

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Барабана Александра Петровича на диссертацию Естюнина Дмитрия Алексеевича на тему «Электронная, спиновая структура и магнитные свойства собственных магнитных и магнитно-легированных топологических изоляторов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Разработка эффективных методик формирования и управления свойствами топологических квантовых материалов, в частности магнитных топологических изоляторов, детальная диагностика атомных и электронных свойств исходных и модифицированных структур, а также их успешное применение в наноэлектронике и спинтронике для создания различных устройств с низким энергопотреблением, является в настоящее время одним из важнейших направлений исследований в физике конденсированного состояния и научном материаловедении.

Отличительной особенностью данных материалов является наличие электронных топологических поверхностных состояний, устойчивых к внешним возмущениям благодаря топологической защищенности. В магнитных топологических изоляторах комбинация топологических свойств электронной структуры и магнетизма приводит к появлению ряда новых свойств и эффектов, например таких, как квантовый аномальный эффект Холла. В данном состоянии в магнитном топологическом изоляторе возникают состояния краевой проводимости, по которым может осуществляться транспорт спин-поляризованных электронов без рассеяния на макроскопическом расстоянии. Поскольку в магнитных топологических изоляторах для реализации состояния квантового аномального эффекта Холла внешнее магнитное поле не требуется, подобные системы могут найти широкое применение в электронике с низким энергопотреблением, а также квантовых компьютерах. Основным условием перехода топологического изолятора в состояние квантового аномального эффекта Холла является нарушение симметрии за счет магнетизма и открытие энергетической запрещенной зоны в точке Дирака в структуре топологических поверхностных состояний. При этом наиболее изученным способом для реализации магнетизма в топологических изоляторах на данный момент является магнитное легирование.

Диссертационная работа Естюнина Д.А. посвящена комплексному анализу особенностей электронной и спиновой структуры, а также магнитных свойств магнитно-легированного топологического изолятора со стехиометрией $(\text{Gd}_{0.06}\text{Bi}_{1.09}\text{Sb}_{0.85}\text{Te}_3)$ и семейства собственных магнитных $\text{MnBi}_2\text{Te}_4(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_m$ ($m = 0, 1, 2$) для оценки перспективности использования данных материалов в спинтронике и, вне всякого сомнения, является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы. Полное изложение диссертации на русском языке содержит 158 страниц, что включает 1 таблицу и 51 рисунок. Список процитированной литературы содержит 137 ссылки.

В работе получен целый ряд новых интересных результатов, определяющих **научную новизну и практическую ценность** диссертации, среди которых можно отметить:

- для магнитных топологических изоляторов $\text{MnBi}_2\text{Te}_4(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_m$ ($m = 0, 1, 2$) был установлен антиферромагнитный тип взаимодействия и показано, что с увеличением числа немагнитных блоков (m) наблюдается постепенное уменьшение температуры магнитного упорядочения от $T = 25$ К ($m = 0$) до $T = 13$ К ($m = 1$) и $T \approx 11-12$ К ($m = 2$). Для соединений с большим m наблюдается переход к ферромагнитному типу взаимодействия.

- установлено, что в электронной структуре магнитно-легированного топологического изолятора $\text{Gd}_{0.06}\text{Bi}_{1.09}\text{Sb}_{0.85}\text{Te}_3$ присутствуют топологические поверхностные состояния с геликоидальной спиновой структурой, расположенные вблизи уровня Ферми. Выявлено наличие энергетической запрещенной зоны в точке Дирака, величина которой (~ 30 мэВ) практически не изменяется в диапазоне температур от 1 К до 300 К, что необходимо для практической реализации квантового аномального эффекта Холла в магнитных топологических изоляторах.

- детальное исследование температурной зависимости особенностей электронной структуры исследуемых магнитных топологических изоляторов в результате которого определена зависимость величины расщепления состояний $\text{Te } p_z$ в зоне проводимости MnBi_2Te_4 от температуры и ее уменьшение до нуля при температурах выше температуры магнитного упорядочения. Показано, что на основе анализа зависимости величины расщепления $\text{Te } p_z$ состояний от температуры можно оценить температуру магнитного упорядочения непосредственно из фотоэлектронных спектров.

- показано, что вариации величины энергетической запрещенной зоны в точке Дирака от единиц до десятков мэВ для различных образцов MnBi_2Te_4 обусловлены наличием и концентрацией структурных дефектов вблизи поверхности.

Работа представляет собой **законченное исследование**, в ходе которого были получены результаты, демонстрирующие возможность управления энергетической структурой Дираковского конуса в магнитных топологических изоляторах с различным составом для оптимизации процессов генерации спин-поляризованных токов и их бездиссипативного транспорта, и являющиеся основой для разработки новых устройств спинтроники с низким энергопотреблением.

Обоснованность и достоверность основных результатов и выводов диссертации **Естюнин Д.А.** обеспечиваются корректностью постановки задач работы, высоким уровнем используемой экспериментальной техники в сочетании с

мощными спектроскопическими методиками, профессиональным применением современных научных концепций анализа экспериментальных данных.

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 и замечания:

1. В главе 3 (рис.3.7) для получения информации об электронной структуре состояний в зоне проводимости, которая изначально находится выше уровня Ферми в легированном Gd топологическом изоляторе, использовалось напыление калия на поверхность. Проводился ли анализ влияния калия на электронную структуру топологического изолятора?
2. В главе 4 (рис. 4.4d) показана температурная зависимость магнитной восприимчивости от температуры для MnBi_2Te_4 . На данной зависимости присутствует дополнительный переход вблизи 10 К. Как утверждается в работе, данный переход связан с наличием ферромагнитного порядка в системе. Каким образом это проявляется в зависимости намагниченности от приложенного магнитного поля?
3. В главе 5 достаточно подробно обсуждаются температурные изменения только в зоне проводимости. Наблюдаются ли изменения электронной структуры в валентной зоне при изменении температуры?
4. В главе 8 разбирается влияние ионизованных атомов и молекул остаточных газов, адсорбированных на поверхность топологического изолятора. Насколько стабильны наблюдаемые изменения электронной структуры? Какая требуется подготовка поверхности для сохранения и/или восстановления исходной электронной структуры?
5. В главе 7 представлено исследование топологических изоляторов семейства $\text{MnBi}_2\text{Te}_4(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_m$. Для данных образцов проанализированы магнитные свойства и представлена электронная структура поверхности (возможные терминации). Однако ничего не сказано о спиновой структуре. Что можно сказать по этому поводу?

Сделанные выше замечания 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 кандидата физико-математических наук.

Полученные автором результаты представлены в семи статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных РИНЦ, Web of Science и Scopus и многократно были им представлены и обсуждены на конференциях.

Считаю, что диссертация **Естюнина Дмитрия Алексеевича** тему: «Электронная, спиновая структура и магнитные свойства собственных магнитных и магнитно-легированных топологических изоляторов» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель **Естюнин Дмитрий Алексеевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по 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

06.06.2023

Барабан А.П.



06.06.2023



Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>