

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Уздина Валерия Моисеевича 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 разработке методов синтеза и экспериментального изучения новых квазидвумерных материалов, в которых наряду с магнитными обменными взаимодействиями проявляются сильные спин-орбитальные эффекты. В работе показано, что это приводит к уникальным электронным свойствам, представляющим большой интерес для приложений в квантовой электронике, для разработки алгоритмов и реализации квантовых вычислений, а также для создания разнообразных спинтронных устройств. На основании проведенных автором исследований предложены *научно обоснованные технические и технологические решения*, внедрение которых может внести существенный вклад в практическое развитие науки и технологий, связанных с применением магнитных наноструктур в электронной промышленности страны.

В диссертации, методом спин-разрешенной фотоэлектронной микроскопии, изучено влияние, оказываемое подложкой с сильным спин-орбитальным взаимодействием, на спин-зависящие квантово-размерные эффекты в ультратонких слоях металлов. С помощью широкого спектра экспериментальных методов исследованы эффекты, обусловленные спин-орбитальным взаимодействием в графене, полупроводниковых материалах, топологических изоляторах. Автором разработаны модели устройств, на основе новых низкоразмерных материалов, для применения в спинтронике и наноэлектронике. Здесь особый интерес представляют приведенные в диссертации исследования по изучению гигантского эффекта Рашбы в графене, двумерного фотовольтаического эффекта в топологических изоляторах, эффекта ферримагнитного упорядочения в графене и другие.

Проведенные эксперименты включали не только исследование свойств имеющихся образцов, но и синтез новых квазидвумерных материалов с варьируемыми параметрами спин-орбитального и обменного взаимодействия. Это важно и *актуально* не только для развития фундаментальной науки, но и для практических целей, поскольку позволяет получить новые материалы, в том числе с топологически нетривиальными характеристиками, сокращая разрыв между теоретическими предсказаниями и реальными применениями в области энергоэффективной электроники с низким рассеиванием энергии и устойчивыми платформами квантовых вычислений. В частности, квазидвумерные системы с комбинацией сильного спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий при контакте со сверхпроводниками являются перспективными объектами для экспериментальной реализации майорановских фермионов и построения твердотельных топологических кубитов на их основе. Отдельно следует отметить, что высокий потенциал *практического применения* полученных в рамках проведенных исследований результатов подтверждается разработанными моделями устройств электроники, зарегистрированными в трех российских патентах.

Диссертация А.Г. Рыбкина является законченным исследованием, представляющим собой результат многолетней работы автора в одной из наиболее конкурентных и активно развивающихся областей физики конденсированного состояния, связанной с низкоразмерными магнитными структурами. Значительная часть исследований была выполнена на уникальной научной установке “Нанолаб”, которая была создана при непосредственном участии А. Г. Рыбкина. *Достоверность и научная значимость* полученных в диссертации результатов подтверждается использованием современного оборудования мирового уровня, в том числе установок класса «мегасайенс», и применением широкого набора взаимодополняющих экспериментальных методов, а также согласием с результатами проведенных теоретических расчетов и с данными, полученными другими авторами. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых российских и международных изданиях, в том числе в Nano Letters, Nature Communications и Physical Review Letters, и представлены в докладах на профильных научных конференциях. Следует отметить, что А.Г. Рыбкин не только синтезировал и исследовал новые квазидвумерные материалы, но в его работах имеется теоретическое описание электронных и структурных особенностей этих систем, необходимое для адекватной интерпретации эксперимента. Такое сочетание экспериментальных и теоретических подходов является важной чертой современных передовых исследований в области материаловедения, поскольку позволяет не только достичь глубокого понимания свойств полученных материалов, но и спроектировать и создать материалы с заданными свойствами для применения в электронике.

Диссертация в целом производит весьма благоприятное впечатление. Вместе с тем, по ее содержанию имеется ряд замечаний, которые, однако, не имеют принципиального значения с точки зрения соответствия работы требованиям к диссертационной работе:

1. Хотя диссертация написана достаточно ясным языком и хорошо иллюстрирована, она содержит некоторые неудачные утверждения, которые можно отнести к опечаткам, особенно в области теоретического описания. Например, на стр. 49 при введении модели Хаббарда про кулоновский интеграл  $U$  написано, что это «сила отталкивания электронов в узле» («the repulsive force of electrons at the site» в английской версии), хотя из (1.9) куда эта величина входит, ясно, что она имеет размерность энергии. На стр. 42, модель коллективизированного магнетизма Стонера описывается так, что создается впечатление, что она относится к газу свободных электронов во внешнем поле, что на самом деле не так, хотя потом приводится критерий Стонера, в котором параметр обменного взаимодействия называют почему-то параметром «электрон-электронного» взаимодействия. Далее, на стр. 43 утверждается, что наиболее подходящей для расчета температуры Кюри в переходных металлах является модель Хаббарда, хотя известно, что модели коллективизированных электронов, такие, как модель Хаббарда, особенно в приближении среднего поля, не могут адекватно описывать именно область вблизи точки фазового перехода и точку Кюри.
2. Представляло бы большой интерес сравнить полученные результаты, например для графена на поверхности тяжелого металла с данными других авторов, использующих альтернативные методики. В частности, графен на поверхности тяжелого металла (Ir и др.) исследовался методами туннельной спектроскопии с атомным разрешением группой Вайзендангера. Там отмечалась неоднородность состояний вдоль поверхности. Как это проявилось бы на используемых экспериментальных методиках

и будут ли аналогичные эффекты на изучаемых в работе системах было бы очень интересно обсудить.

3. Для использования структур, изучаемых в диссертации при разработке новых технологий важно, чтобы структуры были устойчивы относительно тепловых флуктуаций и случайных воздействий, а их свойства были бы не слишком чувствительны к малой шероховатости интерфейсов, локальным дефектам и отклонениям структуры от идеальности, всегда присутствующей при производстве, особенно в больших объемах. Эти вопросы стоило бы осветить несколько подробнее в связи с их важностью для практики. В частности, для запатентованных устройств, какие характеристики – температура, структура с атомным разрешением или другие являются критическими?

Приведенные выше вопросы можно рассматривать как пожелания, не затрагивающие основные положения, выносимые на защиту и общую положительную оценку работы.

Резюмируя, считаю, что 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 физ.-мат. наук, профессор,  
Профессор физического  
факультета СПбГУ



Уздин В. М.

05.03.2025