

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Филатовой Елены Олеговны 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.

Диссертационная работа Рыбкина А.Г. на тему «Синтез и электронная спиновая структура квазидвумерных систем с комбинацией спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий» представляет собой огромный пласт новых, тщательно проведенных исследований, способствующих дальнейшему развитию направления по синтезу квазидвумерных систем с комбинацией спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий. Данное научно-техническое направление является **крайне важным и актуальным** для синтеза новых материалов спинтроники и **будет способствовать** дальнейшему развитию энергоэффективных и быстродействующих электронных устройств, в частности путем создания наносистем с эффективным управлением бездиссипативными спиновыми токами с высокой степенью спиновой ориентации и использованием спинового состояния электрона для хранения и переноса информации.

Благодаря уникальным физико-химическим свойствам, исследования графена по-прежнему привлекают внимание научного сообщества. Однако в наноэлектронике и спинтронике потенциал графена до сих пор раскрыт не полностью. Управление спиновой структурой в графене – одна из важнейших проблем материаловедения на сегодняшний день, которую необходимо решить для его применения в спинтронике и топологической электронике с использованием бездиссипативных токов. Следует отметить, что в диссертационной работе Рыбкин А.Г. не только представляет новые методы формирования хорошо упорядоченных, эпитаксиальных систем на основе графена и результаты исследования их электронной, магнитной и кристаллической структур, но также предлагает модели устройств спинтроники (спиновый фильтр, устройство записи информации для MRAM и инфракрасный детектор циркулярно-поляризованного излучения) с использованием обнаруженных в графене эффектов. С учетом топологически нетривиальной электронной структуры графена им также рассмотрены возможные направления дальнейших исследований с целью реализации устройств топологической электроники на основе квантовых эффектов Холла.

Работа представляет собой фундаментальное исследование, в ходе которого применен комплексный подход к анализу данных с привлечением как теоретических

расчетов, выполненных в рамках теории функционала плотности (DFT), так и широчайшего класса экспериментальных методов исследования, включающих рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС), в том числе с угловым разрешением (ФЭСУР), спин-разрешенную (спин-ФЭСУР) и время-разрешенную спектроскопии; дифракцию медленных электронов (ДМЭ); сканирующую туннельную микроскопию (СТМ) и спектроскопию (СТС), в том числе с охлаждением до 1 К; сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ); измерение магнитных свойств материалов в широком диапазоне магнитных полей и температур с использованием сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД). Исследования проведены как с использованием лабораторных источников, так и в центрах синхротронного излучения.

Использование современной хорошо апробированной экспериментальной измерительной техники, в том числе исследовательских станций на каналах вывода синхротронного излучения, позволило достичь высокой информативности исследований, а также обеспечить **достоверность** полученных результатов. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых международных научных журналах, что подтверждает достаточную **обоснованность** сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций.

На практическую значимость полученных Рыбкиным А.Г. результатов указывают в первую очередь три патента, полученные с участием автора. Также хочется обратить внимание на высочайший личный вклад автора, в том числе на то, что значительная часть исследований была выполнена на уникальной научной установке “Нанолаб” Научного парка СПбГУ, которая была спроектирована, собрана и введена в эксплуатацию при непосредственном участии автора.

Особенно хочется выделить следующие результаты:

1. Возможность передачи сильного спин-орбитального взаимодействия подложки квантовым электронным состояниям в ультратонком слое Al вплоть до 15 монослоев.
2. Эффект магнитной близости, который представляет собой способ реализации обменного расщепления электронных состояний без приложения внешнего магнитного поля, что также может быть использовано для реализации КАЭХ.
3. Контроль допирования графена через изменение стехиометрии сплава открывает новые возможности в развитии современной электроники.
4. Создание нового материала – магнитно-спин-орбитального графена на подложке Au/Co(0001), в котором удалось достичь одновременного влияния спин-

орбитального и магнитного обменного взаимодействий в подложке на электронную структуру графена.

5. Путем оптимизации параметров синтеза, в том числе на различных углеродных реконструкциях поверхности SiC, удалось достичь минимизации процессов силицидообразования на интерфейсе между SiC и графеном, что до сих пор являлось сдерживающим фактором для использования интеркалированного графена в электронике.

Диссертация построена логично, изложена грамотным языком и хорошо иллюстрирована. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. К сожалению, автору не удалось избежать многочисленных опечаток, повторяющихся слов и неудачных формулировок.

При знакомстве с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

- 1) В работе детально исследованы эффекты индуцированного спинового расщепления в тонких пленках Al на поверхности монокристалла W(110). Являются ли обнаруженные эффекты общими для подобных тонкопленочных металлических систем и до какой степени они зависят от толщины слоя алюминия?
- 2) Является ли исследованный в работе магнитно-спин-орбитальный графен топологическим материалом? Какие параметры спин-орбитального и обменного взаимодействий должны быть достигнуты для этого?
- 3) Для поверхностного сплава Au/Co(0001) были обнаружены спин-поляризованные состояния с конической дисперсией вблизи уровня Ферми. Данные состояния наблюдаются как в системах с графеном на поверхности, так и без него. Является ли графен только защитным покрытием при экспозиции на атмосферные условия или оказывает влияние на структурное качество формируемых петлевых дислокаций?
- 4) В Главе 7 продемонстрированы СТМ измерения одной из подрешеток магнитно-спин-орбитального графена. Чем можно объяснить существенное различие в СТМ изображениях, измеренных с атомным разрешением, но при различных туннельных параметрах (рис. 7.23 и рис. 7.25)?

Сделанные выше замечания не снижают научной ценности работы и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы, которая выполнена на высоком экспериментальном уровне. По актуальности темы, объему и достоверности представленных результатов, глубине и значимости выводов работа полностью соответствует уровню диссертации на соискание степени доктора наук. Полученные автором результаты представлены в двадцати трех статьях, опубликованных в

рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus и многократно им представлены и обсуждены на конференциях. Уровень публикаций достаточно высокий.

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.

Председатель диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, профессор,

Профессор СПбГУ

Дата 17 марта 2025 г.



Филатова Е.О.