

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Виноградова Александра Степановича 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.

В настоящее время в физике твердого тела наблюдается значительный интерес к топологическим квантовым материалам, в частности к магнитным топологическим изоляторам (ТИ). Многообразие уникальных квантовых свойств топологических материалов представляет большой интерес как для фундаментальной науки, так и для различных прикладных направлений, включая разработку элементов устройств спинтроники и нанoeлектроники, а также квантовых компьютеров. Поэтому изучение электронных и магнитных свойств кристаллов ТИ является в настоящее время одним из важнейших направлений современных исследований в физике конденсированного состояния и научном материаловедении. Диссертационная работа **Естюнина Д.А.** посвящена характеристике спектроскопическими методами электронной, спиновой и магнитной структуры двух типов магнитных топологических материалов – магнитно-легированного ТИ $Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$ и собственных магнитных ТИ $MnBi_2Te_4(Bi_2Te_3)_m$ ($m = 0, 1, 2$), а также детальному анализу полученных экспериментальных результатов и, вне всякого сомнения, является **актуальной**.

Диссертационная работа **Естюнина Д.А.** состоит из введения, восьми глав, и заключения. Она изложена на 158 страницах, включает 51 рисунок и 1 таблицу, а также содержит список цитируемой литературы из 137 наименований.

Во "*Введении*" обоснована актуальность темы исследования, указаны основная цель и задачи диссертационной работы, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, описаны методология и методы выполненного исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, и приведены сведения об апробации результатов.

В первой главе "Обзор литературы" дано краткое описание базовых понятий и важнейших литературных сведений по теме диссертационного исследования, таких как фундаментальные аспекты взаимодействия между электронной структурой полиатомной системы и её топологией, различные варианты эффекта Холла, основные свойства ТИ, кристаллическая структура и свойства исследуемых кристаллов трехмерных ТИ A_2B_3 ($A=Bi/Sb$ и $B=Te/Se$), способы модификации топологических поверхностных состояний (ТПС), особенности магнитных ТИ, квантовый аномальный эффект Холла, кристаллическая и электронная структура $MnBi_2Te_4$.

Вторая глава "Экспериментальные методы исследования" посвящена описанию экспериментальных методов, использованных для характеристики свойств магнитных ТИ. В качестве основного экспериментального метода изучения электронной структуры ТИ применялась фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС) в различных ее вариантах – с угловым разрешением (ФЭСУР), спиновым разрешением и резонансным возбуждением с использованием синхротронного излучения (СИ) с квантами различной энергии (от 9 эВ до 160 эВ), а также лазерного излучения с энергиями квантов 6.3 эВ и 7.0 эВ. Измерения для ТИ частично выполнялись при охлаждении образцов жидким гелием. Для анализа спиновой

структуры ТИ дополнительно использовались измерения ФЭСУР при возбуждении спектров квантами с различной циркулярной поляризацией. Магнитные свойства ТИ характеризовались с помощью сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИД-магнитометра), а также методом рентгеновской абсорбционной спектроскопии с циркулярно поляризованным СИ с анализом эффекта рентгеновского магнитного циркулярного дихроизма (РМЦД). Рентгеновская дифрактометрия и атомно-силовая микроскопия использовались соответственно для оценки качества объема и поверхности образцов исследуемых материалов. Здесь же перечислены также научные центры, оборудование которых было использовано в работе.

В третьей – восьмой главах представлены полученные автором результаты экспериментальных исследований электронной, спиновой и магнитной структуры магнитно-легированного ТИ $Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$ и семейства собственных магнитных ТИ $MnBi_2Te_4(Bi_2Te_3)_m$ ($m = 0 \div 4$), влияния магнитных атомов Gd и Mn на электронную структуру исследованных ТИ, температурных изменений ТПС, особенностей электронной структуры $MnBi_2Te_4$ выше и ниже температуры Нееля и закономерностей формирования энергетической запрещенной зоны (ЭЗЗ) в точке Дирака для $MnBi_2Te_4$.

В целом работу **Естюнина Д.А.** можно охарактеризовать как оригинальное и успешное исследование особенностей электронной, спиновой и магнитной структуры новых перспективных материалов – магнитно-легированного ТИ $Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$ и ряда собственных магнитных ТИ $MnBi_2Te_4(Bi_2Te_3)_m$ ($m = 0 \div 4$). Все исследования выполнены в сверхвысоком вакууме при низких температурах с использованием спектроскопического оборудования ведущих международных центров СИ, что обеспечило автору возможность полноценного использования таких современных поверхностно-чувствительных методов как фотоэлектронная спектроскопия с угловым и спиновым разрешением, резонансным возбуждением, рентгеновская абсорбционная спектроскопия с циркулярно-поляризованным СИ и ряда других видов спектроскопии и микроскопии.

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

- (i) наличие в области запрещенной зоны кристалла магнитно-легированного ТИ $Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$ ТПС с геликоидальной спиновой структурой, точка Дирака которых располагается на уровне Ферми;
- (ii) зависимость электронной структуры собственных магнитных ТИ $MnBi_2Te_4$, $MnBi_4Te_7$ и $MnBi_6Te_{10}$ от терминации поверхности магнитным ($MnBi_2Te_4$) или немагнитным (Bi_2Te_3) блоком;
- (iii) открытие в спектре ТПС в точке Дирака запрещенной зоны, равной 70 мэВ при $T=10$ К, для $MnBi_2Te_4$ ниже температуры магнитного упорядочения;
- (iv) изменения электронной структуры зоны проводимости и ТПС для $MnBi_2Te_4$ в зависимости от температуры при магнитном упорядочении и увеличение интенсивности ТПС в окрестности точки Дирака при уменьшении температуры ниже температуры Нееля;
- (v) изменения величины запрещенной зоны в точке Дирака для различных образцов $MnBi_2Te_4$, обусловленные наличием и концентрацией структурных дефектов вблизи поверхности ТИ;
- (vi) тип магнитного упорядочения и соответствующие критические температуры фазовых переходов для магнитных ТИ $MnBi_2Te_4(Bi_2Te_3)_m$ с $m = 0 \div 4$; и др.

Обоснованность и достоверность основных результатов и выводов диссертации Естюнина 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 и посредством прямого сравнения экспериментальных и расчётных данных.

В качестве замечаний-вопросов необходимо указать следующие:

1. При объяснении выбора гадолиния в качестве легирующей магнитной примеси при выращивании ТИ $Gd_{0.06}Bi_{1.09}Sb_{0.85}Te_3$ на стр. 6-7 утверждается: "Атомы Gd обладают большим магнитным моментом в сравнении с используемыми для легирования атомами V и Cr [11,14]. Магнетизм в Gd обусловлен 4f оболочкой, которая оказывается более инертной при встраивании атомов Gd в кристаллическую решетку...". Это объяснение явно недостаточно для выбора Gd из всего семейства редкоземельных металлов.

2. На рис. 1.3 (стр. 18) представлена "Зависимость поперечного (холловского) сопротивления $\rho_{xy} = Vy/Ix$ (зеленая кривая, правая шкала) в единицах (h/e^2) ...". Непонятно, почему на ней отсутствует плато для $\nu = 5$.

3. При рассмотрении источников СИ (раздел 2.4, стр. 52) утверждается, что "Синхротрон в некотором приближении представляет кольцевую вакуумную камеру, внутри которой движутся сгустки электронов. Под действием магнитов, например, в ондуляторе, можно изменять траекторию пучка определенным образом. При появлении ускорения (за счет изменения траектории) электроны начинают излучать фотоны." Подобное описание современных источников СИ представляется излишне упрощенным и не достаточно корректным. Используемые в работе источники СИ перечислены в разделе 2.9 (стр. 61) и представляют собой специализированные источники СИ на основе накопительных электронных колец третьего поколения.

4. В разделе 2.8 (стр. 60) при описании подготовки образцов для измерений указано, что "Образцы представляют небольшие плоские чешуйки с латеральными размерами около нескольких миллиметров и толщиной около 100 микрон. ... Для подготовки чистой поверхности перед измерениями образцы дополнительно скалываются при помощи скотча." Остается непонятным, где эта процедура осуществлялась и как контролировалась атомная чистота поверхности, необходимая для ФЭС.

5. При рассмотрении процесса Оже-распада квазистационарного рентгеновского возбужденного состояния (раздел 2.5, стр. 54) обсуждается только *participator*-Оже-распад, интерферирующий с процессом прямой фотоионизации валентной зоны, и ничего не говорится о конкурирующем процессе – *spectator*-Оже-распаде, который обычно сильно усложняет анализ спектров резонансной ФЭС.

6. В спектре резонансной ФЭС для $MnBi_2Te_4$ с энергиями возбуждающих квантов в области абсорбционного $Mn\ 3p \rightarrow 3d$ резонанса (рис. 4.3а, стр.84) по непонятной причине интенсивность $Bi\ 5d_{5/2}$ ФЭ линии "вне резонанса" значительно выше интенсивности этой линии "при резонансе", хотя они должны быть одинаковыми, как в случае $Bi\ 5d_{3/2}$ ФЭ линии. На стр.85 утверждается, что «Эти линии имеют практически одинаковую интенсивность при данных энергиях фотонов.» Это утверждение надо понимать как характеристику погрешности нормировки резонансных ФЭ спектров?

Сделанные замечания не затрагивают основные результаты и выводы диссертации и не сказываются на высокой оценке работы. Научные результаты, представленные автором

в диссертации, опубликованы в семи статьях в высокорейтинговых международных журналах и уже имеют высокое цитирование.

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», 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 кафедры электроники твердого тела
физического факультета Санкт-Петербургского
государственного университета



Виноградов А.С.

12 июня 2023 г.