

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Филатовой Елены Олеговны 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.

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в физике конденсированного состояния является создание наносистем с эффективным управлением бездиссипативными спиновыми токами с высокой степенью спиновой ориентации и использование спинового состояния электрона для хранения и переноса информации на основе материалов, характеризующихся Дираковским конусом электронных состояний с геликоидальной спиновой структурой. Данный тип электронных состояний характерен для поверхностных состояний топологических изоляторов, материалов с явно выраженной запрещенной зоной в объеме и топологически-защищенными квазиметаллическими поверхностными состояниями на поверхности с линейной дисперсией на уровне Ферми. Специфика спиновой структуры топологических состояний обеспечивает бездиссипативный канал транспорта электронов на уровне Ферми, что обеспечивает протекание спиновых токов по поверхности топологических изоляторов практически без потерь энергии, что и делает их весьма перспективными материалами для спинтроники и энергосберегающих технологий.

В последнее время повышенный интерес проявляется к поиску и исследованию подходящих магнитных легирующих элементов для топологических изоляторов, а также развитию новых подходов для реализации магнитного топологического изолятора с целью увеличения запрещенной зоны в точке Дирака. Индуцирование магнитного поля внедренными магнитными примесями в топологических изоляторах может приводить к квантовому аномальному эффекту Холла в результате открытия магнитной щели в точке Дирака, что открывает новые перспективы их практического использования.

В этой связи, работа Естюнина Д.А., посвященная детальному изучению особенностей электронной и спиновой структуры, а также магнитных свойств магнитно-легированного топологического изолятора и собственного магнитного топологического изолятора для оценки перспективности их использования в спинтроники **крайне важна** и представляется несомненно **актуальной**.

Работа представляет собой законченное исследование, в ходе которого применен комплексный подход к анализу данных с привлечением как теоретических расчетов,

выполненных в рамках теории функционала плотности (DFT), так и широчайшего класса экспериментальных методов исследования, включающих фотоэлектронную спектроскопию с угловым разрешением (ФЭСУР), реализованную как при использовании лазерного излучения ($h\nu=6.3$ эВ и 7 эВ), так и синхротронного (диапазон энергий $9 - 160$ эВ) как линейно поляризованного, так и циркулярно поляризованного излучения; фотоэлектронную спектроскопию со спиновым разрешением; резонансную фотоэлектронную спектроскопию; сверхпроводящий квантовый интерферометр СКВИД-магнитометра, позволяющий исследовать магнитные свойства материалов, а также метод рентгеновского магнитного циркулярного дихроизма (РМЦД), дополненных методами дифракции рентгеновского излучения и атомно-силовой микроскопии. С целью анализа температурных изменений, а также уменьшения влияния тепловых эффектов на электронную структуру рассматриваемых объектов, все исследования методом ФЭСУР проводились при охлаждении образцов жидким гелием. Следует подчеркнуть, что Естюнин Д.А. также провел детальный анализ влияния ионизирующего излучения на электронную структуру изученных топологических изоляторов методом фотоэлектронной спектроскопии, что подчеркивает высокую **достоверность** полученных в работе результатов.

Реализация всех перечисленных методов позволила провести всесторонний анализ электронной и спиновой структуры, а также магнитных свойств двух типов магнитных топологических изоляторов: топологического изолятора со стехиометрией $(\text{Gd}_{0.06}\text{Bi}_{1.09}\text{Sb}_{0.85}\text{Te}_3)$ и семейства собственных магнитных топологических изоляторов $\text{MnBi}_2\text{Te}_4(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_m$.

Важным **достоинством работы**, которое отчасти определило успех проведенного исследования, является выбор Gd, обладающего большим магнитным моментом по сравнению с традиционно используемыми для легирования V и Cr, в качестве легирующей примеси для получения магнитно-легированного топологического изолятора. А также выбор нового и более эффективного способа реализации магнетизма в топологических изоляторах: встраивание упорядоченной структуры магнитных атомов непосредственно в кристаллическую решетку топологического изолятора. Данный подход обеспечивает значительно более высокую однородность распределения магнитных атомов внутри топологического изолятора и, как следствие, магнитных свойств.

На мой взгляд особый интерес представляют следующие результаты:

- 1) Обнаружено, что величина экспериментально измеряемой энергетической запрещенной зоны в точке Дирака в MnBi_2Te_4 изменяется от единиц до десятков мэВ и зависит от наличия структурных дефектов.

2) В работе установлено, что в семействе $(\text{MnBi}_2\text{Te}_4)(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_m$ для $m \geq 3$ исчезает обменная связь между магнитными блоками. Несмотря на ферромагнитное упорядочение, обнаруженное при $T \approx 12\text{K}$, блоки MnBi_2Te_4 практически не взаимодействуют и, по сути, оказываются двумерными магнетиками.

3) Поскольку Рашба-подобные поверхностные состояния, обнаруженные ранее в MnBi_2Te_4 , существенно гибридизованы с топологическими поверхностными состояниями вблизи уровня Ферми, они долгое время были неразделимыми в эксперименте. Естюнину Д.А. удалось поставить эксперимент таким образом, чтобы выявить причину появления Рашба-подобных состояний, обусловленную изначально сильным изгибом зон на $(\text{MnBi}_2\text{Te}_4)$ -терминированной поверхности.

В прикладном аспекте следует отметить, что обнаруженная возможность управления электронными свойствами топологических поверхностных состояний и магнитной структурой при изменении количества блоков Bi_2Te_3 в семействе $(\text{MnBi}_2\text{Te}_4)(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_m$ может быть использована в различных прикладных задачах, например, для создания серии спиновых магнитных переключателей с различным уровнем срабатывания, где требуется модуляция магнитных свойств топологических изоляторов в широком диапазоне. Полученные Естюниным Д.А. результаты создают основу для будущих исследований многих топологических изоляторов, в частности, установленное влияние ионизирующего излучения на электронную структуру топологических изоляторов позволит улучшить экспериментальный подход к их исследованию.

Использование современной хорошо апробированной экспериментальной измерительной техники, в том числе исследовательских станций на каналах вывода синхротронного излучения, позволило достичь высокой информативности исследований, а также обеспечить **достоверность** полученных результатов. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых международных научных журналах, что подтверждает достаточную **обоснованность** сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций.

Диссертация построена логично, изложена грамотным языком и хорошо иллюстрирована. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. К сожалению, автору не удалось избежать многочисленных опечаток, повторяющихся слов и неудачных формулировок.

При знакомстве с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. В гл.3 представлены исследования электронных, магнитных и структурных свойств топологического изолятора, легированного Gd, со стехиометрией

$Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$. В частности, проводится оценка величины энергетической запрещённой зоны в точке Дирака для дисперсионных картин $I(E, k_x)$. Исследования проведены на двух разных станциях, причем отмечается, что полученные результаты могут различаться именно по этой причине. Возникает вопрос в том, из каких соображений были выбраны температуры и почему нельзя было провести измерения для одной и той же температуры на двух станциях, взяв эту точку за реперную при анализе полученных результатов (с ростом температуры прослеживается уширение линий)? А если еще учесть, что измерения проводились для двух разных образцов, то напрашивается вопрос, что изучали?

2. “При помощи резонансной ФЭС было показано, что в валентной зоне, а также вблизи ТПС присутствует плотность состояний Gd. Данные состояния могут приводить к открытию ЭЗЗ за счет гибридизационных механизмов” - каких именно механизмов? Что под этим понимается?
3. В работе утверждается, что одной из возможных причин изменения величины запрещенной зоны в точке Дирака в $MnBi_2Te_4$ является изменение Ван-дер-Ваальсова промежутка. Однако представлены только теоретические оценки этого эффекта с использованием метода теории функционала плотности. Возникает вопрос, могут ли подобные изменения кристаллической структуры привести к аналогичным изменениям в реальных кристаллах $MnBi_2Te_4$? Как можно экспериментально подтвердить данную гипотезу?
4. В работе отмечается, что для достижения состояния квантового аномального эффекта Холла требуется, чтобы запрещенная зона в точке Дирака находилась на уровне Ферми. Однако в случае $MnBi_2Te_4$, $MnBi_4Te_7$ и $MnBi_6Te_{10}$ точка Дирака, согласно представленным результатам, значительно ниже уровня Ферми. Были ли проведены эксперименты с целью смещения точки Дирака для достижения желаемой электронной структуры материала?
5. Хочется поинтересоваться значением словосочетания “легкая ось намагничивания”.
6. Почему одноступенчатая модель названа двухступенчатой?

Сделанные выше замечания не снижают научной ценности работы и не влияют на общее положительное впечатление от диссертационной работы, которая выполнена на высоком экспериментальном уровне. По **актуальности** темы, **объему** и **достоверности** представленных результатов, **глубине** и **значимости** выводов работа полностью соответствует уровню диссертации на соискание степени кандидата 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 им представлены и обсуждены на конференциях. Уровень публикаций достаточно высокий.

Считаю, что диссертация Естюнина Дмитрия Алексеевича на 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», а соискатель Естюнин Дмитрий Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Председатель диссертационного совета
Доктор физико-математических наук, профессор,
Профессор Санкт-Петербургского
государственного университета



Филатова Е.О.

Дата 09.06.2023 г.