

**Отзыв научного руководителя на диссертацию Естюнина Дмитрия
Алексеевича «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.**

Диссертационная работа Естюнина Д.А. посвящена комплексному исследованию особенностей электронной, спиновой структуры и магнитных свойств различных типов магнитных топологических изоляторов (ТИ) – магнитно-легированного ТИ, когда объем ТИ легируется атомами магнитных металлов различной концентрации, и ряда собственных магнитных ТИ, когда магнитные атомы включены непосредственно в кристаллическую структуру магнитного ТИ. В качестве магнитно-легированного ТИ в работе был выбран Gd-легированный ТИ со стехиометрией $Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$, для которого точка Дирака в структуре топологических поверхностных состояний расположена вблизи уровня Ферми. В качестве собственного магнитного ТИ в диссертационной работе был выбран синтезированный недавно антиферромагнитный (АФМ) ТИ $MnBi_2Te_4$, а также семейство АФМ ТИ $(MnBi_2Te_4)(Bi_2Te_3)_m$, в структуре которых между магнитными семислойными блоками $MnBi_2Te_4$ вставляется ряд ($m=0,1,2,3,\dots$) пятислойных блоков немагнитного ТИ Bi_2Te_3 . Изменение количества пятислойных немагнитных блоков между магнитными приводит к модуляции магнитных свойств синтезированных ТИ и изменению особенностей их электронной структуры (в том числе для различных поверхностных терминаций). Сравнительное изучение особенностей электронной и спиновой структуры формируемых топологических поверхностных состояний и ближайших состояний валентной зоны и зоны проводимости данных типов магнитных ТИ, а также основных факторов их определяющих, и влияние этих особенностей на изменение их магнитных свойств и было основной задачей диссертационной работы Естюнина Д.А.

Исследования электронной и спиновой структуры магнитно-легированного топологического изолятора $Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$, проведенные в диссертационной работе показали, что для данного типа магнитно-легированного ТИ топологические поверхностные состояния расположены вблизи уровня Ферми. Данные состояния характеризуются геликоидальной спиновой структурой, а в точке Дирака открывается энергетическая запрещенная зона, которая локализована непосредственно на уровне Ферми, что необходимо для практической реализации квантового аномального эффекта Холла в магнитных ТИ. Проведенный анализ показал наличие запрещенной зоны в точке Дирака величиной около 30 мэВ, которая не зависит от температуры. При этом методом резонансной фотоэлектронной спектроскопии было показано частичное наличие плотности состояний Gd в валентной зоне, что может свидетельствовать о возможном влиянии гибридизационных эффектов на величину запрещенной зоны и ее независимость от температуры. Выявлено, что температура магнитного упорядочения для данного типа магнитного ТИ не превышает 1.5К.

Для АФМ ТИ MnBi_2Te_4 в рамках диссертационной работы были проведены детальные исследования изменений электронной структуры топологических поверхностных состояний, а также состояний зоны проводимости и валентной зоны в зависимости от температуры выше и ниже температуры магнитного упорядочения. Экспериментально было показано, что величина энергетической запрещенной зоны, открываемой в точке Дирака, может достигать 70 мэВ, что является важным фактором для высокотемпературной реализации квантового аномального эффекта Холла. При этом для разных образцов MnBi_2Te_4 была показана возможность изменения величины энергетической запрещенной зоны в точке Дирака от единиц до десятков мэВ. Проведенный в диссертационной работе анализ показал, что данные вариации величины энергетической запрещенной зоны в точке Дирака в первую очередь обусловлены наличием структурных дефектов вблизи поверхности и их различной концентрацией. В рамках диссертационной работы была детально исследована спиновая структура топологических поверхностных состояний для ориентации спинов, как вдоль, так и перпендикулярно поверхности, в том числе при изменении температуры ниже и выше температуры магнитного упорядочения.

Важной особенностью диссертационной работы, которая была инициирована непосредственно Естюниным Д.А. и лично им проведена, является детальное экспериментальное исследование и подробный анализ температурной зависимости особенностей электронной структуры исследуемых магнитных топологических изоляторов в диапазоне температур ниже и выше температуры магнитного упорядочения. С одной стороны, Естюниным Д.А. была экспериментально выявлена зависимость величины расщепления $\text{Te } p_z$ состояний в зоне проводимости от температуры, а также уменьшение данного расщепления вплоть до нуля при температурах выше температуры магнитного упорядочения. Естюнину Д.А. удалось исследовать характер этих изменений и построить соответствующую аналитическую зависимость, что позволило подтвердить магнитную природу этих изменений. Было показано, что величина расщепления $\text{Te } p_z$ состояний может быть использована в качестве индикатора температурной модуляции магнитных свойств и оценки температуры магнитного упорядочения непосредственного из анализа фотоэлектронных спектров. Полученное в результате анализа значение температуры Нееля (24.5К) совпадало с данными измерений сверхпроводящей магнитометрии. С другой стороны, Естюниным Д.А. было показано, что интенсивность топологических поверхностных состояний также зависит от температуры, и эти изменения также имеют магнитную природу. При этом в фотоэлектронном спектре в зоне проводимости вблизи уровня Ферми были обнаружены Рашба-подобные состояния, электронная структура которых оказалась чувствительной к магнитному упорядочению. Показано, что ниже температуры Нееля в точке пересечения Рашба парабол (точка Крамерса) формируется энергетическая запрещенная зона, величина которой зависит от температуры.

В рамках диссертационной работы Естюниным Д.А. были детально исследованы особенности электронной структуры и магнитных свойств магнитных топологических изоляторов из семейства $\text{MnBi}_2\text{Te}_4(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_m$ при $m=0-2$ и было показано, что данные ТИ характеризуются АФМ типом взаимодействия. Были экспериментально определены соответствующие критические температуры магнитных переходов и показано, что с

увеличением числа немагнитных блоков (m) для данного семейства ТИ наблюдается постепенное уменьшение температуры магнитного упорядочения от 24.5К ($m=0$) до 13К ($m=1$) и 11К ($m=2$). Для соединений с большим (m) наблюдается переход к ферромагнитному типу взаимодействия. В рамках диссертационной работы были экспериментально исследованы и проанализированы особенности электронной структуры топологических поверхностных состояний для всех возможных терминаций поверхности для ТИ из семейства $MnBi_2Te_4(Bi_2Te_3)_m$ и показана существенная зависимость электронной структуры и энергетического положения точки Дирака от терминации поверхности магнитным ($MnBi_2Te_4$) или немагнитным (Bi_2Te_3) блоком.

В дополнение, для подтверждения корректности проводимых исследований Естюниным Д.А. было проанализировано влияние облучения поверхности топологических изоляторов при адсорбции остаточных газов на электронную структуру топологических поверхностных состояний в процессе проведения измерений методом фотоэлектронной спектроскопии при различных вакуумных условиях. Представлены оценки влияния данного эффекта на точность измерения энергетической запрещенной зоны в точке Дирака.

Полученные в рамках диссертационной работы результаты показывают возможность управления уникальной структурой Дираковского конуса в магнитных топологических изоляторах с различным составом и могут быть использованы для оптимизации процессов генерации спин-поляризованных токов и их бездиссипативного транспорта при создании новых типов устройств спинтроники и нанoeлектроники с низким энергопотреблением.

При проведении экспериментальных исследований в рамках диссертационной работы Естюнин Д.А. использовал как возможности научного парка СПбГУ, так и проводил необходимые научные исследования в ведущих российских и международных центрах синхротронного излучения Японии, Италии и Германии. Для проведения таких исследований им были выиграны конкурсы на финансирование исследований в рамках программы академического обмена G-RISC, а также в рамках соглашения между СПбГУ и Университетом г. Хиросимы (Япония). Естюнин Д.А. принимал активное участие в выполнении проектов РФФИ и РФФИ, в котором он являлся одним из основных исполнителей. Использование лучшего современного оборудования позволило получить достоверные данные высокого качества.

Все представленные в диссертации исследования проведены автором лично, либо в соавторстве при его самом активном участии. Следует особо подчеркнуть высокую работоспособность и целеустремленность диссертанта, которые позволили провести исследования на самом высоком, мировом научно-техническом уровне исследований. Результаты исследований были представлены на международных конференциях и опубликованы в семи научных статьях в международных рецензируемых журналах. Необходимо отметить весомый вклад соискателя в написание текстов всех представленных в рамках диссертации научных статей. Сделанные в рамках диссертационной работы выводы в полной мере обоснованы, четко сформулированы и не вызывают сомнений.

Считаю, что Естюнин Д.А. успешно справился с поставленными перед ним научными задачами и завершил диссертацию раньше срока окончания аспирантуры.

Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация Естюнина Дмитрия Алексеевича удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, а ее автор заслуживает присвоения искомой степени.

06.03.2023

Д. ф.-м. н., профессор кафедры
электроники твердого тела СПбГУ

А.М. Шикин.

Личную подпись
А.М. Шикин
заверяю
И.О. начальника отдела кадров
И.И. Константинова *Конт*

06.03.2023

