

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Санкт-Петербургский

государственный университет

_____ **С. В. Микушев**

_____ **2022 г.**

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Кавеева Андрея Камильевича «Синтез и структурно-стимулированные особенности эпитаксиальных гибридных магнитных наносистем», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11-«Физика полупроводников».

Актуальность темы выполненной работы

Синтез квазидвумерных эпитаксиальных систем привлекает в настоящее время огромное внимание не только с точки зрения фундаментального интереса, но и как практически важного направления для развития элементной базы спинтроники, валлейтроники и наноэлектроники нового поколения. Диссертационная работа посвящена синтезу и исследованию свойств новых комбинаций материалов, обладающих магнитными и полупроводниковыми свойствами. Назревшая необходимость синтеза новых эпитаксиальных магнитных и топологических наносистем для дальнейшего использования при конструировании приборов спинтроники и определяет высокую актуальность данной работы.

Новизна исследования и полученных результатов

Практически все результаты, представленные в работе, являются новыми. К числу наиболее важных и принципиальных результатов, определяющих научную новизну работы, можно отнести следующие:

- экспериментальное наблюдение запрещенной зоны в точке Дирака за счет создания поверхностного ферромагнитного слоя при осаждении ферромагнитного металла на поверхность топологического изолятора с сопутствующим его структурным перестроением,

- получение высококачественных планарных эпитаксиальных слоёв $Pb_{1-x}Sn_xTe$ на Si(111), обнаружение поверхностных дираковских состояний,

- наблюдение эффекта гигантского магнитосопротивления в системе на основе кобальт-содержащих ферромагнитных контактов и кристаллического топологического изолятора $Pb_{1-x}Sn_xTe$,

- впервые обнаружен структурный фазовый переход при отжиге в вакууме в поверхностном слое полупроводникового монокристалла $BiTeI(0001)$ с рашбовским расщеплением поверхностных состояний,

- синтез монокристаллических эпитаксиальных плёнок 3d-металл – диэлектрик на основе Co, Fe, Ni, MgO и оксидов железа, пригодных для создания магнитных туннельных переходов или магнитных систем с эффектом близости,

- получение тонких эпитаксиальных плёнок инвертированной шпинели $NiFe_2O_4$, имеющих ширину линии ферромагнитного резонанса и намагниченность насыщения, сравнимую с таковой в объемных кристаллах,

- получение тонких поликристаллических плёнок феррита-граната $Y_3Fe_5O_{12}$ без примеси паразитных структурных фаз на полупроводниковой подложке GaN,

- экспериментально продемонстрирована возможность использования ионов Cr^{3+} в качестве люминесцентных центров, чувствительных к изменению кристаллического окружения в тонких пленках $MgAl_2O_4/SrTiO_3(001)$, полученных методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- воспроизводимостью полученных результатов на различных образцах и в различное время, использованием различных современных методик и в различных сочетаниях,

- использованием оригинальной технологии роста эпитаксиальных систем совместно с 3D сборкой дифракционных картин, что позволило однозначно охарактеризовать кристаллическую структуру полученных *in situ* систем,

- широкой апробацией основных научных результатов на научных семинарах и конференциях, в том числе международных,

- экспертизой опубликованных статей по теме диссертации в научных

рецензируемых изданиях.

Значимость полученных результатов для науки и практики

В диссертационной работе А.К. Кавеева получен обширный экспериментальный материал по синтезу квазидвумерных эпитаксиальных систем, что являются существенным шагом в создании новых материалов, необходимых для наблюдения и исследования таких эффектов, как квантовый аномальный эффект Холла, эффект гигантского магнитосопротивления, эффект туннельного магнитосопротивления и спин-орбитальный торк-эффект.

Полученные в диссертации результаты представляют существенный интерес в части практического применения:

- создание новых приборов спинтроники на основе системы ферромагнетик – топологический изолятор и ферро- и парамагнитных материалов с измененной кристаллической структурой,
- улучшение транспортных свойств поверхностных состояний топологических изоляторов,
- уменьшение рассеяния носителей заряда на интерфейсах магнитного туннельного перехода и перехода ферромагнетик – топологический изолятор,
- создание СВЧ-приборов на основе ферритов-гранатов и шпинелей, имеющих улучшенные динамические магнитные свойства, в том числе низкое затухание спиновых волн.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Кавеева Андрея Камильевича могут быть использованы при создании новых приборов спинтроники, СВЧ электроники и оптоэлектроники.

В работе синтезированы и исследованы новые структуры на основе топологических изоляторов, которые могут быть использованы для организации бездиссипативного электронного транспорта, хранения и обработки информации. Разработанные методики синтеза могут быть внедрены в Санкт-Петербургском государственном университете, Академическом университете им. Ж. И. Алфёрова (г. Санкт-Петербург), Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (г. Москва), Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г.

Новосибирск) и других институтах РАН.

Изучение структуры интерфейса, улучшение кристаллического качества и исследование структурных и магнитных свойств систем на основе ферромагнитных металлов и оксидов железа и магния могут быть использованы в Московском физико-техническом институте и ООО «Крокус Наноэлектроника» при проектировании и производстве магниторезистивной памяти STT-MRAM, в группе компаний AMT&C для применения в магнитных туннельных переходах и в гетероструктурах с эффектами близости.

Улучшение кристаллического качества и исследование структурных и магнитных свойств эпитаксиальных слоев ферритов-шпинелей на диэлектрических подложках может представлять интерес для Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (г. Москва), Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (г. Москва), Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова РАН (г. Москва) и ОАО «Завод Магнетон» (г. Санкт-Петербург) с целью будущей интеграции в монолитных интегральных схемах СВЧ-диапазона.

Результаты диссертационной работы также представляют интерес для Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, ООО «Коннектор Оптикс» (г. Санкт-Петербург) и АО «Светлана-Рост» (г. Санкт-Петербург).

Замечания по работе

В качестве замечаний по тексту диссертации можно высказать следующее:

- при демонстрации экспериментальных ФЭСУР-карт автор не приводит направления в поверхностной зоне Бриллюэна вдоль, которых данные карты были измерены,

- при осаждении атомов металла на подогретую подложку и оценке полученных толщин автор не учитывает различные коэффициенты прилипания к поверхности образца и поверхности кварцевых микровесов,

- при анализе РФЭС-спектров автор не проводит разложения основных уровней на компоненты, не оценивает толщины и глубину залегания отдельных элементов. Данная информация была бы полезна при структурной характеристике выращенных систем,

- на рис 4.5 (д) приводится расчёт зонной структуры, но не совсем ясно для какой элементарной ячейки он был получен,

- на рис. 4.6 (б) автор однозначно сопоставляет знак измеренного дихроизма знаку спиновой компоненты вдоль поверхности, однако для данного сопоставления требуется расчет картины дихроизма для данной конкретной энергии фотонов,

- на изображениях с морфологией поверхности автор хоть и указывает общий масштаб по высоте, но для оценки высоты ступенек или иных структур на изображении не хватает цветовой палитры или линейных профилей вдоль поверхности,

- текст диссертации недостаточно хорошо вычитан и отредактирован, в нем имеются опечатки, встречаются неудачные выражения и нерасшифрованные аббревиатуры.

Сделанные замечания носят частный характер и не затрагивают принципиальных положений и выводов диссертации, не снижают общей высокой оценки в целом.

Заключение

Диссертационное исследование Кавеева Андрея Камильевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития нового научного направления на стыке физики полупроводников, диэлектриков и магнетиков. Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 г. № 335; от 02.08.2016 г. № 748; от 01.10.2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор, Кавеев Андрей Камильевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11-«Физика полупроводников».

Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником лаборатории электронной и спиновой структуры наносистем Санкт-Петербургского государственного университета, кандидатом ф.-м.н. Рыбкиным Артемом Геннадиевичем.

Доклад Кавеева Андрея Камильевича, а также отзыв на диссертацию были заслушаны и обсуждены на семинаре кафедры электроники твёрдого

тела 18 октября 2022 года, протокол № 44/12/16-02-10.

Заведующий кафедрой электроники твёрдого тела физического факультета
СПбГУ, д.ф.-м.н., профессор _____ Барабан Александр Петрович

Ведущий научный сотрудник лаборатории электронной и спиновой
структуры наносистем СПбГУ, к.ф.-м.н. _____ Рыбкин Артем Геннадиевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет»

Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9.

Телефон (812) 328-97-01

E-mail: spbu@spbu.ru