

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Мухина Ивана Сергеевича, доктора физико-математических наук, Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук,  
почтовый адрес улица Хлопина, 8, к. 3, лит.А, Санкт-Петербург, 194021  
телефон +7(951)661-02-58, электронная почта: imukhin@yandex.ru,

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.

### **1. Актуальность избранной темы.**

Представленное Андреем Камильевичем Кавеевым диссертационное исследование посвящено решению актуальных проблем спин-транспортной электроники (“спинтроники”), а именно созданию новых эпитаксиальных тонкопленочных материалов, проявляющих высокую степень спиновой поляризации носителей зарядов или поддерживающих низко-диссипативные коллективные магнитные возбуждения (спиновые волны), и исследованию возникающих поверхностных/интерфейсных эффектов. Следует отметить, что, несмотря на достаточно хорошо разработанную теоретическую базу и развитость соответствующих экспериментальных методик, развитие областей спинтроники и магноники ограничивается именно проблемой разработки новых материалов, а именно развитием эпитаксиальных методов формирования новых материалов полупроводниковой и оксидной спинтроники. Практическая актуальность работ в данном направлении обуславливается возможностью создания логических цепей, устройств хранения, передачи и обработки сигналов с сверхмалыми диссипативными потерями. Актуальность проведенных исследований подтверждается непрерывным ростом числа научных работ в данной области.

### **2. Новизна полученных научных результатов.**

Работа состоит из 7 смысловых глав и, в целом, представляет собой теоретически обоснованное законченное экспериментальное исследование взаимосвязей между зонной структурой, магнитными и магнитотранспортными свойствами выращенных гетероструктур и их структурными особенностями, в том числе состоянием поверхности и гетерограниц. Принципиальная новизна настоящей работы заключается в выявлении

интерфейсных эффектов (реакций замещения, структурных фазовых переходов, эффектов эпитаксиальной стабилизации метастабильных фаз), происходящих на поверхности или на гетероинтерфейсах эпитаксиальных гетероструктур.

Первые четыре главы работы посвящены эпитаксиальным структурам на основе полупроводников с топологически нетривиальной электронной структурой (топологических изоляторов - ТИ):  $\text{BiSbTeSe}_2$ ,  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{I}$ . В первой главе представлен новый механизм раскрытия энергетической щели в спектре дираковских поверхностных состояний ТИ путем модификации поверхности соединения  $\text{BiSbTeSe}_2$  при нанесении суб-монослойных покрытий  $\text{Co}$  или  $\text{Mn}$ . Впервые экспериментально получены дисперсионные зависимости, демонстрирующие раскрытие энергетической щели в точке Дирака в результате замещения атомами  $\text{Co}$  пниктогенов в приповерхностном слое  $\text{BiSbTeSe}_2$ , предложена модель, описывающая механизм модификации поверхностных состояний.

Во второй главе работы развиты оригинальные методы эпитаксиального выращивания слоев ТИ на основе твердых растворов (тв. p-p)  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  на подложках  $\text{Si}$  с высоким структурным совершенством и атомно-гладкой поверхностью. Предложен метод подавления объемной проводимости с целью наблюдения поверхностных каналов проводимости путем варьирования состава твердого раствора ТИ по толщине слоя. Продемонстрировано образование дираковских поверхностных состояний.

В третьей главе впервые получены структурно упорядоченные ферромагнитные (ФМ) пленки ( $\text{Co}$ ,  $\text{CoFe}$   $\text{CoFeB}$ ) на поверхности эпитаксиальных слоев ТИ  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  на  $\text{Si}$  (111) и поверхности (0001) монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{BiTeI}$ . Определены эпитаксиальные соотношения, и установлена кристаллическая структура эпитаксиальных слоев. Впервые исследованы механизмы формирования поверхностной реконструкции  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (0001) (6x6), образованной  $\text{Co}$ . Показано, что в гибридных системах ферромагнетик-ТИ наблюдается как локальный, так и нелокальный эффект гигантского магнетосопротивления (ГМС), выполнена оценка длины спиновой диффузии в ТИ  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  (>20 мкм).

В четвертой главе представлен оригинальный способ модификации топологических свойств электронной структуры ван-дер-ваальсовского материала  $\text{BiTeI}$  путем локального изменения структуры поверхности. Впервые показано, что модификация стехиометрии монокристаллов  $\text{BiTeI}$  (0001) при отжиге в вакууме сопровождается структурным фазовым переходом к тетрадимитоподобной ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) структуре, что приводит к формированию топологических поверхностных состояний.

В пятой главе впервые получены монокристаллические ферромагнитные пленки 3d-металлов  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe}$  и сплава  $\text{CoFeB}$  на поверхности диэлектрических эпитаксиальных слоев  $\text{MgO}$  (111) и подложек  $\text{MgO}$  (001), а также слоев семейства различных оксидов железа. Предложена оригинальная, единая модель, описывающая структурное перестроение интерфейса ФМ / оксид железа вследствие поверхностной окислительно-восстановительной реакции.

В шестой главе продемонстрирована оригинальная технология эпитаксиального выращивания гетероструктур на основе ферритов со структурой шпинели  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  и структурой граната  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  (YIG) для магнонных применений. Впервые показано, что на подложках GaN методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) могут быть получены однофазные поликристаллические слои YIG, а на поверхности подложек  $\text{SrTiO}_3(001)$  могут быть выращены эпитаксиально-ориентированные слои  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  со структурой инвертированной шпинели, а также многослойные мультиферромагнитные структуры ферромагнетик (CoFeB) / ферримагнетик. Установлены особенности спин-волновых возбуждений в эпитаксиальных пленках ферритов. Показано, что разработанный метод пост-ростового отжига структур, направленный на улучшение структурного совершенства, позволяет получать слои  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  с малым затуханием спин-волновых возбуждений, приближенным к объемным кристаллам.

В седьмой главе работы впервые продемонстрированы эффекты эпитаксиальной стабилизации метастабильной в нормальных условиях ромбической структурной фазы типа  $\alpha\text{-PbO}_2$  в эпитаксиальных слоях антиферромагнитного диэлектрика  $\text{MnF}_2$  и широкозонного диэлектрика  $\text{ZnF}_2$ , и метастабильной гранецентрированной кубической структурной модификации в эпитаксиальных ферромагнитных наночастицах Co, формирующихся на поверхности буферных слоев  $\text{CaF}_2$  на Si.

### **3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Текст диссертации позволяет сделать заключение о достаточно высокой обоснованности новых научных результатов, сформулированных выводов и выносимых на защиту положений. Обоснованность подтверждается:

1. Предложенными теоретическими моделями и результатами численных *ab initio* расчетов, описывающими экспериментально наблюдаемые явления, например, такие как раскрытие энергетической щели в спектре дираковских поверхностных состояний ТИ.
2. Предложенным оригинальным подходом к обработке данных электронной и рентгеновской дифракции, позволяющим проводить надежный фазовый и композиционный анализ эпитаксиальных гетероструктур. Совпадением экспериментально полученных карт распределения интенсивности рассеяния в обратном пространстве с предложенными теоретическими моделями.
3. Использованием современных элементарно-чувствительных аналитических методов рентгеновской спектроскопии глубоких уровней с применением источников синхротронного излучения, а именно спектроскопии поглощения и магнитного кругового дихроизма. Детальным анализом экспериментально полученных спектров путем их разложения по набору теоретически рассчитанных базисных спектров.

4. Использование взаимодополняющих друг друга методов исследования магнитных свойств и зонной структуры эпитаксиальных наногетероструктур. Согласованностью высказанных предположений об особенностях зонной структуры гибридных гетероструктур ФМ/ТИ с результатами локальных и нелокальных магнитотранспортных измерений.

#### **4. Достоверность результатов исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Надежность и достоверность полученных результатов подтверждается:

1. Использование эпитаксиальных технологий выращивания гетероструктур, основанных на методах традиционной (термическое испарение) и лазерной (абляция материала) молекулярно-лучевой эпитаксии и позволяющих прецизионно контролировать состояние поверхности и толщину (с суб-монослойной точностью) формирующихся слоев.
2. Воспроизводимостью экспериментальных данных. Так, например, упорядоченное встраивание магнитных атомов Со в подрешетку пниктогенов поверхностного слоя ТИ  $\text{BiSbTeSe}_2$  наблюдалось при использовании различных методов эпитаксиального выращивания (термическое испарение, лазерная абляция) в различных ростовых камерах.
3. Соответствием данных, полученных за счет использования комплекса взаимодополняющих методик, в том числе основанных на использовании синхротронного излучения, а также согласованностью экспериментальных результатов с существующими теоретическими моделями, а именно:
  - Анализ зонной структуры поверхностных состояний проводился методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, лазерной фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением, а также резонансной электронной спектроскопии. Полученные экспериментальные данные согласуются с результатом расчета зонной структуры поверхностных состояний в рамках теории функционала плотности.
  - С целью исследования химической стабильности интерфейсов и гетерограниц были проведены исследования химического состояния и характера атомного окружения конкретных химических элементов, входящих в гетероструктуру, методом спектроскопии рентгеновского поглощения глубоких уровней (L-край). Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами численного моделирования.

- Для исследования магнитных свойств гетероструктур применялся широкий спектр взаимодополняющих методик: непосредственное измерение магнитного момента образца методами вибрационной и SQUID магнитометрии, исследование процесса перемангничивания методом векторной магнитометрии на основе магнитооптического эффекта Керра, а также оценка величины спинового и орбитального момента конкретного химического элемента элементно-селективный методом рентгеновского магнитного кругового дихроизма. Для исследования спиновых возбуждений применялись методы спектроскопии ферромагнитного резонанса, а также измерения распространения и затухания спиновых волн
- Для подтверждения спиновой поляризации носителей в гибридных структурах ФМ/ТИ были проведены исследования электрофизических свойств изготовленных структур как в геометрии локального расположения контактов, так и в нелокальной четырех-зондовой геометрии с использованием пары не магнитных контактов, что позволило пронаблюдать эффект магнетосопротивления в слое ТИ.
- Выводы о кристаллической структуре образцов сделаны на основе анализа данных, полученных путем трехмерного картографирования обратного пространства взаимодополняющими методами электронной и рентгеновской дифракции. Методом дифракции быстрых электронов исследовалось *in situ* распределение интенсивности дифракции в больших областях обратного пространства ( $|Q| \geq 1 \text{ \AA}^{-1}$ ), что позволило с высокой достоверностью судить о присутствии структурных доменов. Методом рентгеноструктурного анализа, напротив, с высоким разрешением анализировались локальные участки обратного пространства вблизи брэгговских рефлексов с целью анализа когерентности эпитаксиальных структур.

Новизна, надежность и достоверность полученных результатов подтверждается апробацией основных результатов работы в виде публикаций в рецензируемых международных научных журналах (39 печатных работ в изданиях, индексированных в WoS, SCOPUS и РИНЦ, в том числе журналах первого квартиля) и докладов (>50) на международных научных конференциях.

## **5. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.**

Научная ценность результатов диссертации определяется важностью исследования влияния интерфейсных эффектов в эпитаксиальных гетероструктурах на зонную структуру, магнитные и магнитотранспортные свойства новых низкоразмерных функциональных материалов. Полученные в диссертации результаты показывают, что такие интерфейсные эффекты, как окислительно-восстановительные реакции или реакции

замещения, структурные фазовые переходы или эффекты эпитаксиальной стабилизации метастабильных политипов, могут быть использованы для дальнейшего инжиниринга спин-транспортных свойств новых материалов полупроводниковой и оксидной спинтроники.

Практическая ценность полученных результатов работы подтверждается:

1. Новыми предложенными подходами к шунтированию объемной проводимости слоев ТИ на основе твёрдых растворов  $\text{PbSnTe:In}$  на подложках  $\text{Si}$  с целью эффективного практического использования спин-поляризованного транспорта, обусловленного поверхностными состояниями с топологической защищенностью за счет кристаллической симметрии, а также монолитной интеграции функциональных элементов спинтроники на кремниевую платформу.
2. Практической демонстрацией эффекта гигантского магнетосопротивления в гибридных структурах ФМ ( $\text{Co}$ ,  $\text{CoFe}$ ,  $\text{CoFeB}$ ) / ТИ ( $\text{PbSnTe}$ ), перспективного для создания устройств магнитной сенсорики или логических элементов на основе спиновых вентилей.
3. Разработанными методами улучшения структурного совершенства магнитно-туннельных переходов ( $\text{CoFeB/MgO}$ ) и гетеропереходов ФМ/ТИ с целью реализации управления ориентацией намагниченности магнитного слоя путем инжекции спин-поляризованного тока, перспективными для создания энергоэффективных функциональных элементов спинтроники.
4. Разработанными методиками к созданию гибридных гетероструктур феррит-полупроводник ( $\text{YIG/GaN}$ ) и ферромагнетик/ферримагнетик ( $\text{CoFeB/NiFe}_2\text{O}_4$ ), демонстрирующих малую величину затухания спиновых возбуждений, перспективных для создания интегральных спин-волновых устройств.

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации:**

Полученные в диссертационном исследовании А. К. Кавеева новые научные результаты могут быть использованы при проведении дальнейших НИР и ОКР в области создания устройств магнитной сенсорики, а также создания спин-вентильных (устройства хранения информации и логические элементы) и спин-волновых устройств (фильтры, линии задержки, направленные ответвители). Продемонстрированное в работе успешное формирование слоев ТИ на основе тв. р-ров  $\text{PbSnTe:In}$  на подложках  $\text{Si}$  и магнитоупорядоченных структур на основе  $\text{YIG}$ ,  $\text{CoFeB}$ ,  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  на поверхности  $\text{GaN}$  на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  обуславливает потенциал монолитной интеграции магнитных и спинтронных устройств в кремниевую или нитрид-галлиевую интегральную технологию.

Полученные результаты в области решения физико-технологических проблем технологии эпитаксиального выращивания гибридных гетероструктур на поверхности

традиционных полупроводников (Si, GaN) могут быть востребованы и внедрены в работах как научно-исследовательских организаций (Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, Институт физики микроструктур Российской академии наук и др.), так и научно-производственных компаний, таких как ООО «Коннектор Оптикс» или АО «ОКБ-Планета», специализирующихся на разработке и изготовлении полупроводниковых гетероструктур. Оригинальная технология эпитаксиального выращивания гетероструктур на основе ферритмагнетиков со структурой шпинели и гранатов может найти применение при создании интегральных спин-волновых устройств предприятиями ОАО «НИИ Феррит-Домен», ОАО "Завод Магнетон", а также представлять интерес для фундаментальных исследований, проводимых кафедрой радиофотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Новые научные результаты в области исследования структурных объемных и поверхностных фазовых переходов, в том числе предложенный оригинальный способ модификации электронной структуры ван-дер-ваальсовских материалов путем локального изменения структуры поверхности могут быть востребованы при решении задач лаборатории структурных и фазовых превращений в конденсированных средах Института Проблем Машиноведения РАН (ИПМаш РАН).

Резюмируя, можно отметить, что практическое внедрение предложенных решений, а также новых гибридных полупроводниковых гетероструктур позволит внести вклад в научно-технологическое развитие страны и общемировой науки в целом. Диссертация в целом представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, которая решает задачу, важную для развития физико-технологических основ спин-транспортной ("спинтроники") и спин-волновой ("магноники") электроники, а именно разработку методов эпитаксиального формирования новых гибридных функциональных материалов с учетом влияния интерфейсных эффектов, происходящих на поверхности или на гетероинтерфесах эпитаксиальных гетероструктур.

## **6. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

Очевидными достоинствами содержания диссертации являются:

- Проведенное автором подробное исследование влияния таких интерфейсных явлений, как эффекты эпитаксиальной стабилизации, реакции замещения, поверхностные структурные фазовые переходы на функциональные свойства эпитаксиальных гетероструктур.
- Достоверный анализ магнитных, структурных и транспортных свойств исследуемых гетероструктур, основанный на использовании взаимодополняющих аналитических методик.
- Использование технологий традиционной (термическое испарение) и лазерной (абляция материала) молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяющих прецизионно

контролировать химический состав, состояние поверхности и толщину формирующихся эпитаксиальных слоев.

- Активное использование при выполнении работы как внутрироссийского (СПбГУ, СПбПУ Петра Великого, ИФП СО РАН им А.В. Ржанова и ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск), ИФПМ СО РАН (г. Томск) т.п.), так и международного сотрудничества (университет г. Модена, университет г. Хиросима), что обеспечило получение результатов мирового уровня.
- Успешная международная экспертиза полученных результатов в ходе рецензирования статей, опубликованных в научных журналах первого квартала.
- Лаконичное и ясное изложение поставленных целей, задач и достигнутых результатов.

В целом, диссертация оформлена достаточно хорошо. К незначительным недостаткам можно отнести местами чрезмерно лаконичное описание некоторых экспериментальных условий, что может затруднить попытку стороннего воспроизведения наблюдаемых явлений. Сформулирован следующий список вопросов и замечаний:

### **Замечания:**

1. При описании дисперсионных зависимостей поверхностных состояний ТИ  $\text{BiSbTeSe}_2$  экспериментально полученных методом фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (Рисунки 1.1-1.4 стр. 53-58) в работе недостаточно подробно освещаются условия эксперимента: не указана поляризация возбуждающего излучения. Определяется ли наблюдаемое отличие интенсивностей ветвей конуса Дирака условиями эксперимента?
2. Одним из наиболее ярких доказательств встраивания атомов Со в решетку соединения  $\text{BiSbTeSe}_2$  является наблюдаемое автором изменение спектров фотоэлектронной эмиссии с глубоких уровней Те (3d), Sb (3d) и Bi (4f) (Рис. 1.8. стр. 69). Однако в работе перечисляются лишь возможные причины (изменение химического состояния и характера атомного окружения), но не высказываются предположения о конкретно задействованных механизмах, приводящих к изменению формы спектров. Детальный анализ полученных спектров мог бы дополнительно подтвердить сделанное автором предположение о частичном замещении кобальтом атомов пниктогена (Sb, Bi) во втором приповерхностном слое пятислойной структуры  $\text{BiSbTeSe}_2$ .
3. При описании механизма роста эпитаксиальных слоев тв. р-ров  $\text{PbSnTe}$  на поверхности Si (111) (стр. 75, Рисунок 2.1 (б)) автором не совсем удачно использовано описание наблюдаемого механизма формирования слоя, как роста по механизму Странского — Крастанова. По мнению оппонента, рост по данному механизму подразумевает под собой изменение морфологии поверхности

формирующейся структуры при достижении некоторой критической толщины вследствие накопления упругой энергии слоя или значительного отличия поверхностных энергий ростовой поверхности пленки и гетерограницы пленка/подложка. При этом, как правило, на начальном этапе наблюдается образование смачивающего слоя. Не исключено, что подобный механизм имеет место и при формировании слоев PbSnTe, однако для доказательства его реализации, следовало бы проанализировать зависимость морфологии пленок или картин ДБЭ от их толщины.

4. При обсуждении механизмов роста тв. p-ров PbSnTe на Si с использованием буферных слоев CaF<sub>2</sub> и BaF<sub>2</sub> автором были получены атомно-гладкие слои, поверхность которых демонстрирует линии выхода дислокаций по плоскостям скольжения кубической решетки {111} (стр. 86, Рисунок 2.10). В работе не обсуждается в какой момент образовались дислокации – в процессе роста слоя PbSnTe вследствие релаксации упругих напряжений, или же уже после охлаждения структуры вследствие отличия коэффициентов термического расширения слоев. Как подобные искажения кристаллической решетки могут сказаться на топологической “защищенности” поверхностных состояний PbSnTe?
5. В работе указано, что для роста магнитоупорядоченных структур на основе CoFeB, MgO и YIG использовались подложки GaN (0001). Хотелось бы уточнить подразумевались ли в работе подложки на основе монокристаллов GaN, или “виртуальные” подложки на основе эпитаксиальных слоев GaN (0001) выращенных на поверхности корунда?
6. На экспериментально полученных картах распределения интенсивности рассеяния в обратном пространстве, представленных в работе, не приведены масштабные метки и не всегда обозначено начало координат, что несколько затрудняет их интерпретацию читателем.

Следует отметить, что указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации.

## **7. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертация А.К. Кавеева выполнена на высоком научном уровне и представляет как научный, так и практический интерес. Автором продемонстрировано владение широким спектром аналитических методик, в том числе с использованием синхротронных источников излучения. Наблюдаемые экспериментальные явления проинтерпретированы в рамках существующих теоретических моделей. Предложены новые ростовые методики, обеспечивающие возможность модификации электронной структуры и транспортных свойств эпитаксиальных наногетероструктур, разработан оригинальный подход к исследованию их кристаллической структуры.

Изложение материала диссертации является ясным и лаконичным и сопровождается большим числом соответствующих схем и иллюстраций, что позволяет сделать выводы об обоснованности, надежности и достоверности полученных результатов. Представленный обзор литературы позволяет судить о высокой степени новизны и актуальности исследования. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных изданиях, включая публикации в изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

В диссертации решена крупная научная задача, а именно разработаны оригинальные методы эпитаксиального формирования и модификации поверхностных свойств новых гибридных гетероструктур, с целью развития физико-технологических основ спин-транспортной (“спинтроники”) и спин-волновой (“магноники”) электроники. Получен ряд новых функциональных материалов, установлено влияние интерфейсных эффектов на их структурные, оптические, магнитные, магнитотранспортные свойства, а также особенности зонной структуры.

Таким образом, диссертация А.К. Кавеева является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях №335 от 21.04.2016, №748 от 02.08.2016 и №1168 от 01.10.2018), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Андрей Камильевич Кавеев, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11-“Физика полупроводников”.

Официальный оппонент

Доктор физ.-мат. наук,

Зав. лабораторией.

Возобновляемых Источников Энергии

Санкт-Петербургского национального

исследовательского Академического

университета имени Ж. И. Алфёрова

Российской академии наук

Телефон: +7(951) 661-02-58;

E-mail: [imukhin@yandex.ru](mailto:imukhin@yandex.ru)

Мухин Иван Сергеевич