

на правах рукописи

КАВЕЕВ Андрей Камильевич

**СИНТЕЗ И СТРУКТУРНО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ  
ОСОБЕННОСТИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ  
МАГНИТНЫХ НАНОСИСТЕМ**

**1.3.11 Физика полупроводников**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

**Официальные оппоненты:**

Мухин Иван Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Возобновляемых источников энергии, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН

Журихина Валентина Владимировна, доктор физико-математических наук, профессор, доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований, Физико-механический институт, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Дорохин Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физического материаловедения, заведующий лабораторией Спиновой и оптической электроники, Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского

**Ведущая организация:** Санкт-Петербургский государственный университет

Защита состоится “19” января 2023 г. в “ \_\_\_\_\_ ”

на заседании диссертационного совета 34.01.02 ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу:  
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ им. А. Ф. Иоффе  
<http://www.ioffe.ru>

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, Сорокин Лев Михайлович

д.ф.-м.н.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы и степень ее разработанности

Диссертационная работа объединяет ряд исследований по нескольким направлениям в области спинтроники: металлических структур, полупроводниковой и диэлектрической. Работа имеет преимущественно экспериментальный характер. Основной объединяющей идеей работы является синтез и изучение свойств новых комбинаций материалов, обладающих полупроводниковыми и топологическими свойствами. В частности, в диссертации решена задача, связанная с демонстрацией возможности модификации поверхностного слоя материалов с сильным спин-орбитальным взаимодействием, позволяющей управлять топологическими свойствами материалов этого класса. Проведены исследования структурных особенностей ряда новых систем и изучено влияние этих особенностей на физические свойства этих систем.

В части полупроводниковой спинтроники в работе проведены исследования гибридных систем ферромагнитный металл (ФМ) – топологический изолятор (ТИ). Взаимное влияние топологических поверхностных состояний (ТПС) и намагниченности ФМ, нанесенного на поверхность ТИ, является перспективным в области разработки спинтронных устройств на основе магниторезистивных систем, спиновых полевых транзисторов (SpinFET) и спиновых батарей [1,2]. Материалом для канала в спиновом транзисторе может быть соединение  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , представляющее собой узкозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны, зависящей от состава [3]. Спиновый транспорт в данном материале ранее не исследовался. Также практический интерес представляет получение качественного интерфейса ФМ/ТИ, обеспечивающего эффективную инжекцию и экстракцию спин-поляризованных носителей с малой диссипативностью. Получение структурно упорядоченных ФМ пленок на поверхности ТИ важно в области применения спин-орбитального торк-эффекта в системах с переключением намагниченности спин-поляризованным током, протекающим через интерфейс. Нарушение симметрии обращения времени ТПС за счет ферромагнетизма приводит к

образованию энергетической щели в дираковском спектре ТПС. Возникновение данной щели является необходимым условием для реализации квантового аномального эффекта Холла (КАЭХ), который проявляется в существовании бездиссипативных киральных краевых состояний в отсутствие внешнего магнитного поля, и в настоящее время вызывает существенный интерес. Другими примерами являются топологический магнитоэлектрический эффект и киральные майорановские моды в ТИ [4,5].

Для введения магнитного обменного взаимодействия в ТИ возможна реализация нескольких подходов. Помимо роста собственных магнитных ТИ на базе гетероструктур  $\text{MnBi}_2\text{Se}_4/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , [6,7,8],  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4/\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Mn}_4\text{Bi}_2\text{Te}_7/\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [9], и ряда других подобных структур [10], это может быть достигнуто путем объемного легирования атомами магнитных примесей [11]. Поверхностное осаждение ФМ атомов Fe и Co с целью раскрытия энергетической щели до настоящего времени не было успешным. Вместе с тем возможность расширения класса материалов на основе ТИ с модифицированной поверхностной областью, приводящей к раскрытию энергетической щели весьма привлекательно.

Помимо магнитно-полупроводниковых систем на базе ФМ-ТИ, в диссертации также исследовались и другие магнитно-диэлектрические системы. С точки зрения приложения в спинтронике интерес представляют мультикомпонентные магнитные сплавы из-за высокой степени спиновой поляризации [12]. Эти сплавы перспективны для применения в магнитно-диэлектрических запоминающих устройствах, таких, как MRAM на основе магнитно-туннельного перехода (МТП) [13], позволяющих хранить информацию с высокой плотностью и стабильностью. Другим применением данных сплавов могут являться устройства со спиновой инжекцией [14,15]. В частности, материал CoFeB привлекателен для приложений спинтроники из-за его использования в МТП CoFeB/MgO/CoFeB с наибольшим известным значением туннельного магнитосопротивления (ТМС) [16]. При этом для увеличения ТМС необходимо хорошее кристаллическое качество диэлектрической прослойки [17]. Данный материал также привлекателен достаточно низким затуха-

нием спиновых волн [18], возможностью управления ориентацией намагниченности внешним электрическим полем, либо с помощью деформации слоев, вызванной подложкой [19,20], а также наличием эффектов близости (обменное смещение, наведение атипичного магнитного упорядочения, и др.) в системах ФМ-ФМ и ФМ-антиферромагнетик [21,22].

Трехслойные эпитаксиальные магнитные наносистемы представляют интерес с точки зрения изучения эффектов близости в магнитоупорядоченных мультислоях с разной коэрцитивной силой. Магнитные эффекты близости можно наблюдать не только в многослойных магнитных структурах, в которых разрешен обмен спин-поляризованными электронами, но и в гетероструктурах, образованных одновременно и магнитными металлическими и диэлектрическими слоями. Интерес к таким системам подкрепляется их потенциальным применением в сфере разработки искусственных материалов для устройств магнитной памяти. В связи с этим актуальным является изучение особенностей интерфейса в подобных магнитных системах, в частности – образование прослоек в силу химических реакций на интерфейсе [23], поскольку это может оказывать влияние на общие магнитные свойства системы.

В настоящее время актуальной является задача создания новых методов передачи и обработки информации. Для ее решения, в частности, рассматривается вопрос о привлечении явлений спинтроники и магноники, основанной на использовании не просто спиновых токов, а пакетов спиновых волн [24]. В релаксацию спиновых волн значительный вклад дают неоднородности магнитной структуры, связанные с кристаллическим качеством пленок. При успешном решении данной проблемы возможно создание наноразмерных приборов на спиновых волнах (высокочастотных перестраиваемых фильтров и линий задержек) СВЧ диапазона, а также радиационно-устойчивых монолитных СВЧ-интегральных схем для применения в космической отрасли, в области радиолокации, и в радиационно-опасных направлениях деятельности. Создание приборов СВЧ-диапазона с быстроуправляемыми параметрами, величины которых зависят от направления микроволнового магнитного поля, невозможно без применения диэлектриков-ферритов. В качестве активных элементов,

обладающих необходимыми магнитными свойствами, могут быть использованы эпитаксиальные моно- и поликристаллические структуры на основе ферритов-гранатов и ферритов-шпинелей [25,26]. Таким образом, работы, посвященные улучшению динамических свойств тонких пленок шпинелей, особенно при уменьшении толщины пленок, становятся всё более актуальными.

В области диэлектрической спинтроники актуальны исследования структурных фазовых переходов в магнитных и диэлектрических эпитаксиальных структурах, в частности, на основе фторидов. Мотивацией исследования является потенциальная возможность дальнейшего применения сочетания фторидов и металлов в качестве основы для ферромагнитных контактов, обменно-смещенных мультимагнитных и туннельных гетероструктур, а также оптических люминесцентных материалов. С помощью гетероэпитаксиального нанесения тонких пленок возможно формирование в этих пленках кристаллических структур, метастабильных в объемных кристаллах. В тонких пленках эта структура может быть стабилизирована в нормальных условиях. В объемных кристаллах  $MnF_2$  и  $ZnF_2$  наблюдается полиморфизм при повышенных давлениях и температурах [27,28]. Результаты исследований эпитаксиальных слоев фторидов представлены в большом количестве работ и обзоров [29]. Распространение спиновых волн и исследование экситонов в  $MnF_2$  также описано в ряде работ [30]. Привлекательным свойством  $ZnF_2$  является эффективная примесная люминесценция от ИК до УФ области [31].

Исходя из вышеперечисленных пунктов, тема диссертации имеет высокую актуальность.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

1. Исследование условий, благоприятствующих раскрытию энергетической щели в спектре дираковских поверхностных состояний в системе ФМ- $BiSbTeSe_2$  с целью возможного возникновения КАЭХ.

Мотивация: Получение новых систем с КАЭХ, в том числе высокотемпературным.

2. Улучшение кристаллического качества интерфейсов систем ФМ-ТИ за счет создания монокристаллических эпитаксиальных слоев ферромагнитных металлов.

Мотивация: уменьшение рассеяния спин-поляризованных токов на интерфейсе при токопереносе в ФМ с целью управления намагниченностью с помощью спин-орбитального торк-эффекта.

3. Создание и исследование структурных, электрических и электронных свойств тонких пленок кристаллического ТИ  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ .

Мотивация: подавление шунтирования проводимости ТПС объемной проводимостью ТИ.

4. Исследование возможности формирования ТПС на поверхности  $BiTeI(0001)$ .

Мотивация: создание новых ТИ.

5. Изучение структуры интерфейса, улучшение кристаллического качества и исследование структурных и магнитных свойств систем на основе ферромагнитных металлов и оксидов железа и магния для будущего применения в МТП и в гетероструктурах с эффектами близости.

Мотивация: получение новых гетероструктур с магнитными эффектами близости, улучшение качества интерфейсов.

6. Улучшение кристаллического качества и исследование структурных и магнитных свойств эпитаксиальных слоев ферритов-шпинелей на диэлектрических подложках на основе системы  $NiFe_2O_4/SrTiO_3$  и других шпинелей, создание слоев ферритов-гранатов на полупроводниковых подложках на основе системы  $Y_3Fe_5O_{12}-GaN$  с целью будущей интеграции в монолитных интегральных схемах (МИС).

Мотивация: создание интегрированных МИС-структур на основе СВЧ-материалов и полупроводников, улучшение электрофизических и спин-транспортных свойств компонент.

7. Изучение метастабильных структурных фаз в эпитаксиальных слоях фторидов и металлов на кремнии на основе  $MnF_2$ ,  $ZnF_2$  и  $Co$ .

Мотивация: получение и исследование физических свойств новых магнитных и полупроводниковых материалов.

## Основные положения, выносимые на защиту

1) Эпитаксиальное осаждение магнитных атомов Co и Mn на поверхность (0001) топологического изолятора BiSbTeSe<sub>2</sub> в температурном интервале 300-330°C и в количествах около 1 атома на поверхностную элементарную ячейку приводит к замещению атомов пниктогенов в поверхностном слое и образованию двумерной магнитной фазы, приводящей к раскрытию энергетической щели в области точки Дирака. Повышение количества осаждаемого Co приводит к формированию маттагамитоподобной кристаллической фазы CoTe<sub>x</sub>Se<sub>2-x</sub>, что является следствием упорядоченного встраивания примеси.

2) При эпитаксиальном росте на поверхности Si(111) кристаллический топологический изолятор Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te образует структурно упорядоченные слои. В случае использования комбинированного буферного слоя BaF<sub>2</sub>/CaF<sub>2</sub> создана технология формирования гомоэпитаксиальных слоев Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te переменного стехиометрического состава и высокой степени планарности (до 5мкм×5мкм×4нм). Изменение стехиометрического параметра x в процессе роста от x<0.25-0.3 в основном объеме до x>0.3 в приповерхностной области позволяет получить гетероструктуры с пониженной объемной проводимостью при низких температурах (менее 30 К) и наличием поверхностного состояния дираковского типа.

3) На поверхности топологических изоляторов Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te(111), Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>(0001) и соединения BiTeI(0001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии формируются структурно упорядоченные ориентированные ферромагнитные пленки Co, CoFe и CoFeV. В структурно упорядоченных мультиконтактных наноструктурах Co – CoFeV – Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te возникает выраженный эффект гигантского магнитосопротивления при расстоянии между контактами более 30 мкм.

4) При отжиге в вакууме при температурах 230-350°C полупроводника BiTeI(0001) со спиновым расщеплением Рашбы, происходит структурная модификация приповерхностного слоя. Изменение приповерхностного стехиометрического состава и кристаллической структуры приводит к появлению поверхностных топологических состояний.

5) Одностадийный (безотжиговый) эпитаксиальный рост CoFeV на поверхностях (001) и (111) MgO при температуре 500°C приводит к формированию структурно упорядоченных ориентированных пленок. На поверхности MgO(001) пленки имеют магнитно-кристаллическую анизотропию четвертого порядка в плоскости роста. При эпитаксиальном росте 3d-металлов и CoFeV на оксидах железа происходит химическая реакция восстановления железа на интерфейсе до состояния Fe<sup>2+</sup> с трансформацией приповерхностного слоя в упорядоченную структуру монооксида MeO (Me= Co, Fe, Ni).

6) Найдены условия получения методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии пленок феррита-граната Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>/GaN и феррошпинели NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/SrTiO<sub>3</sub>. При термическом отжиге зародышевого слоя, нанесенного при температуре не более 200°C, и дальнейшем высокотемпературном нанесении материала формируются поликристаллические слои Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>/GaN без примеси посторонних фаз. Двухстадийный отжиг при температурах около 1000°C в атмосфере кислорода, а затем на воздухе позволяет получить на подложках SrTiO<sub>3</sub>(001) эпитаксиальные пленки NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, имеющие структуру инвертированной шпинели и узкую линию ферромагнитного резонанса, и делает эти пленки близкими по магнитным свойствам к объемным кристаллам NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. На подложках SrTiO<sub>3</sub> и MgO возможно формирование упорядоченных мультиферромагнитных наноструктур на основе пары NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, и системы NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> – CoFeV – MgO.

7) При эпитаксиальном росте на Si с использованием буферного слоя CaF<sub>2</sub> формируются метастабильные кристаллические модификации MnF<sub>2</sub> и ZnF<sub>2</sub>. При этом формируется ромбическая фаза со структурой типа α-PbO<sub>2</sub>, имеющая в случае MnF<sub>2</sub> антиферромагнитную природу. При легировании редкоземельными ионами Sm<sup>3+</sup> образуются специфические для данной фазы центры люминесценции. На поверхности CaF<sub>2</sub>(111) в трёх первых монослоях стабилизирована флюоритоподобная модификация MnF<sub>2</sub>. Кобальт на CaF<sub>2</sub>/Si кристаллизуется в метастабильной гранецентрированной кубической структуре.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- 1) Впервые выявлено раскрытие энергетической щели в области точки Дирака за счет создания разбавленного поверхностного ферромагнитного слоя при осаждении ферромагнитного металла на поверхность топологического изолятора с сопутствующим его структурным перестроением, и предложена модель, объясняющая данное раскрытие в системе  $\text{Co-BiSbTeSe}_2$ .
- 2) Впервые получены и изучены структурно упорядоченные ферромагнитные пленки на поверхности ТИ.
- 3) Впервые получены и изучены высококачественные планарные эпитаксиальные слои  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  на  $\text{Si}(111)$ . При создании гомоэпитаксиальной наноструктуры на основе слоев  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  с разной степенью проводимости выявлено поверхностное состояние дираковского типа.
- 4) Впервые обнаружен эффект гигантского магнитосопротивления в системе ФМ-ТИ на базе кобальт-содержащих ферромагнитных контактов и кристаллического топологического изолятора  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ .
- 5) Впервые выявлен структурный фазовый переход при отжиге в вакууме в поверхностном слое полупроводникового монокристалла  $\text{BiTeI}(0001)$  с рашбовским расщеплением, приводящий к возникновению топологических ПС. Полученный результат представляет собой новый способ модификации топологических свойств в электронной структуре слоистых материалов за счет локальных структурных изменений.
- 6) Впервые получены монокристаллические эпитаксиальные пленки в системах 3d-металл – диэлектрик на основе  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{MgO}$  и оксидов железа, пригодной для создания МТП или магнитных систем с эффектом близости, выявлена магнитная анизотропия 4-го порядка. Предложена модель, описывающая структурное перестроение интерфейса за счет восстановления железа при осаждении ферромагнитного металла на оксид железа.
- 7) Впервые методом лазерной МЛЭ получены тонкие эпитаксиальные пленки инвертированной шпинели  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  на простых и коммерчески доступных подложках  $\text{SrTiO}_3(001)$ , имеющие ширину линии ферромагнитного резонанса (ФМР) и намагниченность насыщения, сравнимую с

таковой в объемных кристаллах  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ . Установлена критическая важность влияния термического отжига на ширину линии ФМР, выявлено распространение спиновых волн с невысоким затуханием. Также впервые получены эпитаксиальные мультиферромагнитные наноструктуры на основе сочетания шпинелей  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , а также системы  $\text{NiFe}_2\text{O}_4 - \text{CoFeV} - \text{MgO}$ .

8) Впервые методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии (ЛМЛЭ) получены тонкие качественные поликристаллические пленки феррита-граната  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  без примеси паразитных структурных фаз на полупроводниковой подложке GaN и изучены их структурные и магнитные свойства.

9) Впервые показана возможность использования ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в качестве “зондовых” люминесцентных центров в тонких пленках  $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{SrTiO}_3(001)$ , полученных методом ЛМЛЭ.

10) Впервые выявлено наличие эффективной эпитаксиальной стабилизации метастабильных структурных фаз фторидов марганца и цинка, а также металлического кобальта при выращивании на кремнии с использованием буферного слоя  $\text{CaF}_2$ . Исследованы структурные, магнитные и люминесцентные свойства тонких пленок метастабильной фазы типа  $\alpha\text{-PbO}_2$ .

**Научная и практическая значимость исследований**, проведенных в диссертации, определяется важностью исследованных объектов для приложений спинтроники. Полученные результаты являются существенным шагом в разработке систем, имеющих как научную значимость, так и практическое применение:

- создание новых материалов на основе топологических изоляторов со встроенным магнитным порядком для наблюдения квантового аномального эффекта Холла
- улучшение транспортных свойств поверхностных состояний ТИ за счет разработки гетероструктур на базе новых ТИ, в том числе с топологической защищенностью за счет кристаллической симметрии
- создание новых приборов спинтроники на базе системы ФМ – ТИ

- улучшение характеристик МТП и переходов ФМ-ТИ для наблюдения торк-эффектов, в том числе за счет уменьшения рассеяния носителей заряда на интерфейсах
- создание СВЧ-приборов на основе ферритов-гранатов и шпинелей, в том числе в составе монокристаллических интегральных схем, имеющих улучшенные динамические магнитные свойства, в том числе низкое затухание спиновых волн
- разработка приборов спинтроники на основе новых ферро- и парамагнитных материалов с измененной кристаллической структурой.

Таким образом, в диссертации внесен вклад в проблему разработки новых объектов металлической, полупроводниковой и диэлектрической спинтроники на базе ТИ и кристаллических магнетиков. Изложены научно обоснованные решения, позволяющие создавать материалы с улучшенными характеристиками. Данными материалами являются системы на базе сочетаний ферромагнитный металл – ТИ, ферромагнитный металл – оксид или фторид (магнитный или немагнитный). Синтез и изучение новых комбинаций материалов, обладающих полупроводниковыми и топологическими свойствами, вносит существенный вклад в развитие научного направления на стыке физики полупроводников, диэлектриков и магнетиков. Решена задача модификации поверхностного слоя материалов с сильным спин-орбитальным взаимодействием (СОВ), что позволяет управлять их топологическими свойствами. Практическое внедрение предложенных решений, а также новых материалов для приложений спинтроники позволит внести вклад в научно-технологическое развитие страны.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием адекватных современных научных методик, в том числе в различных их сочетаниях (например, РДА, ДМЭ и ДБЭ, или например, ВМ, СКВИД и МОЭК), неоднократной перепроверкой полученных результатов на различных образцах и в различное время. Результаты обсуждались на рабочих и лабораторных семинарах в различных, в т.ч. международ-

ных коллективах. По результатам диссертации опубликовано 39 печатных работ в изданиях, индексированных в WoS, SCOPUS и РИНЦ. Подана заявка на патент. Результаты диссертационной работы докладывались более чем на 50 национальных и международных научных конференциях, в частности, некоторые из них за последние 5 лет:

1) Кавеев А. К., Терещенко О.Е., Оптимизация буферного диэлектрического слоя для создания малодефектных эпитаксиальных пленок топологического изолятора  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  с  $x \geq 0.4$ , XXVI Международный симпозиум Нанопизика и Наноэлектроника, 14-17 марта 2022 г, Нижний Новгород

2) А.К. Кавеев, Д.Н. Бондаренко, О.Е. Терещенко, Структурные свойства тонких пленок кристаллического топологического изолятора  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$  на кремнии, XXV Международный симпозиум Нанопизика и Наноэлектроника, 9-12 марта 2021 г, Нижний Новгород

3) S.P. Feofilov, A.B. Kulinkin, A.K. Kaveev, A.M. Korovin, N.S. Sokolov, S.M. Suturin, Luminescence of Impurity Ions in Laser Molecular Beam Epitaxy-Grown Oxide Films, ICL-2020, August 10-14, 2020, Changchun, China

4) А. К. Кавеев, В. А. Голяшов, О. Е. Терещенко, Д. А. Естюнин, E. F. Schwier, Раскрытие энергетической щели в области точки Дирака при осаждении кобальта на поверхность (0001) топологического изолятора  $BiSbTeSe_2$ , XXIV Международный симпозиум Нанопизика и Наноэлектроника, 10-13 марта 2020 г, Нижний Новгород

5) Кавеев А.К., Голяшов В.А., Терещенко О.Е., Естюнин Д.А., Еремеев С.В., Трансформация конуса дирака при нанесении металлического кобальта на топологический изолятор  $BiSbTeSe_2$ , Международная конференция Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии, 5-9 октября 2020 г, Томск

6) Кавеев А. К., Терпицкий А.Н., Терещенко О.Е., Голяшов В.А., Естюнин Д.А., Шикин А.М., Schwier E.F., Изменение дираковского конуса поверхностных топологических состояний при нанесении ферромагнетика

тиков на  $\text{BiSbTeSe}_2$ , Международная конференция Физика, 19-23 октября, 2020 г, Санкт-Петербург

7) О.Е. Терещенко, В.А. Голяшов, А.К. Кавеев, А.Э. Климов, А.Н. Акимов, А.С. Тарасов, Д.В. Ищенко, С.П. Супрун, И.О. Ахундов, Спиновая поляризация и спин-зависимый транспорт в кристаллическом топологическом изоляторе  $\text{PbSnTe}$ . XIV Russian conference on semiconductor physics, Novosibirsk, September, 2019

8) V.E. Bursian, A.K. Kaveev, A.M. Korovin, B.B. Krichevstov, L.V. Lutsev, N.S. Sokolov, S.M. Suturin, M. Sawada, Laser MBE growth and studies of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  epitaxial films with close-to-bulk dynamic magnetic properties, International Conference Physica, St.-Petersburg, Russia, Oct. 2019

9) V.A. Golyashov, A.K. Kaveev, A.E. Klimov, A.N. Akimov, A.S. Tarasov, D.V. Ishchenko, C. Tusche, S.V. Ereemeev, and O.E. Tereshchenko,  $\text{PbSnTe}$  (111): Spin Polarized States and Spin-Valve Effect, International conference New trends in topological insulators, Hiroshima, Japan, July 14-19, 2019

10) Kaveev, V. Bursian, A. Korovin, L. Lutsev, N. Sokolov and S. Suturin, "Spin wave relaxation in YIG nanofilms on  $\text{MgO}/\text{GaN}(0001)$ ", Proc. Int. Symp. Of Spin Waves-2018, SPb, June 3-8, p124

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка цитируемой литературы из 277 наименований, и 142 рисунков. Общий объем диссертации – 302 страницы.

### **Личный вклад**

Во всех выполненных в соавторстве работах автор диссертации выполнил постановку основных задач и внес основной вклад в анализ полученных данных. В частности, диссертанту принадлежит идея описанного в Гл. 1 объяснения раскрытия энергетической щели в области точки Дирака в системе  $\text{Co-BiSbTeSe}_2$  за счет встраивания атомов  $\text{Co}$  с последующим упорядоченным переходом в эпитаксиальную маттагамитоподобную фазу. Все образцы, измеренные в рамках работы, получены диссер-

тантом лично. Диссертант лично проводил подбор, коррекцию и оптимизацию технологических режимов роста наногетероструктур, в частности, режимов получения тонких пленок  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  с рекордными магнитными параметрами. Диссертант лично проводил измерения методами фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР), рентгеновского магнитно-циркулярного дихроизма (РМЦД) и поглощения (ХАС), дифракции быстрых электронов (ДБЭ), рентгеновской дифракции (РДА), атомно-силовой микроскопии (АСМ). Диссертант лично проводил моделирование картин ДБЭ методом 3D-картографирования, моделирование сигналов РМЦД и расчет магнитных моментов, участвовал в постановке задачи и обсуждении результатов моделирования зонной структуры DFT-методом. Диссертантом сделаны основные выводы по всей диссертационной работе.

## **Основное содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, кратко изложено содержание глав. К каждой главе сделаны промежуточные выводы.

В **Главе 1** описан оригинальный способ раскрытия энергетической щели в области точки Дирака [1a-3a] ТИ  $\text{BiSbTeSe}_2$  за счет создания разбавленного магнитного приповерхностного слоя путем осаждения ферромагнитного металла Co или Mn. В **разделе 1.1** рассмотрены спектры ФЭСУР (рисунок 1), демонстрирующие раскрытие энергетической щели при встраивании Co, а в **разделе 1.2** – при встраивании Mn. Встраивания удалось добиться путем точного осаждения субмонослойных количеств магнитных атомов кобальта или марганца в узком температурном диапазоне 300 - 330°C. В **разделе 1.3** описаны результаты исследований кристаллической структуры модифицированного приповерхностного слоя  $\text{BiSbTeSe}_2$  при эпитаксиальном осаждении Co. Показано [4a], что наряду с формированием разбавленного магнитного поверхностного слоя, образуются трехмерные островки, имеющие маттагамитоподобную кристаллическую структуру парамагнитного соединения  $\text{CoTe}_x\text{Se}_{2-x}$ , зарождающуюся при упорядоченном встраивании Co.

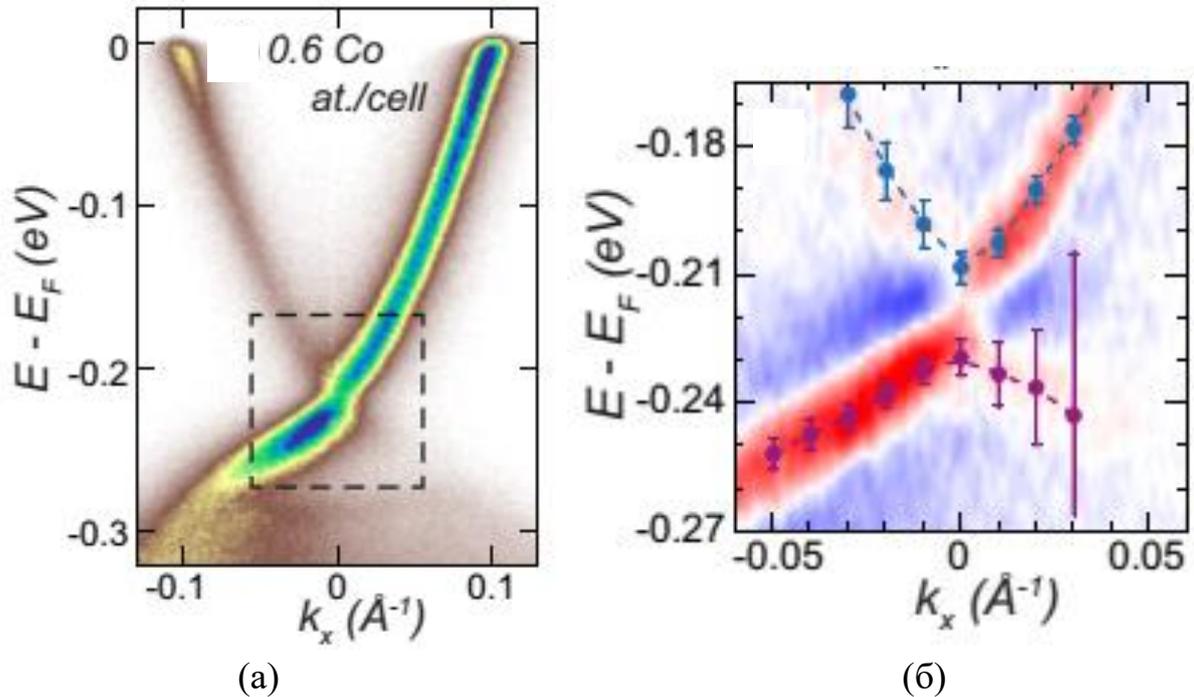


Рис.1. (а) - Раскрытие энергетической щели в точке Дирака в результате осаждения 0.6 атомов Со на поверхностную элементарную ячейку  $\text{BiSbTeSe}_2$  при температуре  $300^\circ\text{C}$ . (б) - вторая производная  $d^2I/dE^2$  области спектра ФЭСУР ТПС вблизи точки Дирака. Точками обозначены профили распределения интенсивности для различных значений  $k_x$ . Подгонка данных производилась с использованием двух профилей Фойгта для нижнего и верхнего состояний конуса Дирака.

**Раздел 1.4** содержит результаты моделирования поверхностной зонной структуры ТИ, легированных кобальтом. Обсуждается связь полученных экспериментальных и расчетных результатов. Моделирование зонной структуры в рамках теории функционала плотности (DFT) позволило предложить модель, объясняющую раскрытие энергетической щели: осаждение атомов Со в количествах 0.6 - 3 атомов на поверхностную элементарную ячейку  $\text{BiSbTeSe}_2$  при повышенной температуре приводит к встраиванию атомов пниктогенов во второй слой приповерхностного пятислойника  $\text{BiSbTeSe}_2$ . При этом магнитные моменты атомов Со оказываются развернуты вне плоскости. Это, в свою очередь, приводит к формированию двумерной магнитной фазы с ненулевой проекцией намагниченности вне плоскости, устойчивой до  $\approx 100$  К. Полученный таким образом модифицированный Со-содержащий подслой содержит упорядоченные двумерные ячейки Со, служащие основанием для матта-

гамитоподобной фазы. Напротив, осаждение магнитных атомов при комнатной температуре приводит к прогрессирующему разупорядочению поверхности, что подтверждается деградацией картин дифракции медленных электронов (ДМЭ) и спектров ФЭСУР.

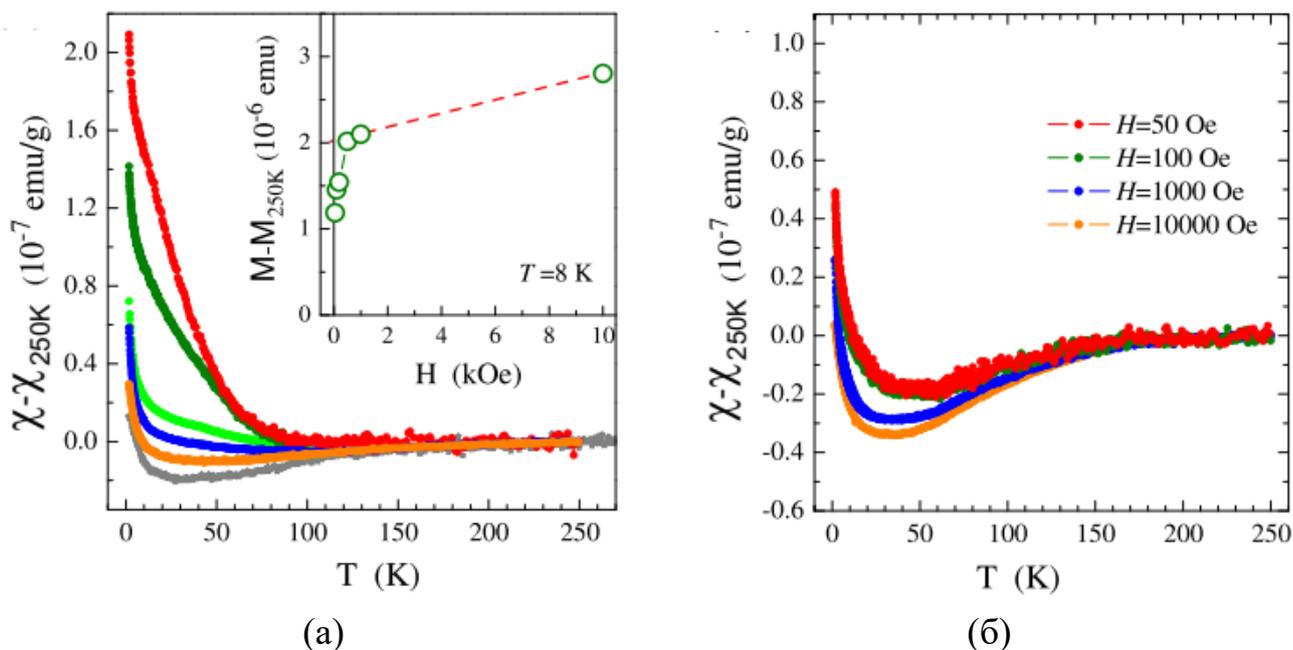


Рис. 2. (а) – зависимости  $\chi(T)$  для магнитного поля в плоскости образца,  $H=0.05, 0.1, 0.5, 1$  и  $10$  кЭ (сверху вниз, соотв.), а также не зависящая от прикладываемого поля зависимость  $\chi(T)$  для чистого  $\text{BiSbTeSe}_2$  (нижняя кривая). На вставке – зависимость  $M(H)$ , измеренная при  $8$  К. (б) - зависимости  $\chi(T)$  для магнитного поля, перпендикулярного плоскости образца (надписи соответствуют очередности кривых сверху вниз).

В разделе 1.5 описана экспериментальная проверка предложенной модели, связанная с измерениями температурной зависимости  $\chi(T)$  магнитной восприимчивости кобальт-содержащих образцов. Выраженная зависимость восприимчивости от величины магнитного поля, приложенного как в плоскости образца, так и перпендикулярно плоскости (рисунок 2), свидетельствует о наличии компоненты намагниченности вне плоскости. Ключевым фактором раскрытия щели магнитной или частично магнитной природы является необходимость встраивания и возможного упорядоченного расположения магнитных атомов для создания магнитного порядка, что может привести к развороту магнитных моментов вне

плоскости. Полученный результат резко контрастирует с результатами предыдущих работ по осаждению атомов магнитных металлов (Co, Ni, Fe) на поверхность изоструктурного  $\text{BiSbTeSe}_2$  бинарного топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  [32,33,34,35,36], где температура осаждения находилась в диапазоне от 15 К до комнатной, и раскрытия щели не наблюдалось.

В **Главе 2** описываются результаты, полученные в процессе экспериментов по эпитаксиальному росту пленок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  на подложках Si(111). В **разделе 2.1** продемонстрирована возможность эпитаксиального выращивания упорядоченных тонких пленок  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  методом МЛЭ на поверхности Si(111) без использования промежуточного буферного слоя [6а,7а]. Показано, что в случае роста в диапазоне температур 150-400°C возможен эпитаксиальный рост пленок с разворотом кристаллической ячейки и ориентацией ростовой поверхности (001). Показано, что в зависимости от температуры роста можно управлять не только характером морфологии поверхности данных пленок, но и их планарностью: с ростом температуры растет латеральный размер террас. Определены эпитаксиальные соотношения.

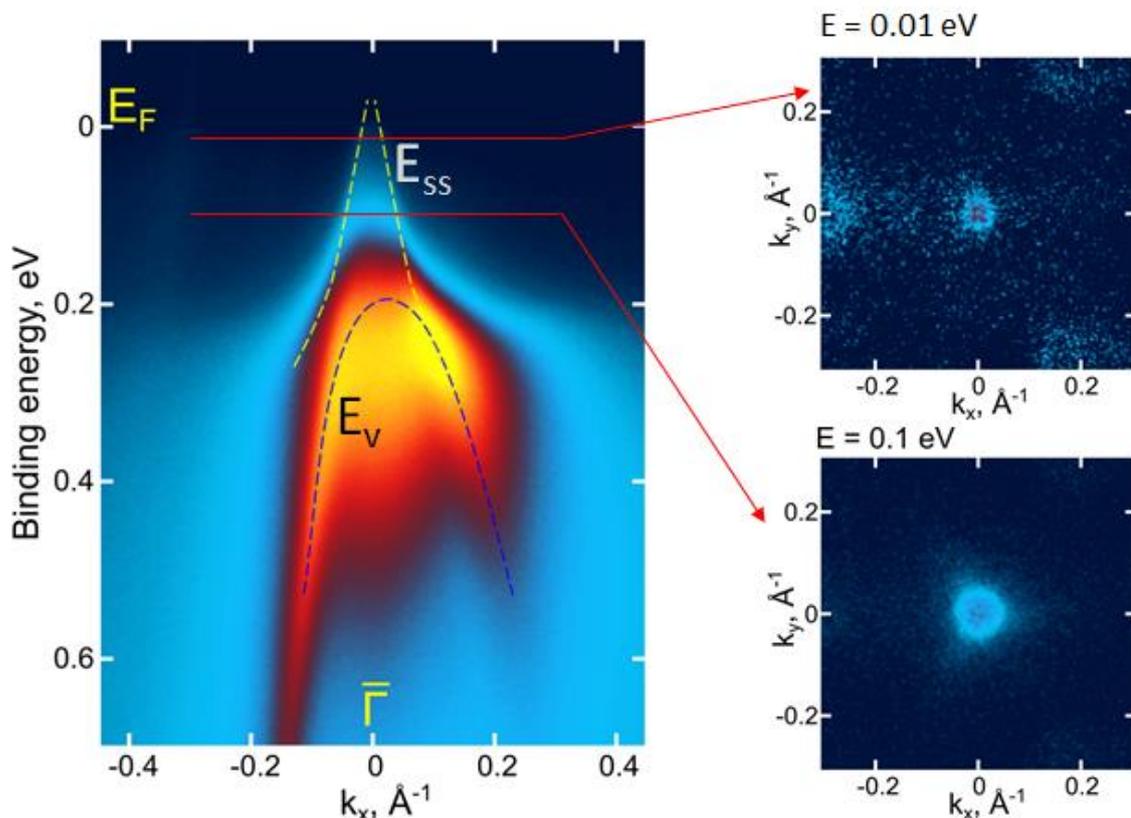


Рис. 3. Электронная структура  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $x = 0.35$ ) вблизи уровня Ферми.

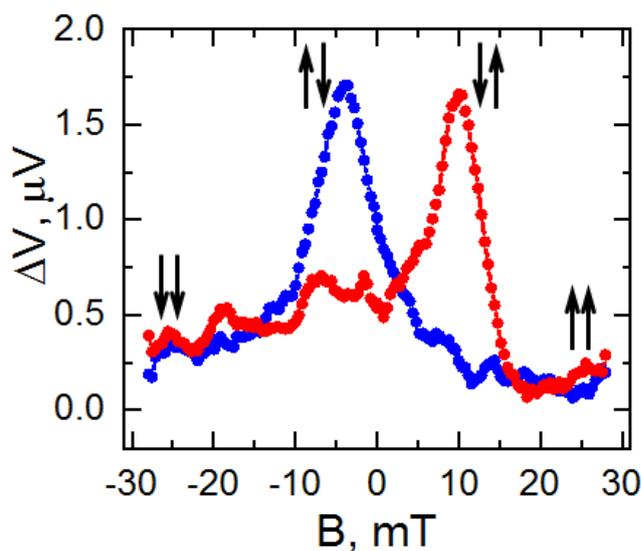
В разделе 2.2 описано формирование пленок  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  на бинарном буферном слое  $BaF_2/CaF_2$ . Подобраны и оптимизированы ростовые параметры [5a] трехслойной эпитаксиальной гетероструктуры на основе  $Pb_{1-x}Sn_xTe:In/BaF_2/CaF_2/Si(111)$ . Показано, что наилучший результат достигается при росте обоих флюоритовых подслоев при  $T=250^\circ C$ . Демонстрирована возможность планарного малодефектного роста третьего подслоя -  $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$  ( $x=0.2-0.3$ ), необходимого для дальнейшего гомоэпитаксиального роста  $Pb_{1-y}Sn_yTe$  с повышенным значением параметра  $y>0.3-0.4$  с целью получения ТПС. Показано, что возможно повышение удельного сопротивления третьего подслоя с понижением температуры при  $x<0.3$ .

В разделе 2.3 описано получение пленок  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  с высокой степенью планарности с перепадом высот до 4 нм на площади более  $4 \times 4$  мкм, и синтез слоя  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  с переменным стехиометрическим составом для создания ТПС при низкой проводимости по объёму. Создана гомоэпитаксиальная структура  $Pb_{1-y}Sn_yTe:In/Pb_{1-x}Sn_xTe:In$  с повышенным содержанием олова ( $y \geq 0.3-0.4$ ) в верхнем слое. С помощью измерений ФЭСУР выявлено, что при гомоэпитаксиальном наращивании указанного обогащенного тонкого ( $\sim 10$  нм) слоя в полученной таким образом “четырехслойной” структуре  $Pb_{1-y}Sn_yTe:In/Pb_{1-x}Sn_xTe:In/BaF_2/CaF_2/Si(111)$  с улучшенными объемными диэлектрическими свойствами наблюдаются ПС с линейным законом дисперсии дираковского типа (рисунок 3).

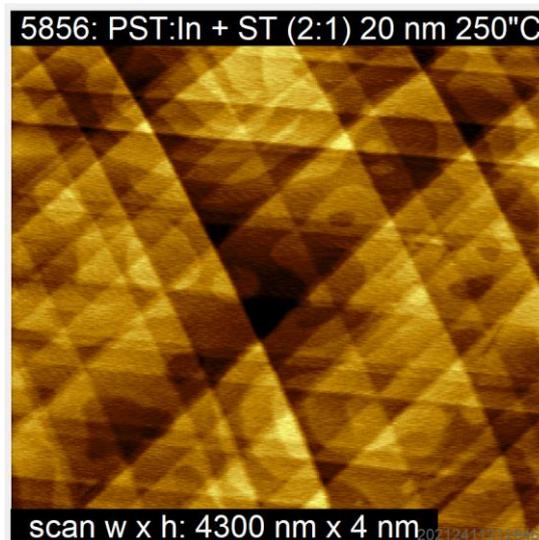
В Главе 3 приводятся результаты по эпитаксиальному росту структурно упорядоченных металлических ФМ слоев на поверхности ТИ.

В разделе 3.1 описано [8a] создание структурно упорядоченных пленок  $CoFeV$  на поверхности  $Pb_{1-x}Sn_xTe(111)$ , и определены эпитаксиальные соотношения с сохранением плоскости роста (111). В разделе 3.2 описано наблюдение (рисунок 4 (a)) как локального, так и нелокального эффекта гигантского магнитосопротивления (ГМС) в мультиконтактных наноструктурах на основе слоев кристаллического ТИ  $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$  для составов  $x=0.31-0.34$  с нанесенными эпитаксиальными магнитными контактами [9a]. Наиболее сильно эффект ГМС проявляется на паре контак-

тов Co-CoFeV и наблюдается в диапазоне температур как минимум до 30 К и в широком диапазоне межконтактных расстояний: величина эффекта  $\Delta R/R_{\text{par}}$  составляла 0.25% и уменьшалась лишь в 2 раза при разнесении контактов на расстояние до 100 мкм, что свидетельствует о длине спиновой диффузии, превышающей величину несколько десятков мкм. Поверхность слоев ТИ имеет высокую степень планарности (рисунок 4 (б)), указанную в разделе 2.3.



(а)



(б)

Рис. 4. (а) – эффект ГМС в нелокальной геометрии, (б) – морфология поверхности слоя  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  толщиной 10 нм, выращенного гомоэпитаксиально при температуре 250 °С на подслое толщиной 1 мкм.

В разделе 3.3 показана возможность создания структурно упорядоченных пленок ФМ металлов на различных ТИ [10а]. В зависимости от того, какой ТИ выбран в качестве подложки, металл может формировать как монокристаллическую структурно упорядоченную пленку, так и поликристаллическую. Выращены и исследованы структурно упорядоченные ФМ пленки на основе CoFeV/ $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ , CoFe(V)/ $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и CoFe/ $\text{BiTeI}$  [11а]. При выращивании при 250°С на подложках  $\text{BiTeI}(0001)$ , и в температурном диапазоне 200–400°С на подложках  $\text{Bi}_2\text{Te}_3(0001)$  и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(111)$  формируется эпитаксиальная пленка CoFe(V), имеющая ОЦК кристаллическую структуру. Во всех случаях определены эпитаксиальные соотношения. На подложках  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  были

получены поликристаллические пленки CoFeV с помощью предварительно сформированного высокотемпературного зародышевого слоя. Проведенные в **разделе 3.4** измерения магнитно-оптического эффекта Керра (МОЭК) [11a] показали гистерезисный характер поведения намагниченности, результаты измерений рентгеновской фотоэлектронной эмиссии (РФЭС) и поглощения выявили разницу в химических состояниях для случаев роста CoFeV на  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ : во втором случае CoFeV более устойчив к окислению в атмосфере. Измерения рентгеновского поглощения и РМЦД позволили рассчитать значения спиновых  $m_s$  и орбитальных  $m_{orb}$  магнитных моментов Co и Fe в выращенных пленках CoFeV. Наименьшее значение спинового момента Fe по сравнению со значением для объемного металлического Fe достигается в присутствии большего количества поверхностного окисла, т.е. в случае роста CoFeV/ $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , что соответствует данным РФЭС. Полученные результаты открывают дальнейшие перспективы для изучения и использования систем монокристаллический ферромагнетик - ТИ в области систем с управляемым спин-поляризованным током.

**Глава 4** содержит описание локального структурного фазового перехода в поверхностном слое полупроводникового рашбовского монокристалла  $\text{BiTeI}(0001)$  с сильным СОВ путем отжига в вакууме [12a]. В **разделе 4.1** описано перестроение кристаллической структуры поверхностного слоя  $\text{BiTeI}$  при отжиге. Вызванная отжигом модификация стехиометрии и структуры сопровождается переходом от нецентросимметричного  $\text{BiTeI}$  к структуре, подобной тетрадимиту  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . В **разделе 4.2** описано изменение стехиометрического состава поверхностного слоя  $\text{BiTeI}$  при отжиге: наблюдается уменьшение количества йода. В **разделе 4.3** описано изменение зонной структуры поверхностного слоя  $\text{BiTeI}$  при отжиге. Изменение кристаллической структуры существенно изменяет поверхностную зонную структуру и модифицирует ее топологию: структурный переход приводит к формированию ТПС (рисунок 5).

Расчеты в рамках DFT в сочетании с результатами измерений РФЭС, позволили сделать вывод о наиболее вероятном формировании структуры типа  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{I}$ . Приведены доказательства существования дан-

ного перехода на основе измерений ДБЭ, ФЭСУР, СТМ и моделирования поверхностной зонной структуры. Полученный результат в целом указывает на возможность модификации топологических свойств и спинового расщепления типа Рашбы в электронной структуре слоистых материалов путем локальных структурных изменений, в частности, управления последовательностью укладки атомов и атомных слоев. Результат может быть в дальнейшем применен и к другим системам с сильным СОВ. Полученные результаты позволяют рассчитывать на наблюдение спин-зависимых транспортных эффектов в таких системах [37].

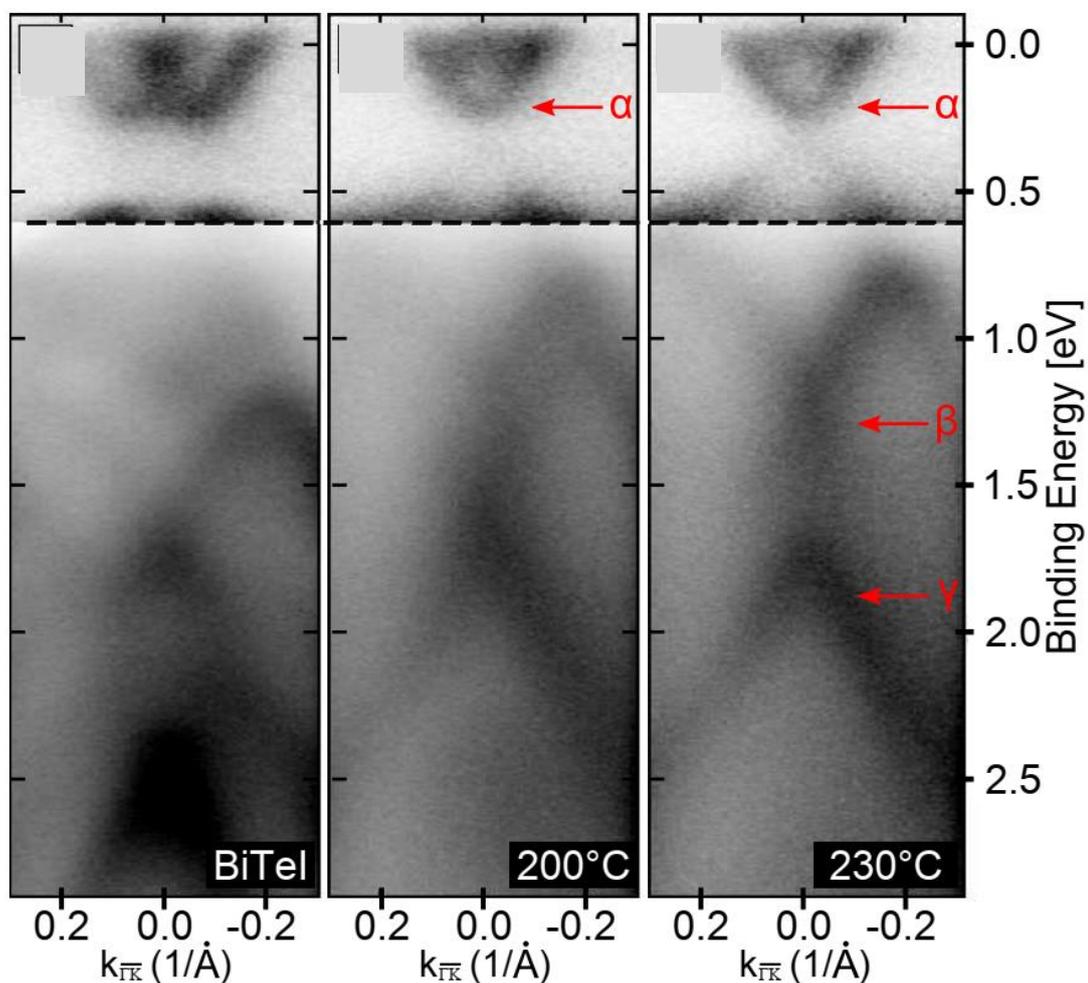


Рис. 5. Результаты измерений ФЭСУР ( $h\nu=21.2$  эВ) для трех стадий отжига (0, 200 и 230°C) BiTeI. Верхняя часть рисунков показана с большим контрастом относительно нижней. Прослеживается переход от рашбовски расщепленного состояния к дираковскому состоянию  $\alpha$ . Также видны  $\beta$  и  $\gamma$  – более глубокие поверхностные состояния валентной зоны.

В **Главе 5** рассмотрены структурные и магнитные свойства гибридных эпитаксиальных систем на основе 3d-металлов и оксидов. В **разделе 5.1** продемонстрированы результаты по эпитаксиальному росту структурно упорядоченной системы CoFeV/MgO в противоположность традиционно применяемой в МТП поликристаллической или текстурированной системе [14а,15а]. Показано, что упорядоченные эпитаксиальные пленки CoFeV можно вырастить на поверхностях MgO (001) и (111) методом ЛМЛЭ в одностадийном (безотжиговом) режиме, при повышенной температуре роста (до 400-500°C). Пленки, полученные таким образом, имеют ОЦК структуру, что подтверждается результатами измерений РДА и ДБЭ. В системе CoFeV/MgO(111), полученной на подложках GaN(0001), также наблюдался структурно упорядоченный трехдоменный рост с нетривиальными эпитаксиальными соотношениями. Полученные слои CoFeV/MgO(001) демонстрируют двухосную магнитную анизотропию в плоскости. В зависимости от ориентации магнитного поля процесс перемагничивания в плоскости пленки сопровождается поворотом намагниченности с двумя необратимыми скачками посредством зарождения и движения доменных стенок. Моделирование угловых зависимостей ферромагнитного резонанса (ФМР) позволило определить магнитные параметры  $4\pi M_{\text{eff}} = 13.5$  кГс и  $k_{c1} = 0.24$  кГс для данной системы.

В **разделе 5.2** приведены результаты исследования процессов эпитаксиального роста многослойных магнитных гетероструктур, состоящих из ферромагнитных 3d-металлов Co, Fe и Ni (а также сплава CoFeV) и магнитоупорядоченных оксидов Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, α- и γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Выявлена окислительно-восстановительная реакция на интерфейсе металл-оксид, приводящая к перестроению кристаллической структуры интерфейсного слоя оксидов железа [13а]. Эта реакция происходит в результате избытка атомов 3d-металла на начальной стадии осаждения. При этом ионы Fe<sup>3+</sup> в слое оксида железа имеют тенденцию к восстановлению до состояния Fe<sup>2+</sup>, вызывая трансформацию кристаллической структуры. Трансформация сопровождается формированием структуры MeO типа каменной соли (где Me соответствует атомам железа из оксида, а также атомам осаждаемого 3d-металла), которая легко распознается дифракционными мето-

дами. С помощью 3D-картографирования обратного пространства с помощью ДБЭ рассмотрены структурные перестроения, возникающие при осаждении ФМ на  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , а также  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Предложена единая модель структурного перехода на интерфейсе для всех случаев, заключающаяся в заполнении катионных вакансий в нечетных слоях оксида железа атомами металла, мигрирующими с поверхности, а также атомами Fe, мигрирующими из чётных слоёв оксида. Изученная химическая реакция и сопутствующие структурные трансформации на границе раздела ферромагнитных 3d-металлов и магнитоупорядоченных оксидов железа важны для понимания магнитных эффектов близости в этих системах.

**Глава 6** посвящена изучению процессов эпитаксиального роста и исследованию структурных и магнитных свойств ферритов. В **разделе 6.1** показана возможность создания [20a] поликристаллических пленок феррита-граната  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{GaN}$ , при росте методом ЛМЛЭ как без прослойки, так и с немагнитной прослойкой MgO. При этом продемонстрировано отсутствие примеси паразитных структурных фаз (простых оксидов и ортоферрита) в случае оптимизации ростовых режимов: нанесение низкотемпературного затравочного слоя, его высокотемпературный отжиг и дальнейшее высокотемпературное нанесение основного слоя. Магнитные измерения в **разделе 6.2** показали [21a] наличие анизотропии типа "легкая плоскость" в пленках  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG). Успешное выращивание прозрачного поликристаллического слоя YIG на подложке GaN позволит в дальнейшем интегрировать YIG с полупроводниковыми устройствами на полупроводниковых подложках GaN.

В **разделе 6.3** подробно изучено [16a,18a,19a,23a] влияние быстрого термического отжига на кристаллическое качество пленок  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  на подложках  $\text{SrTiO}_3$ . Показано критическое значение последовательного отжига в атмосфере кислорода в ростовой камере, плавного охлаждения, и последующего высокотемпературного ( $1100^\circ\text{C}$ ) отжига на воздухе (процедура "двойного отжига") для формирования тонких пленок  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  с высоким кристаллическим качеством и магнитными свойствами, близкими к таковым в объёмных кристаллах  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ . Термический отжиг на воздухе может улучшать стехиометрию пленок за счет допол-

нительного окисления. Приведены результаты комплексного подхода к изучению кристаллической структуры полученных в данных условиях пленок с применением ряда методик, таких как ДБЭ, РДА, РМЦД и рентгеновское поглощение. Показано, что пленки, полученные в условиях “двойного отжига”, имеют структуру полностью инвертированной шпинели. При этом термический отжиг на воздухе не приводит к появлению паразитных позиций  $\text{Fe}^{2+}$  ( $T_d$ ) и  $\text{Ni}$  ( $T_d$ ). Статические магнитные измерения подтвердили наличие магнитной анизотропии 4-го порядка типа легкая ось в плоскости пленки, а также показали положительное влияние отжига на повышение магнитомягкости  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ . Показана возможность распространения спиновых волн и продемонстрированы близкие к таковым в объёмных кристаллах этого материала значения намагниченности насыщения  $M_s = 280 \pm 30$  кА/м и ширины линии ФМР  $\Delta H = 45-50$  Э (рисунок б). Таким образом, показано, что экзотические подложки с согласованной со структурой шпинели решеткой (такие, как  $\text{MgGa}_2\text{O}_4$  и  $\text{CoGa}_2\text{O}_4$ ) не являются необходимыми для изготовления пленок  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  с близкими к объёмным статическими и динамическими магнитными свойствами. Напротив, можно использовать коммерчески более доступные “простые” подложки  $\text{SrTiO}_3(001)$ .

**Раздел 6.4** посвящен росту и изучению кристаллической структуры эпитаксиальных мультиферромагнитных наноструктур на основе  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , а также системы  $\text{NiFe}_2\text{O}_4 - \text{CoFeV} - \text{MgO}$ . Показано, что на простых подложках  $\text{SrTiO}_3(001)$  и  $\text{MgO}(001)$  возможно эпитаксиальное выращивание не только отдельных пленок, но и многослойных гетероструктур на основе различных шпинелей.

В **разделе 6.5** приведены результаты использования ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в качестве “зондовых” люминесцентных центров в тонких пленках  $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{SrTiO}_3(001)$ , полученных методом ЛМЛЭ [17а]. Были измерены спектры флуоресценции  ${}^2E - {}^4A_2$  этих центров. Неоднородное уширение спектров свидетельствует об инверсии  $\text{Al/Mg}$  в кристаллической решетке пленок, аналогично наблюдаемой в объёмных монокристаллах, полученных методом Вернейля. Наблюдаемое сокращение излучательного времени жизни перехода  ${}^2E - {}^4A_2$  в тонких пленках  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$  по сравне-

нию с синтезированными объемными кристаллами можно отнести к искажению октаэдрического окружения ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в пленках.

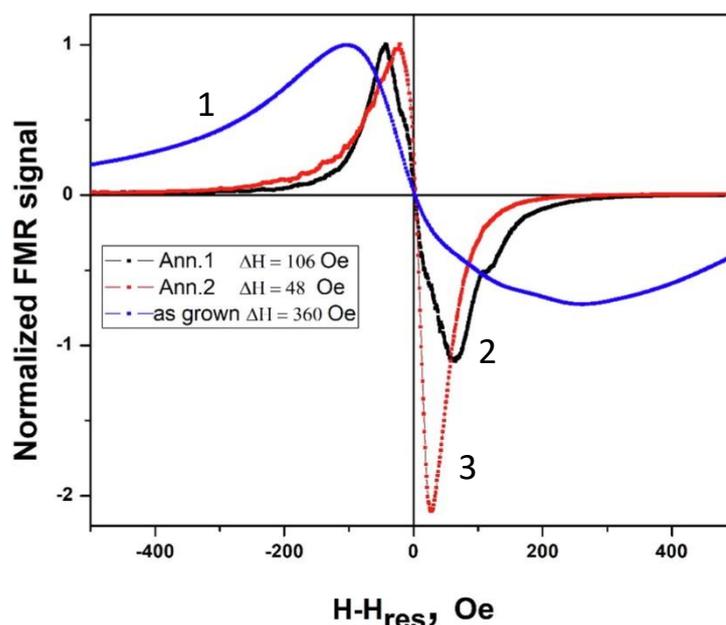


Рис. 6. Нормализованные спектры ФМР при фиксированной частоте 9.27 ГГц и направлении магнитного поля вдоль оси трудного намагничивания [100] структуры NFO/STO(001) до отжига (№1,  $\Delta H = 360$  Э), после отжига только в камере (№2,  $\Delta H = 106$  Э) и после дополнительного отжига при  $1100^\circ\text{C}$  в течение 3 часов на воздухе (№3,  $\Delta H = 48$  Э).

В **Главе 7** представлены результаты работы по гетероэпитаксиальной стабилизации метастабильных структурных модификаций  $\text{MnF}_2$  и  $\text{ZnF}_2$ , а также  $\text{Co}$  на кремнии с использованием буферных слоев  $\text{CaF}_2$  [24а,26а,28а,31а,39а] и исследованию свойств этих модификаций.

В **разделе 7.1**, согласно данным ДБЭ и РДА, впервые продемонстрирован [25а,29а,33а,37а] эффект эпитаксиальной стабилизации структурно упорядоченной метастабильной в нормальных условиях ромбической структурной фазы типа  $\alpha\text{-PbO}_2$  в слоях  $\text{MnF}_2$  на анизотропном гофрированном буферном слое  $\text{CaF}_2(110)/\text{Si}(001)$ , а также на поверхности  $\text{CaF}_2(001)$ . Были определены эпитаксиальные соотношения и огранка кристаллитов (рисунок 7).

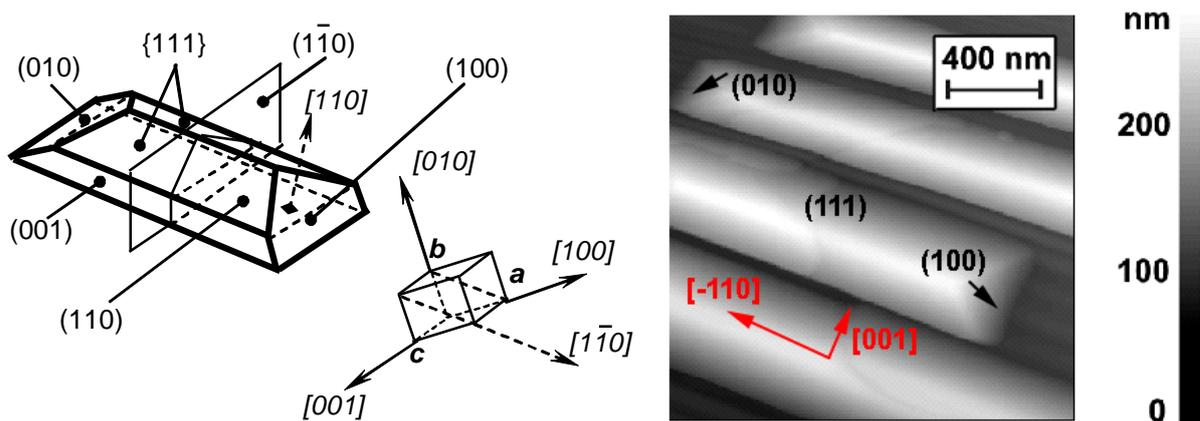


Рис. 7. Огранка микрокристаллитов  $\text{MnF}_2$  ромбической структурной модификации при росте на  $\text{CaF}_2(110)$ .

Метастабильная фаза сохраняется в слоях толщиной вплоть до 1.5 мкм. Таким образом, создан новый материал, привлекательный с точки зрения изучения его структуры, оптических и магнитных свойств. Выяснено, что влияние кристаллической структуры на собственную фотолюминесценцию (ФЛ) иона  $\text{Mn}^{2+}$  проявляется сдвигом края поглощения в коротковолновую область для ромбической фазы. Особенности спектров собственной ФЛ как рутиловой, так и ромбической структуры, связанные с образованием магнонов, свидетельствуют в пользу антиферромагнитной природы ромбической фазы  $\text{MnF}_2$ . Примесная ФЛ при легировании трехвалентной примесью  $\text{Sm}^{3+}$  эпитаксиальных слоев ромбической фазы  $\text{MnF}_2$  соответствует двум типам излучательных центров, определяемых взаимным расположением иона  $\text{Sm}^{3+}$  и фтора-компенсатора [34а,35а]. С помощью дифракции нейтронов, а также методики РДА высокого разрешения измерена [29а] температура Нееля ромбической фазы  $T_N=67.2$  К, что близко к значению, известному для структуры типа рутила, характерной для объемных кристаллов.

Исследована начальная стадия роста  $\text{MnF}_2$  на планарной поверхности  $\text{CaF}_2(111)$  и продемонстрирована гетероэпитаксиальная стабилизация флюоритоподобного кристаллического окружения в первых трех монослоях  $\text{MnF}_2$ , составляющих как часть гетероструктуры  $\text{MnF}_2/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ , так и подслой (в пределах трех монослоев) каждого периода короткопериодных сверхрешеток  $\text{MnF}_2 - \text{CaF}_2$ .

В разделе 7.2 также впервые продемонстрирован эффект эпитаксиальной стабилизации на подложках Si(001) и Si(111) с использованием буферного слоя  $\text{CaF}_2$  структурно упорядоченной метастабильной ромбической фазы типа  $\alpha\text{-PbO}_2$  в слоях  $\text{ZnF}_2$  вплоть до 1 мкм [33а,36а,37а]. При этом выявлена меньшая тенденция к стабилизации данной фазы, чем для случая  $\text{MnF}_2$ : в зависимости от ориентации поверхности  $\text{CaF}_2$  показана возможность полиморфного сосуществования ромбической и рутиловой фаз, а также эпитаксиального роста чисто рутиловой фазы. В случае роста на гофрированном буферном слое  $\text{CaF}_2$  (110) продемонстрирован эффект “всплывания” - переориентации верхней части кристаллитов в процессе роста при сохранении иной кристаллографической ориентации и эпитаксиальных соотношений в основном объеме, что является интересным эффектом с точки зрения прикладной кристаллографии. При этом поворот кристаллических решеток происходит не в плоскости роста, а в плоскости, ей перпендикулярной. Фронт роста соответственно меняется с (110) на (011) или близкую к ней плоскость (067) при сохранении плоскости роста (110) в основном объеме кристаллита.

В  $\text{ZnF}_2$  обнаружено [34а,35а] несколько типов центров примесной ФЛ  $\text{Sm}^{3+}$ . В данном случае тип центра определяется не только типом кристаллической структуры, в которую он внедрен (рутиловой или ромбической), но и способом компенсации избыточного положительного заряда иона [38а], что связано с возможностью конверсии  $\text{ZnF}_2$  в полупроводник n-типа со значением удельного сопротивления, не превышающим единиц-десятков Ом·см.

В разделе 7.3 были изучены эпитаксиальные наноструктуры Co и Ni на гофрированном буферном слое  $\text{CaF}_2(110)/\text{Si}(001)$ , показана эпитаксиальная стабилизация метастабильной ГЦК фазы Co [22а,27а,30а,32а]. В данных слоях выявлена преимущественная одноосная магнитная анизотропия с разбросом направлений легких осей в диапазоне 0-30°. В изотропных гетероструктурах Co/ $\text{CaF}_2(111)/\text{Si}(111)$  продемонстрировано интерференционное усиление полярного МОЭК. На гофрированном буферном слое  $\text{CaF}_2$  также эпитаксиально выращена пара Co- $\text{MnF}_2$ , выявлено наличие химического сдвига уровня Co 2p в спектрах РФЭС, свидетель-

ствующее о наличии химической реакции на интерфейсе Co-MnF<sub>2</sub>, при отсутствии таковой на интерфейсе Co-CaF<sub>2</sub>.

В **Заключении** сформулированы основные **результаты** и выводы работы:

1) Разработан оригинальный способ формирования энергетической щели в области точки Дирака путем создания разбавленного приповерхностного слоя ТИ с ненулевой компонентой намагниченности вне плоскости. Данный способ реализован для ТИ BiSbTeSe<sub>2</sub> путем прецизионного осаждения субмонослойных количеств магнитных атомов Co или Mn при температурах 300 - 330°C. Определяющим фактором является встраивание эпитаксиально осаждаемых атомов магнитной примеси. При увеличении количества осаждаемого Co происходит формирование матагамитоподобной парамагнитной кристаллической фазы CoTe<sub>x</sub>Se<sub>2-x</sub>, что является следствием упорядоченного встраивания ферромагнитной примеси. Выявление нового технологического механизма расширяет возможности по созданию материалов для наблюдения КАЭХ путем поверхностного легирования немагнитных ТИ.

2) Путем изменения ростовой температуры можно управлять характером морфологии и степенью планарности поверхности упорядоченных тонких пленок Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te(001)/Si(111), что важно для дальнейших транспортных измерений поверхности (001) пленок ТИ на базе Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te. Проведена оптимизация ростовых режимов трехслойной гетероструктуры Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te(111):In/BaF<sub>2</sub>/CaF<sub>2</sub>/Si(111). Продемонстрирован эффект уменьшения проводимости данного слоя при пониженных температурах для составов, соответствующих x=0.2-0.3. Полученный слой Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te:In обладает высокой планарностью (перепад высот до 4 нм на площади 4 × 4 мкм), что является необходимым для последующего гомоэпитаксиального наращивания слоя Pb<sub>1-y</sub>Sn<sub>y</sub>Te с повышенным значением параметра y>0.3-0.4, в котором продемонстрировано наличие ПС дираковского типа. Таким образом, создана гомоэпитаксиальная структура на базе соединения Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te:In с переменным стехиометрическим составом, обеспечивающая улучшенные диэлектрические свойства в объеме и при этом наличие ТПС.

3) Методом ЛМЛЭ получены структурно упорядоченные ферромагнитные пленки с ОЦК структурой на поверхностях ТИ в системе Ме/ТИ на основе  $\text{CoFeV/Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ,  $\text{CoFe(V)/Bi}_2\text{Te}_3$ , а также  $\text{CoFe/BiTeI}$ , и исследованы их структурные и магнитные свойства. Выявлена разница в химических состояниях в случаях роста  $\text{CoFeV}$  на подложках  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ : во втором случае слой является структурно упорядоченным и более устойчив к окислению на воздухе. Расчеты  $m_s$  и  $m_{\text{orb}}$  в пленках по результатам измерений РМЦД показали, что наименьшее значение  $m_s$  Fe по сравнению со значением для объемного металлического Fe достигается в присутствии большего количества окисла, т.е. в случае поликристаллического роста  $\text{CoFeV/Bi}_2\text{Se}_3$ , что также согласуется с данными РФЭС.

4) В наноструктурах на основе слоев кристаллического ТИ  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$  с нанесенными эпитаксиальными магнитными контактами наблюдается выраженный эффект ГМС в локальной и нелокальной геометриях расположения контактов при составах, соответствующих  $x=0.31-0.34$ . Большая длина спиновой диффузии свидетельствует о существенной роли сильного СОВ в процессах токопротекания, и важной роли не только ПС, но и объемных бесщелевых состояний вблизи точки инверсии. Полученные результаты открывают дальнейшие перспективы для изучения и использования систем с управляемым спин-поляризованным током на базе монокристаллических ФМ и ТИ. В целом, в Гл. 1-3 были систематически исследованы объекты “ФМ – ТИ” на базе как известных бинарных ТИ, так и более сложных тройного и четверного соединений  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  и  $\text{BiSbTeSe}_2$ , с точки зрения структурных, электронных и магнитных свойств.

5) Выявлено индуцирование локального структурного перехода в поверхностном слое полупроводникового рашбовского монокристалла  $\text{BiTeI}(0001)$  путем отжига в вакууме. При этом происходит переход к тетрадимитоподобной структуре типа  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{I}$ . Изменение кристаллической структуры приводит к формированию ТПС. Полученный результат является новым способом модификации топологических свойств в электронной структуре слоистых материалов с сильным СОВ за счет локальных структурных изменений.

6) Продемонстрирована возможность формирования упорядоченных эпитаксиальных систем  $\text{CoFeV/MgO}(001)$  и  $\text{CoFeV/MgO}(111)$  в противоположность традиционно применяемой в МТП поликристаллической или текстурированной системе на базе этих материалов. Подтверждена объемно-центрированная кубическая (ОЦК) структура  $\text{CoFeV}$  и определены эпитаксиальные соотношения. В гетероструктурах  $\text{CoFeV/MgO}(001)$  выявлена двухосная магнитная анизотропия в плоскости. Подходы, предложенные в диссертации, позволяют рассчитывать на создание МТП с улучшенным кристаллическим качеством, в частности, за счет улучшения качества диэлектрика при его росте на структурно упорядоченном слое ФМ.

7) Исследование процессов эпитаксиального роста многослойных магнитных гетероструктур, состоящих из ферромагнитных 3d-металлов  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$  и сплава  $\text{CoFeV}$ , нанесенных на магнитоупорядоченные оксиды железа, показало, что на интерфейсе происходит окислительно-восстановительная реакция, протекающая при осаждении 3d-металлов на поверхность оксидов, сопровождающаяся трансформацией кристаллической структуры приповерхностного слоя оксида в структуру типа каменной соли  $\text{MeO}$ . Полученные результаты важны при дальнейшем изучении магнитных эффектов близости в этих системах, в области, связанной с созданием многослойных ферромагнитных гетероструктур для различных приложений спинтроники.

8) Оптимизирована и отработана технология получения методом ЛМЛЭ пленок  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{GaN}$ , при росте как без прослойки, так и с немагнитной прослойкой  $\text{MgO}$ , что позволяет получить качественные поликристаллические пленки  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , не содержащие примеси паразитных структурных фаз. Успешное получение поликристаллического слоя  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  на подложках  $\text{GaN}$  позволит в дальнейшем интегрировать ферритовые СВЧ-устройства на базе  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  с полупроводниковыми устройствами на полупроводниковых подложках.

9) Показана критическая важность двухстадийного термического отжига, *in situ* в кислороде (в ростовой камере) и *ex situ* на воздухе, для повышения кристаллического качества и улучшения магнитных свойств

тонких эпитаксиальных пленок  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , выращенных методом ЛМЛЭ на подложках  $\text{SrTiO}_3$ . Подтверждено формирование структуры полностью инвертированной шпинели в данном случае. Измерения ФМР и магнито-оптического эффекта Керра (МОЭК) продемонстрировали наличие магнитных свойств (т.е. значений величин  $\Delta H_{\text{ФМР}}$  и  $M_s$ ), эквивалентных таковым в объемных кристаллах  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ . Показаны наличие двухосной магнитной анизотропии в отожженных пленках и двухскачковый механизм переключения намагниченности, сходный со случаем  $\text{CoFeV/MgO}(001)$ , зафиксировано распространение спиновых волн. Таким образом, достижение хороших магнитных параметров в тонких пленках  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  возможно с использованием не экзотических, а более простых и коммерчески доступных подложек  $\text{SrTiO}_3$ .

10) Показано, что на простых подложках  $\text{SrTiO}_3$  и  $\text{MgO}$  также возможно эпитаксиальное выращивание многослойных гетероструктур на основе шпинелей. Показана возможность создания эпитаксиальных мультиферромагнитных наноструктур на основе  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , а также системы  $\text{NiFe}_2\text{O}_4 - \text{CoFeV} - \text{MgO}$ .

11) Показана возможность использования ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в качестве “зондовых” люминесцентных центров, чувствительных к изменению кристаллического окружения в тонких пленках  $\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{SrTiO}_3(001)$ , полученных методом ЛМЛЭ.

12) Структурные исследования эпитаксиальных слоев  $\text{MnF}_2$  и  $\text{ZnF}_2$ , выращенных на подложках  $\text{CaF}_2/\text{Si}$  с ориентацией поверхности роста (001), (110) и (111), показали наличие эффективной эпитаксиальной стабилизации метастабильных в объемных кристаллах фаз  $\text{MnF}_2$  и  $\text{ZnF}_2$ : ромбической типа  $\alpha\text{-PbO}_2$  для обоих случаев, а также флюоритоподобной для случая  $\text{MnF}_2/\text{CaF}_2(111)$ . Измерена  $T_N$  ромбической фазы  $\text{MnF}_2$ . Продемонстрирована существенная роль поверхности  $\text{CaF}_2$  для стабилизации метастабильных структурных фаз: также гетероэпитаксиально стабилизирована структурно упорядоченная метастабильная ГЦК фаза  $\text{Co}$ . Стабилизированные метастабильные фазы фторидов являются новыми материалами для приложений спинтроники.

13) Вид спектров экситонной фотолюминесценции ромбической фазы  $\text{MnF}_2$  также указывает на антиферромагнитную природу этой фазы. При легировании  $\text{Sm}$  эпитаксиальных слоев  $\text{MnF}_2$  и  $\text{ZnF}_2$ , имеющих ромбическую структуру, обнаружено два вида характерных для данной фазы излучательных центров. Помимо этого в слоях  $\text{ZnF}_2$  обнаружен дополнительный тип центров, отличающийся типом компенсации положительного заряда.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

[1a] Kaveev A.K., Suturin S.M., Golyashov V.A., Kokh K.A., Ereemeev S.V., Estyunin D.A., Shikin A.M., Okotrub A.V., Lavrov A.N., Schwier E.F., Tereshchenko O.E. Band gap opening in the  $\text{BiSbTeSe}_2$  topological surface state induced by ferromagnetic surface reordering // *Phys. Rev. Mater.* – 2021 - Vol. 5 - №12 – P. 124204.

[2a] Kaveev A.K., Terpitckiy A.N., Tereshchenko O.E., Golyashov V.A., Estyunin D.A., Shikin A.M., Schwier E.F. Change of the topological surface states induced by ferromagnetic metals deposited on  $\text{BiSbTeSe}_2$  // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2020 - Vol.1697 - №1 – P. 012095.

[3a] Кавеев А.К., Банщиков А.Г., Терпицкий А.Н., Голяшов В.А., Терещенко О.Е., Кох К.А., Естюнин Д.А., Шикин А.М. Раскрытие энергетической щели в области точки Дирака при осаждении кобальта на поверхность (0001) топологического изолятора  $\text{BiSbTeSe}_2$  // *ФТП* – 2020 – Т. 54 - №9 – Стр. 859-586.

[4a] Kaveev A.K., Suturin S.M., Golyashov V.A., Kokh K.A., Tereshchenko O.E. Structural transformation of the  $\text{BiSbTeSe}_2$  topological insulator during Co laser MBE deposition // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019 - Vol.1400 - №5 – P. 055016.

[5a] Кавеев А.К., Терещенко О.Е. Оптимизация буферного диэлектрического слоя для создания малодефектных эпитаксиальных пленок топологического изолятора  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  с  $x \geq 0.4$  // *ФТП* – 2022 Т. 56 - №7- стр. 642-645.

- [6a] Кавеев А.К., Бондаренко Д.Н., Терещенко О.Е. Структурные свойства тонких пленок кристаллического топологического изолятора  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$  на  $Si(111)$  // ФТП – 2021 – Т. 55 - №8 - стр. 625-628.
- [7a] Kaveev A.K., Bondarenko D.N., Tereshchenko O.E. The dependence of surface morphology on the growth temperature of the  $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te/Si(111)$  topological insulator thin films // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021 – Vol.2103 - №1 – P.012086.
- [8a] Kaveev A.K., Golyashov V.A., Klimov A.E., Schwier E.F., Suturin S.M., Tarasov A.S., Tereshchenko O.E. Structure and magneto-electric properties of Co-based ferromagnetic films grown on the  $Pb_{0.71}Sn_{0.29}Te$  crystalline topological insulator // Mater. Chem. Phys. - 2020 - Vol.240 - P.122134.
- [9a] Тарасов А.С., Голяшов В.А., Ищенко Д.В., Ахундов И.О., Климов А.Э., Эпов В.С., Кавеев А.К., Супрун С.П., Шерстякова В.Н., Терещенко О.Е. Эффект поля и спин-вентильный эффект в кристаллическом топологическом изоляторе  $PbSnTe$  // Автометрия – 2020 – Т. 56 - №5 – Стр. 121-126.
- [10a] Кавеев А.К., Сутурин С.М., Соколов Н.С., Кох К.А., Терещенко О.Е. Изучение кристаллической структуры эпитаксиальных пленок  $Co_{40}Fe_{40}V_{20}$  на топологическом изоляторе  $Bi_2Te_3$  // Письма ЖТФ – 2018 - Т.44 - №5 – Стр. 10-15.
- [11a] Kaveev A.K., Sokolov N.S., Suturin S.M., Zhiltsov N.S., Golyashov V.A., Kokh K.A., Prosvirin I.P., Tereshchenko O.E., Sawada M. Crystalline structure and magnetic properties of structurally ordered cobalt-iron alloys grown on Bi-containing topological insulators and systems with giant Rashba splitting // Cryst. Eng. Comm. - 2018 - Vol.20 - №24 – P. 3419-3427.
- [12a] Fiedler S., Ereemeev S.V., Golyashov V.A., Kaveev A.K., Tereshchenko O.E., Kokh K.A., Chulkov E.V., Bentmann H., Reinert F. Topological states induced by local structural modification of the polar  $BiTeI(0001)$  surface // New J. Phys. - 2018 - Vol.20 - №6 – P.063035.
- [13a] Suturin S.M., Kaveev A.K., Korovin A.M., Fedorov V.V., Sawada M., Sokolov N.S. Structural transformations and interfacial iron reduction in heterostructures with epitaxial layers of 3D metals and Ferrimagnetic oxides // J. Appl. Crystallogr. – 2018 - Vol.51 - №4 – P. 1069-1081.

- [14a] Kaveev A.K., Bursian V.E., Krichevtsov B.B., Mashkov K.V., Suturin S.M., Volkov M.P., Tabuchi M., Sokolov N.S. Laser MBE-grown CoFeB epitaxial layers on MgO: Surface morphology, crystal structure, and magnetic properties // *Phys. Rev. Mater.* – 2018 - Vol.2 - №1 – P.014411.
- [15a] Feofilov S.P., Kulinkin A.B., Kaveev A.K., Sokolov N.S., Suturin S.M. Fluorescence spectroscopy of Cr<sup>3+</sup> ions in MgO nanofilms on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and GaN substrates // *Opt. Mater.* – 2018 - Vol.83 – P. 43-46.
- [16a] Kaveev A.K., Sokolov N.S., Suturin S.M., Sawada M., Voskoboynikov S.P. High temperature treatment of epitaxial nickel ferrite thin films: The way to bulk-like magnetic properties // *J. Cryst. Growth* - 2021 - Vol.573 – P. 126302.
- [17a] Feofilov S.P., Kulinkin A.B., Kaveev A.K., Sokolov N.S., Suturin S.M. Fluorescence of Cr<sup>3+</sup> ions in MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> epitaxial nanosize spinel films on SrTiO<sub>3</sub> substrates // *Thin Solid Films* – 2020 - Vol.693 – P.137732.
- [18a] Bursian V.E., Kaveev A.K., Korovin A.M., Krichevtsov B.B., Lutsev L.V., Suturin S.M., Sawada M., Sokolov N.S. Bulk-Like Dynamic Magnetic Properties of Nickel Ferrite Epitaxial Thin Films Grown on SrTiO<sub>3</sub>(001) Substrates // *IEEE Magn. Lett.* – 2019 - Vol.10 – P.6104505.
- [19a] Krichevtsov B., Gastev S., Mashkov K., Kaveev A., Korovin A., Lutsev L., Suturin S., Lobov I., Telegin A., Lomov A., Sokolov N, Magnetization reversal in NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/SrTiO<sub>3</sub> nanoheterostructures grown by laser molecular beam epitaxy // *J. Phys.: Conf. Ser.* - 2019 - Vol.1389 - №1 – P.012106.
- [20a] Kaveev A.K., Bursian V.E., Gastev S.V., Krichevtsov B.B., Suturin S.M., Volkov M.P., Sokolov N.S. Laser MBE-grown yttrium iron garnet films on GaN: Characterization of the crystal structure and magnetic properties // *Mater. Res. Expr.* – 2016 - Vol.3 - №7 – P. 076405.
- [21a] Кавеев А.К., Бурсиан В.Э., Гастев С.В., Кричевцов Б.Б., Сутурин С.М., Волков М.П., Соколов Н.С. Выращивание методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии слоев Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>/GaN и характеристика их структурных и магнитных свойств // *Письма ЖТФ* – 2016 – Т.42 - №23 – Стр. 72-78.

- [22a] Кричевцов Б.Б., Гастев С.В., Ильющенко Д.С., Кавеев А.К., Соколов Н.С. Магнитные свойства массивов наночастиц кобальта на поверхности  $\text{CaF}_2(110)/\text{Si}(001)$  // ФТТ – 2009 - Т.51 - №1 – Стр. 109-117.
- [23a] B.B. Krichevstov, S.M. Suturin, A.M. Korovin, A.K. Kaveev, V.E. Bursian, J.L.F. Cunado, N.S. Sokolov. Diffused magnetic transitions in  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{SrTiO}_3(001)$  epitaxial heterostructures // J. Magn. Magn. Mater. – 2022 – Vol. 562 – P. 169754.
- [24a] Pasquali L., Suturin S.M., Kaveev A.K., Ulin V.P., Sokolov N.S., Doyle B.P., Nannarone S. Interface chemistry and epitaxial growth modes of  $\text{SrF}_2$  on  $\text{Si}(001)$  // Phys. Rev. B - 2007 - Vol.75 - №7 – P. 075403.
- [25a] Kyutt R.N., Banshchikov A.G., Kaveev A.K., Sokolov N.S., Lomov A.A., Ohtake Y., Tabuchi M., Takeda Y. Structure and surface morphology of  $\text{MnF}_2$  epitaxial layers grown on grooved and ridged  $\text{CaF}_2(110)$  surface // J. Phys. D-Appl. Phys. – 2007 - Vol.40 - №16 - P. 021.
- [26a] Sokolov N.S., Kaveev A.K., Krupin A.V., Tyaginov S.E., Vexler M.I., Ikeda S., Tsutsui K., Saiki K. High insulating quality  $\text{CaF}_2$  pseudomorphic films on  $\text{Si}(111)$  // Appl. Phys. Lett. – 2007 - Vol.90 - №14 – P. 142909.
- [27a] Кричевцов Б.Б., Кавеев А.К., Баланев А., Соколов Н.С., Самарего J., Miranda R. Магнитные и магнитооптические свойства эпитаксиальных пленок кобальта, выращенных на гофрированной поверхности  $\text{CaF}_2/\text{Si}$  // ФТТ – 2007 – Т. 49 - №8 – Стр. 1410-1420.
- [28a] Sokolov N.S., Grekhov I.V., Ikeda S., Kaveev A.K., Krupin A.V., Saiki K., Tsutsui K., Tyaginov S.E., Vexler M.I. Low-leakage MIS structures with 1.5-6 nm  $\text{CaF}_2$  insulating layer on  $\text{Si}(111)$  // Microelectron. Eng. – 2007 - Vol.84 - №(9-10) – P. 2247-2250.
- [29a] Голосовский И.В., Соколов Н.С., Кавеев А.К., Boehm M., Nogues J., Nannarone S. Магнитный порядок в эпитаксиальном слое  $\text{MnF}_2$  с орторомбической структурой // Письма ЖЭТФ – 2006 – Т.83 - №4 – Стр. 185-188.
- [30a] Yakovlev N., Kaveev A., Sokolov N., Krichevstov B., Huan A. Novel magnetic nanostructures: Epitaxial cobalt films in transparent fluoride matrix // Curr. Appl. Phys. – 2006 - Vol.6 - №3 – P. 575-578.

- [31a] Pasquali L., Suturin S.M., Balanov A.S., Kaveev A.K., Sokolov N.S., Doyle B.P., Borgatti F., Giglia A., Mahne N., Pedio M., Nannarone S. Structural and photoemission studies of SrF<sub>2</sub> adsorption on Si(001) // J. Phys. IV – 2006 - Vol.132 – P. 35-39.
- [32a] Pasquali L., Doyle B.P., Borgatti F., Giglia A., Mahne N., Pedio M., Nannarone S., Kaveev A.K., Balanov A.S., Krichevstov B.B., Suturin S.M., Sokolov N.S., Cobalt on calcium fluoride: Initial stages of growth and magnetic properties // Surf. Sci. – 2006 - Vol. 600 - №18 (Sp. Iss. SI) – P. 4170-4175.
- [33a] Kaveev A.K., Anisimov O.V., Banshchikov A.G., Kartenko N.F., Ulin V.P., Sokolov N.S. Epitaxial growth on silicon and characterization of MnF<sub>2</sub> and ZnF<sub>2</sub> layers with metastable orthorhombic structure // J. Appl. Phys. - 2005 - Vol. 98 - №1 – P. 013519.
- [34a] Gastev S.V., Kaveev A.K., Sokolov N.S., Hoffman K.R., Reeves R.J. Laser spectroscopy of epitaxial manganese and zinc fluoride films on silicon // J. Cryst. Growth – 2004 – Vol.268 № (3-4 Spec.) – P. 536-542.
- [35a] Hoffman K.R., Gastev S.V., Kaveev A.K., Sokolov N.S., Reeves R.J. Optically probing the crystalline phases of MnF<sub>2</sub> and ZnF<sub>2</sub> utilizing Sm<sup>3+</sup> defect ions // J. Lumin. – 2004 – Vol. 108 №(1-4) – P. 25-30.
- [36a] Banshchikov A.G., Kartenko N.F., Kaveev A.K., Moiseeva M.M., Sokolov N.S. Growth and structural characterization of ZnF<sub>2</sub> epitaxial layers on Si // 10th Int. Symp. on Nanostructures: Physics and Technology Proc. SPIE (индексировано по WoS) – 2003 – V.5023 – №1 – P. 19-22.
- [37a] Anisimov O.V., Banshchikov A.G., Gastev S.V., Kartenko N.F., Kaveev A.K., Sokolov N.S. MBE-growth and characterization of MeF<sub>2</sub> (Me=Mn,Zn)/Si heterostructures // Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. of MBE (индексировано по WoS) 2002 – P. 337-338.
- [38a] Кавеев А.К., Моисеева М.М., Соколов Н.С. Эпитаксиальное выращивание проводящих слоев CdF<sub>2</sub>:Er // Письма ЖТФ – 2002 - Т. 28 - №6 – Стр. 75-80.
- [39a] A.K. Kaveev, R.N. Kyutt, M.M. Moiseeva, L.J. Schowalter, Yu.V.Shusterman, N.S. Sokolov, S.M. Suturin, N.L. Yakovlev, Molecular beam epitaxy and characterization of CdF<sub>2</sub> layers on CaF<sub>2</sub>(111) // J. Cryst. Growth – 1999 – Vol. 201 – P. 1105-1108.

## Список цитируемой литературы

- [1] Vergniory M., Menshchikova T., Ereemeev S. and Chulkov E. Ab initio study of 2DEG at the surface of topological insulator  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  // JETP Lett. – 2012 – Vol. 95 – P. 213-218.
- [2] Hai P., Ohya S., Tanaka M., Barnes S. and Maekawa S. Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions // Nature – 2009 – Vol. 458 – P. 489-492.
- [3] Volobuev V., Mandal P., Galicka M. *et al.* Giant Rashba Splitting in  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  (111) Topological Crystalline Insulator Films Controlled by Bi Doping in the Bulk // Advanced Materials. – 2017. – Vol. 29. – № 3. – P. 1-9.
- [4] X.-L. Qi, T. L. Hughes, and S.-C. Zhang. Topological field theory of time-reversal invariant insulators // Phys. Rev. B – 2008 – Vol.78 - 195424.
- [5] Q. L. He, L. Pan, A. L. Stern, E. C. Burks *et al.* Chiral Majorana fermion modes in a quantum anomalous Hall insulator–superconductor structure // Science – 2017 – Vol. 357 – P. 294.
- [6] T. Hirahara, S. V. Ereemeev, T. Shirasawa *et al.* Large-gap magnetic topological heterostructure formed by subsurface incorporation of a ferromagnetic layer // Nano Lett. – 2017 – Vol. 17 – P. 3493.
- [7] M. M. Otrokov, T. V. Menshchikova, M. G. Vergniory *et al.* Highly-ordered wide bandgap materials for quantized anomalous Hall and magnetoelectric effects // 2D Mater. – 2017 – Vol. 4 – P. 025082.
- [8] S. V. Ereemeev, M. M. Otrokov, and E. V. Chulkov. New universal type of interface in the magnetic insulator/topological insulator heterostructures // Nano Lett. – 2018 – Vol. 18 – P. 6521.
- [9] T. Hirahara, M. M. Otrokov, T. T. Sasaki *et al.* Fabrication of a novel magnetic topological heterostructure and temperature evolution of its massive Dirac cone // Nat. Commun. – 2020 – Vol. 11 – P. 4821.
- [10] M. M. Otrokov, I. I. Klimovskikh, H. Bentmann, D. Estyunin *et al.* Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator // Nature - 2019 - Vol. 576 – P. 416.
- [11] Y. L. Chen, J.-H. Chu, J. G. Analytis, Z. K. Liu *et al.* Massive Dirac fermion on the surface of a magnetically doped topological insulator // Science – 2010 – Vol. 329 – P. 659.
- [12] L. Bainsla, K. G. Suresh, A. K. Nigam, M. M. Raja *et al.* High spin polarization in  $\text{CoFeMnGe}$  equiatomic quaternary Heusler alloy // J. Appl. Phys. – 2014 – Vol. 116 – P. 203902.
- [13] S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchul *et al.* Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with  $\text{MgO}(100)$  tunnel barriers // Nat. Mater. – 2004 – Vol. 3 – P. 862.

- 
- [14] J. Fabian, A. Matos-Abiaguea, C. Ertlera, P. Stano, and I. Zutl. Semiconductor spintronics // *Acta Phys. Slovaca* – 2007 – Vol. 57 – P. 565.
- [15] J. F. Gregg, R. P. Borges, E. Jouguelet *et al.* Spin injection efficiency in spin electronic devices // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2003 – Vol. 265 – P. 274.
- [16] S. Pandharpure. Process development for integration of CoFe(B)/MgO-based magnetic tunnel junction (MTJ) device on silicon. MSc thesis //Rochester Institute of Technology - 2007.
- [17] S. Yuasa, Y. Suzuki, T. Katayama, and K. Ando. Characterization of growth and crystallization processes in CoFeB/MgO/CoFeB/CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junction structure by reflective high-energy electron diffraction // *Appl. Phys. Lett.* – 2005 – Vol. 87 – P. 242503.
- [18] A. Conca, J. Greser, T. Sebastian *et al.* Low spin-wave damping in amorphous Co<sub>40</sub>Fe<sub>40</sub>B<sub>20</sub> thin films // *J. Appl. Phys.* – 2013 – Vol. 113 – P. 213909.
- [19] S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. M. Lee *et al.* Tunnel magnetoresistance in MgO-barrier magnetic tunnel junctions with bcc-CoFe(B) and fcc-CoFe free layers // *J. Appl. Phys.* – 2006 – Vol. 99 – P. 08A907.
- [20] G. Viaud and N. A. Pertsev. Dynamic converse magnetoelectric effect in ferromagnetic nanostructures with electric-fielddependent interfacial anisotropy // *Phys. Rev. B* – 2014 – Vol. 90 – P. 064429.
- [21] S. Rizwan, G. Q. Yu, S. Zhang, Y. G. Zhao, and X. F. Han. Electric-field control of CoFeB/IrMn exchange bias system // *J. Appl. Phys.* – 2012 – Vol. 112 – P. 064120.
- [22] Xu Zhang, Y. Zhang, and J. W. Cai. Large Perpendicular Exchange Bias in CoFeB/MgO Systems Pinned by a Bottom IrMn Layer via an Interfacial CoFe/Ta Composite Layer // *IEEE Trans. Magn.* – 2015 – Vol. 51 - P. 4800604.
- [23] G. S. Parkinson. Iron Oxide surfaces // *Surf. Sci. Rep.* – 2016 – Vol. 71 – P. 272–365.
- [24] L.V. Lutsev. Dispersion relations and low relaxation of spin waves in thin magnetic films // *Phys. Rev. B* – 2012 – Vol. 85 – P. 214413.
- [25] N. Pachauri. Fabrication and ferromagnetic resonance study of epitaxial spinel ferrite films for microwave device applications. PhD thesis // University of Alabama Libraries – 2014 - Tuscaloosa, Alabama, USA.
- [26] M. Pardavi-Horvath. Microwave applications of soft ferrites // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2000 – Vol. 215 – P. 171-183.
- [27] Л. Литягина, С. Кабалкина, Л. Верещагин. Условия образования и существования фазы MnF<sub>2</sub> со структурой  $\alpha$ -PbO<sub>2</sub> // *ЖЭТФ* – 1972 – Том 62 - №2 – Стр. 669.

- 
- [28] С. Кабалкина, Л. Верещагин, Л. Литягина. Фазовые переходы в  $\text{MnF}_2$ ,  $\text{CoF}_2$ ,  $\text{NiF}_2$  и  $\text{ZnF}_2$  при высоком давлении (до 160 кбар) // ФТТ – 1969 – Том 11 - Стр. 1040.
- [29] L.J. Schowalter, R.W. Fathauer. Molecular beam epitaxy growth and applications of epitaxial fluoride films // J. Vac. Sci. Technol. – 1986 – Vol. A4 – P. 1026.
- [30] R. Loudon. Theory of infra-red and optical spectra of antiferromagnets // Adv. in Phys. – 1986 – Vol. 17 – P. 243-280.
- [31] N. Yamashita, T. Sumi, K. Nakamura, S. Asano. Photoluminescence Properties of  $\text{ZnF}_2:\text{Mn}^{2+}$ ,  $(\text{Zn}, \text{Mn})\text{F}_2$  and  $\text{MnF}_2$  // J. Phys. Soc. Jpn. – 1991 – Vol. 60 - №3 – P. 1105-1114.
- [32] M. Ye, S. V. Eremeev, K. Kuroda, E. E. Krasovskii *et al.* Quasiparticle interference on the surface of  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  induced by cobalt adatom in the absence of ferromagnetic ordering // Phys. Rev. B – 2012 – Vol. 85 - P. 205317.
- [33] M. R. Scholz, J. Sánchez-Barriga, D. Marchenko *et al.* Tolerance of Topological Surface States Towards Magnetic Moments: Fe on  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  // Phys. Rev. Lett. – 2012 – Vol. 108 – P. 256810.
- [34] M. Scholz, M. Sanchez-Barriga, D. Marchenko *et al.* Intact Dirac cone of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  covered with a monolayer Fe // Physica Status Solidi RRL – 2013 – Vol. 7 - №1-2 – P. 139.
- [35] T. Valla, Z.-H. Pan, D. Gardner, Y. S. Lee, and S. Chu. Photoemission Spectroscopy of Magnetic and Nonmagnetic Impurities on the Surface of the  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  Topological Insulator // Phys. Rev. Lett. – 2012 – Vol. 108 – P. 117601.
- [36] I. Vobornik, G. Panaccione, J. Fujii *et al.* Observation of distinct bulk and surface chemical environments in a topological insulator under magnetic doping // J. Phys. Chem. C – 2014 – Vol. 118 – P. 12333.
- [37] Eremeev S., Tsirkin S., Nechaev I., Echenique P. and Chulkov E. New generation of two-dimensional spintronic systems realized by coupling of Rashba and Dirac fermions // Sci. Rep. – 2015 – Vol. 5 – P. 12819.