

ОТЗЫВ

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

Актуальность данной диссертационной работы была обусловлена необходимостью не только разработки фундаментальных основ спинтроники, но и разработкой практических подходов для формирования высококачественных систем на основе новых квазидвумерных материалов, к которым относятся тонкие слои металлов, графен и топологические изоляторы. В данных материалах максимально проявляются уникальные свойства, обеспечивающие совместное усиление спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействия, что приводит к проявлению эффектов, пригодных для практического использования в устройствах спинтроники. Диссертационная работа направлена, в первую очередь, на исследование и анализ эффектов, необходимых для исследования систем на основе графена с высоким индуцированным спин-орбитальным взаимодействием и магнитными свойствами. Поэтому, помимо тщательных научных исследований в диссертации большое внимание уделено отработке методов формирования высококачественных систем на основе графена, где формируемые уникальные свойства и изучаемые эффекты проявляются в максимальной степени. Большое внимание уделено поиску возможного использования данных эффектов в современной спинтронике. Эпитаксиальный синтез наносистем на основе графена и подложки SiC является наиболее актуальной тематикой. Другим интересным направлением является использование графена в качестве вспомогательного материала для синтеза наноразмерных систем путем интеркаляции атомов под графен. Кроме того, интерес вызывают исследования полупроводниковых материалов и топологических изоляторов с сильным спин-орбитальным взаимодействием и эффектов взаимодействия лазерного излучения с топологическими изоляторами. Все выше изложенное послужило автору основой для формулировки цели и задач данной работы.

Диссертационная работа **Рыбкина А.Г.** посвящена исследованию фундаментальных основ и разработке практических подходов для формирования высококачественных систем на основе новых квазидвумерных материалов, в которых в максимальной степени проявляются уникальные свойства, обеспечивающие совместное усиление спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий, и эффекты, пригодные для практического использования в современной спинтронике.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка сокращений, списка цитированной литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Полный объем диссертации составляет 315 страниц, включая 97 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 560 наименований.

Апробация результатов подтверждена выступлениями автора на двенадцати международных и четырех российских конференциях.

Публикации автора диссертации насчитывают 23 работы. Из них 18 относятся к списку Scopus и Web of Science. Автором опубликованы работы в журналах: Nature Communications, Nano Letters, Physical Review Letters, Physical Review B, Applied Surface Science, Nanotechnology, Scientific Reports, Symmetry, 2D Materials, New Journal of Physics, Письма ЖЭТФ и Физика твердого тела.

В работе получен целый ряд новых оригинальных результатов, определяющих **научную новизну** диссертации, среди которых можно отметить:

1. Спин-поляризованные поверхностные резонансы монокристалла W(110) с линейной дисперсией и спиновой структурой, характерной для топологических поверхностных состояний. Показана возможность передачи сильного спин-орбитального взаимодействия подложки W(110) квантовым электронным состояниям в ультратонком слое Al.

2. Гигантский эффект Рашбы, приводящий к индуцированной спиновой поляризации электронных состояний в графене при его контакте с интеркалированными слоями благородных металлов (Au, Pt).

3. Ферромагнитное упорядочение на двух подрешетках магнитно-спин-орбитального графена и предсказание эффекта Холла с использованием циркулярного дихроизма.

4. 2D фотовольтаический эффект, величина которого зависит от положения точки Дирака относительно уровня Ферми и края валентной зоны, для магнитно-допированных тройных топологических изоляторов.

5. Интеркаляция атомов Pt или Co под нулевой слой углерода на монокристалле SiC(0001) приводит к трансформации нулевого слоя в монослой графена.

6. Немонотонный характер изменения величины запрещенной зоны с увеличением концентрации примеси для магнитно-допированных полупроводников BiTeI

Практическая значимость работы состоит в разработке методов синтеза квазидвумерных систем на основе графена, теллуриодида висмута и топологических изоляторов с включением атомов благородных и магнитных металлов, приводящих к проявлению электронных свойств, необходимых для применения в наноэлектронике и спинтронике. Подтверждением этому соавторство Рыбкина А.Г. в 3 патентах по моделям устройств спинтроники и наноэлектроники: графеновый спиновый фильтр, устройство записи информации для магниторезистивной оперативной памяти, инфракрасный детектор циркулярно-поляризованного излучения на основе графена

Обоснованность и достоверность основных результатов и выводов диссертации **Рыбкина А.Г.** обеспечиваются корректностью постановки задач работы, высоким уровнем используемой экспериментальной техники в сочетании с мощными спектроскопическими методиками, воспроизводимостью экспериментальных результатов и профессиональным применением современных научных концепций анализа экспериментальных данных, а также согласием с результатами теоретических расчетов и с результатами, полученными другими авторами на основании опубликованных статей по теме диссертации.

Диссертация построена логично, изложена грамотным языком и хорошо иллюстрирована. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. К

сожалению, автору не удалось полностью избежать опечаток, чрезмерного увлечения аббревиатурами и неудачных формулировок.

При знакомстве с диссертационной работой возникли следующие вопросы:

1) В какой приповерхностной области локализованы интерфейсные состояния для ультратонких слоев алюминия на $W(110)$? Приводит ли эффект "непересечения" дисперсий квантовых электронных и интерфейсных состояний в слоях алюминия на $W(110)$ к изменению пространственной области локализации соответствующих волновых функций?

2) В работе показано, что при интеркаляции неполного монослоя платины под нулевой слой графена на $SiC(0001)$ наблюдается гигантский эффект Рашбы. При этом величина спинового расщепления больше, чем для графена на монокристалле $Pt(111)$, то есть формирование разреженного слоя из атомов платины под графеном приводит к более сильному эффекту Рашбы. Ожидается ли увеличение спин-орбитального расщепления в графене в случае осаждения атомов благородного металла на его поверхность?

3) Для магнитно-спин-орбитального графена показана асимметрия спинового расщепления в противоположных K точках зоны Бриллюэна графена в случае намагниченности тонкого слоя кобальта в плоскости поверхности. Будет ли данный эффект наблюдаться в случае намагниченности перпендикулярно поверхности?

Сделанные выше замечания и сформулированные вопросы не снижают научной ценности работы и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы, которая выполнена на высоком теоретическом и экспериментальном уровнях. По **актуальности** темы, **объему** и **достоверности** представленных результатов, глубине и **значимости** выводов работа полностью соответствует уровню диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Подводя итог всему вышеизложенному можно заключить, что диссертация Рыбкина А.Г. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработаны не только фундаментальные основы, но и практический подход для формирования высококачественных систем на основе новых квазидвумерных материалов (графена, ультратонких слоев металлов, топологических изоляторов, других систем с поверхностными электронными состояниями), обладающих уникальными свойствами, обеспечивающими совместное усиление спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий. Данную работу можно квалифицировать как **научное достижение**, позволившее на основе разработанных подходов формирования высококачественных систем и всестороннего исследования их электронной, магнитной и кристаллической структур выявить 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. В качестве примера разработаны модели спиновых электронных устройств с использованием указанных выше эффектов – графеновый спиновый фильтр,

устройство записи информации для магниторезистивной оперативной памяти (реверсный переключатель намагниченности спиновым током) и инфракрасный детектор циркулярно-поляризованного излучения. Изобретения предназначены для использования в области спинтроники и оптоэлектроники.

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, профессор,
профессор с возложенными обязанностями
заведующего кафедрой электроники твердого тела
Санкт-Петербургского государственного университета

Дата 10.03.2025



Барабан А.П.



10.03.2025

