

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Вывенко Олега Федоровича 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.

Квазидвумерные материалы играют ключевую роль в развитии спинтроники и квантовых вычислений благодаря своим уникальным электронным и спиновым свойствам. В спинтронике, которая использует спин электронов для передачи и обработки информации, такие материалы позволяют эффективно управлять спиновыми состояниями за счет спин-орбитального взаимодействия и магнитного обменного взаимодействия. Это открывает возможности для создания устройств с низким энергопотреблением и высокой скоростью работы, таких как спиновые транзисторы, спиновые вентили и фильтры. В области квантовых вычислений квазидвумерные материалы, особенно те, которые обладают топологически защищенными состояниями, представляют особый интерес. Например, топологические изоляторы и материалы с эффектом Рашбы могут служить основой для реализации топологических кубитов с высокой устойчивостью к декогеренции.

Диссертация А.Г. Рыбкина посвящена разработке методов синтеза и изучению новых квазидвумерных материалов с уникальной электронной структурой, связанной с усилением спин-орбитального и магнитного обменного взаимодействий. На основе вышесказанного, тема диссертации А.Г. Рыбкина представляется, несомненно, **актуальной**. Существующие технологии получения квазидвумерных материалов с топологически нетривиальными характеристиками затрудняют использование этих материалов в области бездиссипативной электроники, так как зачастую связаны с трудоемкими процессами, такими как эксфолиация и перенос на диэлектрическую подложку. Разработка новых методов синтеза квазидвумерных материалов с использованием процессов самосборки на атомном уровне представляет собой одну из ключевых задач в данном направлении. Другим важным аспектом диссертации является наблюдение экспериментальных эффектов пригодных для практического использования в современных устройствах электроники на основе эффекта спин-орбитального крутящего момента, эффекта Рашбы-Эдельштейна, спин-гальванического эффекта и других.

**Новизна** исследований состоит, в первую очередь, в систематическом исследовании новых квазидвумерных материалов, что позволило экспериментально обнаружить новые физические эффекты и закономерности. Так, в результате проведенных исследований спинового расщепления электронных состояний графена на ферромагнетиках и немагнитных *sp* и *d* металлах был обнаружен эффект индуцированной спиновой поляризации электронных состояний графена. С другой стороны, систематические исследования двумерного фотовольтаического эффекта в магнитно-допированных тройных топологических изоляторах позволило выявить зависимость величины напряжения от расположения точки Дирака относительно уровня Ферми и края валентной зоны. Важным достоинством работы является привлечение не только современных экспериментальных методов исследования, но и теоретических подходов, что обеспечивает не только высокую **достоверность** полученных результатов, но и более

полное описание наблюдаемых в работе эффектов и особенностей электронной структуры.

В ходе исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, получены принципиально новые научные результаты, включая следующие:

- 1) гигантский эффект Рашбы в графене, заключающийся в спин-орбитальном расщеплении  $\pi$  состояний графена при контакте с тяжелым  $d$  металлом ( $Z=78,79$ );
- 2) магнитно-спин-орбитальный графен, обладающий сильным индуцированным спин-орбитальным и обменным взаимодействиями. Показано, что намагничивание подложки кобальта в плоскости поверхности приводит к асимметричному спиновому расщеплению  $\pi$  состояний графена в противоположных  $K$  точках зоны Бриллюэна графена. Обнаружено ферромагнитное упорядочение на двух подрешетках  $n$ -допированного графена;
- 3) гигантский двумерный фотовольтаический эффект в магнитно-допированном топологическом изоляторе с высокой заполненностью состояний верхнего конуса Дирака и точкой Дирака, расположенной внутри фундаментальной запрещенной зоны;
- 4) методы высокотемпературного синтеза графена на подложках  $\text{Co}(0001)/\text{W}(110)$  и  $\text{Pt}(111)$ , позволяющие синтезировать графен с однодоменной кристаллической структурой.

Автор диссертации опубликовал 23 работы по теме диссертации, из которых 18 входят в базы данных Web of Science и Scopus. Среди журналов, в которых опубликованы работы автора, находятся высокорейтинговые издания, такие как Nature Communications, Nano Letters, Physical Review Letters, Physical Review B, Applied Surface Science, 2D Materials, Scientific Reports и другие. Результаты исследований были представлены и апробированы на двенадцати международных и четырех российских конференциях.

При знакомстве с диссертационной работой Рыбкина Артема Геннадиевича возникли следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации не указаны геометрические размеры исследованных образцов в сравнении с пучком зондирующего излучения. В связи с этим возникает вопрос об их однородности по поверхности и тем самым, о степени воспроизводимости результатов при возбуждении фотоэлектронов в разных точках.
2. Также в диссертации отсутствует описание технологии получения образцов топологических изоляторов (ТИ), деталей подготовки их поверхности, а также их электрических свойств. Различие в электропроводности или в спектре поверхностных состояний в ТИ различного состава может, как известно, изменять величину ФГЭ.
3. Явление, когда при пересечении двух термов одинаковой симметрии они оказываются раздвинутыми и каждая из дисперсионных кривых становится продолжением другой хорошо известно (см. Ландау, Лифшиц Квантовая механика, М.1948г) и уже много лет назад в русскоязычной литературе стало принято называть их псевдоперечением. При этом приоритет работ по изучению этого явления, которой признан во всем мире, принадлежит ученым нашего физфака и, в

первую очередь, профессору Мария Павловна Чайка, чья докторская диссертация на эту тему была защищена в 1985 году.

Автор вместо этого использует в диссертации термин «непересечение», который звучит несколько двусмысленно, что видимо, происходит от несколько неудачного перевода с термина «Anti-crossing», взятого из названия цитируемой в диссертации статьи на английском языке (ссылка [146]), который исторически появился как перевод с русского.

Приведенные замечания не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы, в которой получено новое решение актуальной фундаментальной научной задачи и которая открывает новые перспективы использования квазидвумерных структур в приложениях.

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 ему ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка не обнаружены.

Член диссертационного совета  
Доктор физ.-мат. наук,  
профессор по специальности  
физика твердого тела,  
профессор СПбГУ



Вывенко Олег Федорович

24.03.2025