

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Окотруба Александра Владимировича на диссертацию Рыбкина Артема Геннадиевича на тему «Синтез и электронная спиновая структура квазидвумерных систем с комбинацией спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертация А.Г. Рыбкина посвящена исследованию электронных и транспортных спиновых свойств двумерных материалов на основе слоев металлов, графена и топологических изоляторов. Основное внимание в диссертации уделено изучению магнитных взаимодействий в тонких проводящих слоях модифицированных магнитными и немагнитными включениями и дополнительными слоями. Повышенный интерес к работе и **актуальность диссертации** связаны с рассмотрением обменных взаимодействий, что позволит создавать новые типы приборов для магнитной памяти, детекторов излучения и других магнитных устройств. Важной задачей исследования является изучение роли химических взаимодействий между слоями и роли спин-орбитального взаимодействия. Наличие значительных спин-орбитальных взаимодействий позволяет выявить эффекты спинового, квантового спинового и аномального эффектов Холла, а также наблюдать фермионы Майораны и другие фундаментальные эффекты. Наблюдаемые особенности свойств слоистых материалов могут найти применение в электронике для создания элементов памяти и элементов логики в существующей архитектуре вычислительных устройств, так и при создании абсолютно новой архитектуры квантовых компьютеров и посткремниевой электроники.

В первой главе диссертации рассмотрено современное состояние исследований в области синтеза и управления электронной спиновой структурой квазидвумерных систем. Описаны проявления спин-орбитальных взаимодействий в кристаллических твердых телах и квазидвумерных структурах. Автор диссертации последовательно представляет ранее проведенные исследования спин-орбитальных взаимодействий в графене. Отмечено, что ранее проведенные исследования позволили реализовать спиновый транзистор с управляемым спин-поляризованным током. Рассмотрено индуцированное спин-орбитальное взаимодействие по типу Рашбы и его комбинация с магнитным обменным взаимодействием. Контакт графена с тяжелыми металлами может приводить к индуцированному гигантскому эффекту Рашбы в графене. При этом, главную роль в индуцированном подложкой эффекте играет гибридизация  $\pi$  состояний графена и  $d$  состояний тяжелого металла. Первая глава диссертации представляет собой хорошо систематизированный обзор, включающий анализ природы эффектов индуцированного спин-орбитального взаимодействия и магнитной близости, а также исследования транспортных и спиновых свойств. Такой широкий обзор связан с набором задач, решаемых Артемом Геннадиевичем в диссертации.

Во второй главе диссертации приведен не менее впечатляющий обзор используемых в работе экспериментальных и теоретических методов. Основными методами исследования

являлись: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС); ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ФЭСУР), в том числе спин-разрешенная (спин-ФЭСУР) и время-разрешенная спектроскопии; дифракция медленных электронов (ДМЭ); сканирующие туннельные микроскопия (СТМ) и спектроскопия (СТС), в том числе с охлаждением до 1 К; сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ); измерение магнитных свойств материалов в широком диапазоне магнитных полей и температур с использованием сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД); метод теории функционала плотности (ТФП) для расчета зонной электронной структуры.

Значительная часть экспериментальной работы, представленной в данной диссертации, выполнена с использованием уникальной научной установки “Нанолаб” (УНУ Нанолаб) и установки фотоэлектронной спектроскопии “Универ-М” ресурсного центра “Физические методы исследования поверхности” (Научный парк СПбГУ). Особенность УНУ Нанолаб состоит в том, что в ней реализована комбинация методов сканирующей зондовой микроскопии и фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением. Это две основные группы методов, позволяющие получать наиболее полную информацию об электронной структуре твердых тел, а также на атомарном уровне визуализировать строение поверхности и нанообъектов. В то же время, модули фотоэлектронной спектроскопии и зондовой микроскопии имеют собственные камеры загрузки и подготовки образцов, позволяющие проведение синтеза образцов и их исследование *in situ* без нарушения сверхвысоковакуумных условий.

Часть исследований методом фотоэлектронной спектроскопии была выполнена в центрах синхротронного излучения третьего поколения: на канале вывода излучения BaDElPh синхротрона Elettra (Триест, Италия), на каналах вывода излучения RGLB, UE112\_PGM-1, UE112\_PGM-2b-1<sup>3</sup>, UE56-2\_PGM-2, U125-2\_SGM и U125\_PGM (RGLB2) синхротрона BESSY II (Гельмгольц-центр Берлин, Германия) с использованием полусферических энергоанализаторов SPECS Phoibos 150 и VG Scienta R4000 со спиновыми детекторами Мотта, работающими при энергии 26 и 25 кВ, соответственно, в части исследований систем W(110), Al/W(110), Gr/Pt(111), магнитодопированный BiTeI, Au/Co(0001) и Gr/Au/Co(0001)/W(110). Высокий уровень экспериментальной техники выполнения исследований, современный уровень выполнения квантово-химических расчетов свидетельствуют о достоверности полученных в диссертации результатов.

Далее в диссертации с 3 по 7 главу представлены результаты исследования. В главе 3 представлены результаты измерения индуцированного спин-орбитального расщепления квантовых электронных состояний в ультратонких слоях алюминия. Показано, что основным фактором аномального расщепления в такой системе является гибридизация КЭС с интерфейсными состояниями и состояниями подложки.

В 4 главе приведены результаты исследования образцов BiTeI, допированные V и Mn, с концентрациями 0,5%, 2%, 3%, 6% для V и 2,5% для Mn методами ФЭСУР, СТМ и СКВИД-магнитометрии. СТМ исследования подтверждают однородность и концентрацию магнитных примесей на поверхности образца. Проведены уникальные измерения

фотоэлектронных спектров с угловым разрешением и импульсной накачкой. Методом ФЭСУР измерены поверхностные состояния образцов топологических изоляторов, допированных ванадием, и обнаружен поверхностный фотовольтаический эффект, величина которого зависит от расположения точки Дирака относительно уровня Ферми и края валентной зоны.

В 5 главе диссертации описаны синтез и исследование электронной и атомной структур наносистем на основе ультратонких слоев металлов и квазисвободного графена. Очень важен вклад автора в исследование электронного и магнитного состояния графена с нанесенными тонкими пленками магнитных и немагнитных металлов. Однако гигантское спиновое расщепление электронных состояний, наблюдаемое в графене при контакте с тяжелыми и магнитными металлами, открывает широкие перспективы для использования в устройствах спинтроники, в частности, в области хранения информации и квантовых вычислений.

Далее в 6 и 7 главах диссертации изучается гигантский эффект Рашбы в графене под действием слоев золота и платины под графеном. В диссертации описан подход формирования поверхностного сплава Au и Co с образованием петлевых дислокаций. Выявлен диапазон термической стабильности интеркалированного графена до его разрушения при более высоких температурах. При этом допирование магнитно-спин-орбитального графена дырками или электронами приводит к различной величине спин-орбитального взаимодействия и различным магнитным упорядочениям на атомах углерода.

Таким образом, на основании вышеизложенного следует заключить, диссертация имеет **высокий уровень новизны**.

**В качестве замечаний хотел бы отметить:**

1. Технология изготовления слоистых материалов, напыление слоев и их отжиг вызывает химические процессы формирования интерметаллидов, карбидов металлов и т.п. В диссертации все эти процессы описываются на физическом языке, в частности, как «гибридизация». Хорошо было бы определить состояние поверхности как формирование стабильных химических фаз, зарядовых состояний через формирование ковалентных и донорно-акцепторных связей.
2. При напылении металлов (Gd на графен на платине Gr/Pt) для диагностики используются методы рентгеноэлектронной спектроскопии с разным углом возбуждения. Однако удивляет, что автор ни разу не использовал спектроскопию NEXAFS с угловым разрешением, чтобы определить степень ориентации углеродных слоев.
3. Хотелось бы более четкого понимания, почему интеркаляция меньшего количества золота под графен приводит к смещению точки Дирака графена из зоны проводимости в валентную зону, т. е. переходу от p-допированного к n-допированному графену?

Сделанные выше замечания не влияют на высокую оценку, которую заслуживает данная работа. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и содержит целый ряд новых интересных результатов, достоверность и научная новизна которых не вызывает сомнений.

Диссертация хорошо написана, четко изложена и иллюстрирована. Представленные результаты опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

Диссертация Рыбкина Артема Геннадиевича на тему: «Синтез и электронная спиновая структура квазидвумерных систем с комбинацией спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Рыбкин Артем Геннадиевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физико-математических наук  
(02.00.04 – Физическая химия),  
профессор (Физическая химия),  
главный научный сотрудник,  
заведующий лабораторией физикохимии наноматериалов,  
заведующий отделом химии функциональных материалов  
Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН  
(630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 3;  
+7 (383) 330-94-90; niic@niic.nsc.ru; <http://www.niic.nsc.ru>)

Окотруб А.В.

17.03.2025 г.

