниц, включая 111 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 165 наименований. По результатам работы опубликовано 12 статей в научных журналах, индексируемых в системах Web of Science и Scopus.

#### **Научная и практическая значимость работы.**

Научная ценность работы заключается в том, что в ней систематически исследованы ростовые процессы и фазовые превращения, протекающие в приповерхностной области твердого тела в ходе напыления ультратонких пленок металлов на монокристаллический кремний и последующего отжига сформированных структур. Установлены закономерности формирования интерфейсов металл-кремний и обнаружены корреляции изменений их фазового состава и магнитных свойств.

**Практическая значимость** работы определяется тем, что в ней детально изучены магнитные свойства сверхтонких пленок металлов и их силицидов, сформированных на поверхности кремния. Эти результаты могут быть использованы для оптимизации методов получения магнитных наноструктур на монокристаллическом кремнии и для улучшения характеристик приборов, создаваемых на основе ультратонких магнитных пленок. Разработанная в диссертации методика формирования рекордно тонких ферромагнитных пленок сплава Гейслера  $\text{Co}_2\text{FeSi}$  может быть применена для создания источни-

ков спин-поляризованных электронов, перспективных для использования в спинтронике.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать к применению в ИФ им. Л. В. Киренского СО РАН (Красноярск), ФГУП ЭЗАН (Черноголовка Московской области), ИАП РАН (Санкт-Петербург), ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), СПбГУ (Санкт-Петербург), СПбПУ (Санкт-Петербург), ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

**По диссертации имеются следующие замечания:**

1. При оценке стехиометрического и фазового состава синтезируемых пленок в используемых формулах не учитывалось влияние фактора обратного рассеяния электронов, различного для элементов с разным атомным номером, могло привести к ошибкам в определении концентрации элементов в формируемых фазах.

2. Несмотря на то, что в работе использовался метод дифракции медленных электронов, в тексте работы не приведены соответствующие дифракционные картины, что затрудняет анализ приведенных экспериментальных данных.

3. Несмотря на то, что при анализе данных по разложению структуры фотоэмиссионных пиков основных уровней на составляющие (что является основой представленного анализа) широко используется интерпретация, представленная в литературе, в диссертационной работе не хватает представления детального обоснования используемой интерпретации компонент разложения тонкой структуры спектров.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не затрагивают основных выводов работы и не меняют в целом **высокую и положительную оценку диссертационной работы**. Основные положения диссертации Гребенюка Г.С., выносимые на защиту, безусловно, обладают научной новизной. Работа выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в развитие современной физической электроники. Результа-

ты работы полностью и своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на многих российских и международных конференциях и семинарах. Автореферат диссертации полно и правильно отражает содержание работы.

### **Заключение**

Диссертация Гребенюка Георгия Сергеевича «Фотоэлектронная спектроскопия сверхтонких магнитных пленок 3d-металлов и их силицидов» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ (в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – «физическая электроника».

Диссертационная работа Гребенюка Г.С. докладывалась на семинаре кафедры электроники твердого тела физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета (протокол № от 21 февраля 2017 г.) и была единогласно одобрена.

Отзыв на диссертационную работу составлен проф. кафедры электроники твердого тела, д.ф.-м. н. А.М. Шикиным.

Зав. кафедрой электроники твердого тела физического факультета СПбГУ, доктор физ.- мат. наук, профессор \_\_\_\_\_ (Барабан А.П.)

Зав. лабораторией физической электроники кафедры электроники твердого тела физического факультета СПбГУ, доктор физ.- мат. наук, профессор \_\_\_\_\_ (Шикин А.М.)

г. Санкт-Петербург, 21.02.2017