

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Кавеева Андрея Камильевича «Синтез и структурно-стимулированные особенности эпитаксиальных гибридных магнитных наносистем», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников»

Актуальность темы исследования

Спин-зависимые явления в полупроводниковых наноструктурах активно исследуются на протяжении последних 30 лет. Мотивацией этих исследований являлось построение систем передачи, обработки и хранения информации, использующих в качестве базовой единицы спин электрона. Современный уровень развития исследований спин-зависимых явлений требует разработки новых приборных элементов и использования новых материалов, обеспечивающих улучшение характеристик по чувствительности, степени спиновой поляризации, величине логического перепада и др. Диссертационная работа Кавеева Андрея Камильевича посвящена синтезу и исследованию новых материалов для спинтроники, а также построению ряда приборных структур на их основе. В работе рассмотрено большое количество технологических и технических решений в области манипуляции спином. Таким образом, тематика научного исследования, безусловно является актуальной.

Структура диссертации

Рецензируемая диссертационная работа Кавеева А.К. состоит из введения, 7 глав и заключения.

Первая глава диссертации посвящена описанию оригинального способа раскрытия энергетической щели топологического изолятора BiSbTeSe_2 в области точки Дирака. Такой эффект впервые удалось экспериментально зарегистрировать за счет создания разбавленного магнитного приповерхностного слоя путем осаждения ферромагнитного металла Co или Mn на поверхность топологического изолятора, что сопровождается его структурным перестроением. Приведены результаты измерений структурных, оптических и магнитных свойств. Представлена модель, объясняющая данное раскрытие для системы Co-BiSbTeSe₂.

Во второй главе представлены исследования полученных впервые планарных эпитаксиальных слоев топологического изолятора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с переменным стехиометрическим составом на подложках Si(111). Приведены результаты измерений структурных и электрических свойств данных пленок при использовании промежуточного флюоритового подслоя и без него.

В третьей главе рассмотрены гибридные системы типа «структурно упорядоченный металлический ферромагнитный слой -топологический изолятор»: $\text{CoFeB/Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(111)$, $\text{CoFe(B)/Bi}_2\text{Te}_3(0001)$, а также $\text{CoFe/BiTeI}(0001)$. Исследования структурных и транспортных свойств позволили установить закономерности формирования ферромагнитным металлом монокристаллической структурно упорядоченной пленки или поликристаллической в зависимости от выбора топологического изолятора. В системе $\text{Co} - \text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ($x=0.31-0.34$) – CoFe(B) впервые был продемонстрирован эффект гигантского магнетосопротивления.

В четвертой главе диссертации описывается формирование топологических поверхностных состояний путем локальной структурной модификации поверхности рашбовского полупроводника $\text{BiTeI}(0001)$. Модификация стехиометрии и кристаллической структуры в приповерхностной области, которая приводит к возникновению топологических поверхностных состояний, производится путем отжига в вакууме. Представлена модель перестроения поверхностного слоя $\text{BiTeI}(0001)$ в тетрадимитоподобную фазу $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{I}$.

В пятой главе приводятся результаты по формированию и исследованию структурных и магнитных свойств гибридных эпитаксиальных систем на основе 3d-металлов и оксидов магния и железа. В частности, подробно изучена система CoFeB/MgO , описаны различия в кристаллических и магнитных свойствах пленок, полученных одно- и двухстадийными методами. Также в главе 5 показаны результаты исследования процессов эпитаксиального роста многослойных магнитных гетероструктур, состоящих из ферромагнитных 3d-металлов (Co, Fe и Ni). Продemonстрирована возможность перестроения кристаллической структуры поверхностного слоя оксидов железа вследствие окислительно-восстановительной реакции на границе раздела металл-оксид.

Шестая глава посвящена комплексному исследованию структурных и магнитных свойств эпитаксиальных пленок ферритов. Продemonстрирована возможность создания поликристаллических пленок феррита-граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{GaN}$, не содержащих посторонних паразитных структурных фаз. Установлены условия термического отжига, приводящего к формированию тонких пленок никелевой феррошпинели NiFe_2O_4 с магнитными характеристиками, близкими к свойствам в объемных кристаллах. Приведены результаты по измерению магнитной анизотропии и распространению спиновых волн в данных пленках. Впервые продемонстрировано получение эпитаксиальных мультиферромагнитных наноструктур на основе сочетания шпинелей $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$, а также системы $\text{NiFe}_2\text{O}_4 - \text{CoFeB} - \text{MgO}$.

В седьмой главе представлены результаты работы по гетероэпитаксиальной стабилизации метастабильных структурных модификаций MnF_2 и ZnF_2 на кремнии. Показана необходимость использования буферного слоя CaF_2 при эпитаксии фторидов,

исследованы условия стабилизации на различных ориентациях поверхности CaF_2 . Установлены типы возможных стабилизируемых фаз и проведены исследования их люминесцентных свойств.

В целом, результаты, представленные в работе, достаточно полно описаны и объяснены с использованием необходимого количества поясняющих графиков и схем.

Отмечу наиболее важные результаты, полученные в работе

1) Разработан и реализован оригинальный подход для формирования энергетической щели топологических изоляторов в области точки Дирака. Подход заключается в создании разбавленного магнитного приповерхностного слоя на структуре топологического изолятора BiSbTeSe_2 путем прецизионного осаждения субмонослойных количеств магнитных атомов кобальта или марганца при температурах 300 - 330°C. Механизм формирования щели заключается в создании магнитного порядка, который приводит к снятию топологической защищенности поверхностных состояний.

2) Впервые были получены структурно упорядоченные ферромагнитные пленки с ОЦК структурой на поверхностях топологического изолятора ($\text{CoFeB/Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(111)$, $\text{CoFe(B)/Bi}_2\text{Te}_3(0001)$, $\text{CoFe/BiTeI}(0001)$). Подобные материалы отличаются однодоменной структурой и совершенной границей раздела, что минимизирует рассеяние спин-поляризованных носителей заряда, инжектированных из ферромагнитного слоя.

3) Обнаружен эффект гигантского магнетосопротивления в структурах на основе слоёв топологического кристаллического изолятора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ с нанесенными эпитаксиальными магнитными контактами. Эффект зарегистрирован в геометрии локального расположения контактов, а также в нелокальной геометрии, при расположении ферромагнитных контактов на расстоянии 30 мкм и более. Значение 30 мкм, по-видимому, соответствует длине спиновой диффузии

4) Проведено совершенствование технологии лазерной молекулярно-пучковой эпитаксии для получения плёнок феррита-граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{GaN}$. Показано что оптимизация ростовых параметров позволяет получить качественные поликристаллические пленки $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, не содержащие паразитных структурных фаз. Формирование поликристаллического слоя $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на подложках GaN имеет потенциал для интеграции СВЧ-устройств на базе $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ с полупроводниковыми приборами.

5) Впервые продемонстрированы фотолюминесцентные свойства ромбической структуры MnF_2 и ZnF_2 . Выполнен анализ тонкой структуры спектров, обнаружено два вида излучательных центров в эпитаксиальных слоях MnF_2 и ZnF_2 , легированных самарием. Также стоит отметить найденный автором способ управления электропроводностью пленок ZnF_2 и CdF_2 за счёт легирования в процессе выращивания ионами Sm^{3+} и Er^{3+} .

Отмеченные выше результаты работы Кавеева А.К. являются новыми. Их новизна, научная и практическая ценность подтверждаются публикациями соискателя в рецензируемых научных журналах: опубликовано 39 печатных работ в изданиях, индексируемых в WoS, SCOPUS и РИНЦ (для примера: Phys. Rev. B, Phys. Rev. Mater., J. Cryst. Growth, J. Appl. Phys., Mater. Chem. Phys., JMMM, ФТП, ФТТ, Письма ЖТФ и др.). Достоверность результатов работы не вызывает сомнений, так как они получены с применением широкого комплекса дополняющих друг друга методов исследования.

Замечания к диссертационной работе

1) На рис.3.7 представлена магнитополевая зависимость магниторезистивной структуры, измеренная в геометрии нелокального спинового клапана. Как правило, при таких измерениях строят зависимость нелокального напряжения от магнитного поля. Хотя интуитивно понятно, каким образом считалось сопротивление, и что зависимости $U(H)$ и $R(H)$ подобны, в работе следовало бы уточнить эти вопросы.

2) В главе 6 сравнивается отжиг плёнок YIG на воздухе и в атмосфере кислорода. Отмечается, что дополнительный отжиг на воздухе необходим, в том числе, для заполнения кислородных вакансий, чего не достигается при отжиге в атмосфере кислорода. Подобный эффект представляется неочевидным, более того, как правило, отжиг на воздухе приводит к худшим результатам из-за присутствия в атмосферном воздухе неконтролируемых загрязнений и органики. Автору следовало бы более подробно рассмотреть вопросы улучшения качества структур при отжиге на воздухе и затруднительности достижения этого в атмосфере кислорода.

3) На рисунке 6.20 представлены магнитополевые зависимости Керровского угла. Как правило, при представлении магнитополевых зависимостей какого-либо параметра для ферромагнетика области насыщения намагниченности лежат в первом и третьем квадрантах. На рисунке 6.20 области насыщения лежат во втором и четвёртом квадранте. Безусловно, в ряде случаев зависимость определяется с точностью до знака. Однако неясно, рисунки в таком виде представлены ненамеренно, или в таком представлении есть определённый физический смысл.

4) В тексте работы встречаются опечатки, а также термины, не являющиеся общепринятыми. Например, «мобильность» вместо «подвижность», «диссипативностью», и др.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Кавеева А.К. Представленная работа выполнена на высоком научном и технологическом уровне, основные результаты и личный вклад автора достаточно полно и правильно отражены как в самой диссертации, так и в автореферате.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в реферируемых российских и иностранных журналах, а также в материалах конференций. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, в том числе критериям II раздела Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, а автор диссертационной работы Кавеев Андрей Камилевич заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

28.12.2022

Дорохин Михаил Владимирович,
д.ф.-м.н. по спец. 01.04.10 (1.3.11) Физика полупроводников
зав.лаб. Научно-исследовательский физико-технический институт
Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования "Национальный
исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского""

_____ М.В. Дорохин

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина 23, корп.3
тел. 8(831)4623120
e-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

Подпись М.В. Дорохина заверяю

Учёный секретарь Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

к.с.н.

_____ Л.Ю. Черноморская