



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

ул. Политехническая, д. 26, г. Санкт-Петербург, 194021

Тел. (812) 297-22-45, факс (812) 297-10-17

post@mail.ioffe.ru, <http://www.ioffe.ru>

ОКПО 02698463, ОГРН 1037804006998

ИНН 7802072267, КПП 780201001

27.01.2025 № 04.04.04-144

На № _____ от _____

Санкт-Петербургский государственный
университет

В Отдел по обеспечению деятельности
диссертационных советов

Санкт-Петербург, Университетская
набережная, 7-9, 199034

Тел. 363 61 14

Утверждаю:

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного

учреждения науки Физико-

технического института им. А.Ф.

Иоффе Российской Академии Наук,

д.ф.-м.н.



П.Н. Брунков

2025 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации — Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук на диссертацию Рыбкина Артема Геннадиевича «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

Актуальность темы выполненной работы

Синтез квазидвумерных эпитаксиальных систем, характеризующихся индуцированными спин-орбитальным и магнитным обменным взаимодействиями, привлекает особое внимание не только в рамках решения фундаментальных задач, но и в качестве практического направления для развития элементной базы спиновой и топологической электроники. Диссертационная работа посвящена синтезу и исследованию электронных свойств новых высококачественных систем на основе квазидвумерных материалов, пригодных для практического использования в современной электронике. Большой потенциал исследуемых систем заключается в возможности создания спин-поляризованных поверхностных токов и

переключения намагниченности в таких системах с использованием эффекта спин-орбитального взаимодействия. Необходимость синтеза новых квазидвумерных материалов и систем на их основе для использования в устройствах энергоэффективной и быстродействующей электроники и определяет высокую актуальность данной работы.

Новизна исследования и полученных результатов

Практически все представленные в работе результаты являются оригинальными. К числу наиболее важных из них, определяющих научную новизну работы, можно отнести следующие:

- экспериментальное наблюдение спин-поляризованных поверхностных резонансов $W(110)$ с линейной дисперсией и спиновой структурой, характерной для топологических поверхностных состояний;

- эффект гигантского расщепления Рашибы в графене на монослое Au, неполном монослое Pt и на подложке Pt(111), не достижимый в изолированном графене;

- двумерный фотовольтаический эффект в магнитно-допированных тройных топологических изоляторах, величина которого зависит от расположения точки Дирака относительно уровня Ферми и края валентной зоны;

- немонотонный характер изменения величины запрещенной зоны с увеличением концентрации магнитной примеси в полупроводнике $BiTeI$;

- синтез эпитаксиального нанотонкого сплава Pt_5Gd посредством интеркаляции атомов гадолиния под графен на Pt(111);

- синтез высокоориентированного однодоменного графена на $Co(0001)$ методом химического парофазного осаждения;

- синтез квазисвободного графена на магнитном ультратонком слое силицидов кобальта со стехиометрией $CoSi/CoSi_2$ в результате интеркаляции атомов кобальта под нулевой слой графена на $SiC(0001)$;

- синтез магнитно-спин-орбитального графена с индуцированными спин-орбитальным и обменным взаимодействиями путем интеркаляции атомов золота под графен на $Co(0001)/W(110)$. Обнаружено асимметричное по величине спиновое расщепление π электронных состояний графена в окрестностях противоположных точек \bar{K} зоны Бриллюэна;

- ферромагнитное упорядочение на двух подрешетках магнитно-спин-орбитального графена с n-типом допирования. Теоретически предсказан электрооптический эффект появления напряжения Холла различной

поляризации в зависимости от направления циркулярной поляризации падающего ИК излучения.

Высокая степень **достоверности** полученных результатов обеспечивается:

- воспроизводимостью полученных результатов в различных экспериментах и на различных образцах;

- использованием современного оборудования мирового уровня и применением широкого спектра взаимодополняющих методов, а также согласием с результатами теоретических расчетов и с результатами, полученными другими авторами на основании опубликованных статей по теме диссертации;

- широкой апробацией основных научных результатов на российских и международных научных семинарах, школах и конференциях;

- экспертизой опубликованных статей по теме диссертации в научных рецензируемых изданиях, в том числе Q1 и Q2 квартилей.

Значимость полученных результатов для науки и практики

В диссертационной работе А.Г. Рыбкина получен обширный экспериментальный материал по способам формирования высококачественных систем на основе новых квазидвумерных материалов (графена, ультратонких слоев металлов, топологических изоляторов и других систем с поверхностными электронными состояниями), в которых в максимальной степени проявляются уникальные свойства, обеспечивающие совместное усиление спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий. На основе разработанных подходов формирования квазидвумерных систем и всестороннего исследования их электронной, магнитной и кристаллической структур обнаружены эффекты, пригодные для практического использования в устройствах спинтроники, такие как гигантский эффект Рашбы в графене, гигантский двумерный фотовольтаический эффект в топологических изоляторах, спин-зависимый эффект “непересечения” в ультратонких слоях металлов, эффект магнитной близости в квазисвободном графене, эффект линейного магнитного дихроизма в поверхностном сплаве Au/Co и др. Разработанные модели спиновых электронных устройств, графеновый спиновый фильтр, устройство записи информации для магниторезистивной оперативной памяти и инфракрасный детектор циркулярно-поляризованного излучения, могут быть использованы в области спинтроники и оптоэлектроники.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

В работе синтезированы и исследованы новые системы на основе графена, ультратонких слоев металлов, магнитно-допированных топологических изоляторов и BiTeI , которые могут быть использованы для организации бездиссипативного электронного транспорта, хранения и обработки информации. Разработанные методы синтеза могут быть внедрены в Московском государственном университете, Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), Академическом университете им. Ж. И. Алфёрова (г. Санкт-Петербург), Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (г. Москва), Московском физико-техническом институте, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск) и других институтах РАН.

Исследования электронных и магнитных свойств систем на основе графена, благородных и магнитных металлов могут быть использованы при проектировании и производстве магниторезистивной памяти SOT-MRAM (ООО «Крокус Нанoeлектроника»), магнитных туннельных переходов и гетероструктур с эффектами близости (группа компаний AMT&C) и интегральных электронных схем на подложке SiC (АО «Светлана-Рост»).

Замечания по работе

В качестве замечаний по тексту диссертации можно высказать следующее:

1. Зачастую автор пренебрегает знаками препинания, пропускает подлежащее или сказуемое в предложениях. В результате смысл некоторых утверждений становится совершенно не понятным.
2. Иногда в тексте попадаются странные фразы, смысл которых непонятен. Например: «...измеренная спиновая поляризация электронных состояний является свойством основного состояния...». Только измеренная поляризация является свойством?
3. «исследования внесли вклад в понимание механизмов формирования внутреннего магнитного упорядочения и ассоциированной с ним запрещенной зоны в магнитно-допированных полупроводниках типа Рашбы» Что за полупроводники типа Эммануила Иосифовича Рашбы?
4. «...покрытого хорошо ориентированным графеном...». Что такое хорошо ориентированный графен?

Сделанные замечания носят частный характер и не затрагивают

принципиальных положений и выводов диссертации, не снижают общей высокой оценки в целом.

Заключение

Диссертационное исследование является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы по синтезу квазидвумерных систем с комбинацией спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий, имеющей важное значение для развития спинтроники, в целом, и методов синтеза новых источников спин-поляризованных токов, в частности.

Диссертация Рыбкина А.Г. на тему «Синтез и электронная спиновая структура квазидвумерных систем с комбинацией спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий» удовлетворяет основным требованиям, установленным приказом от 19.11.2021 №11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Рыбкин А.Г. несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка не обнаружены.

Результаты диссертации заслушаны и обсуждены 2 декабря 2024 года на Низкоразмерном семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе, протокол № 29. На заседании присутствовало 45 специалистов, среди них 15 докторов наук, 20 кандидатов наук, аспиранты, студенты. Отзыв ведущей организации составлен на основе обсуждения содержания диссертационной работы.

Отзыв ведущей организации подготовил: главный научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе, доктор физ.-мат. Наук КОЧЕРЕШКО Владимир Петрович

Сопредседатель семинара: Член. Корр. РАН

главный научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, д.ф.-м.н., профессор ГЛАЗОВ М.М.

ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт-Петербург, 194021, ул. Политехническая, дом 26.


Кочерешко В.П.


Глазов Михаил Михайлович