

Отзыв официального оппонента доктора физико-математических наук
Столярова Василия Сергеевича на диссертацию Русина Игоря Павловича
«Электронная структура топологических изоляторов и материалов с расщеплением Рашбы»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния».

Широкое внимание исследователей приковано к эффектам и проблемам активно развивающегося направления физики конденсированного состояния — спинтроники, в рамках которого исследуется возможность управления спиновой степенью свободы электрона. Эффекты, исследуемые в рамках данного направления, связывают между собой особенности переноса спина, транспорта электронов, а также топологические эффекты электронной структуры. Данный интерес обусловлен широкой возможностью практического приложения приборов спинтроники в качестве компонентов квантового компьютера, спиновых детекторов, транзисторов, а также элементов памяти вычислительных устройств нового поколения. Это обуславливает **актуальность** тематики представленных в диссертации исследований.

В представляемой диссертации были широко исследованы материалы, которые являются кандидатами в компоненты устройств спинтроники, а именно, рашбовские полупроводники и топологические изоляторы (ТИ). Первые были предложены как компоненты спинового транзистора вследствие прецессии спина в ходе транспорта носителей заряда, вторые могут быть применены как спиновый фильтр вследствие связи направления спина с квазиимпульсом. Это определяет **мотивацию** представленных в диссертации исследований.

Спин-орбитальное взаимодействие является наиболее важным вкладом, который определяет свойства как рашбовских полупроводников, так и топологических изоляторов, а также обеспечивает зонную топологию, что отражается в богатстве эффектов, вызванных формированием границы с вакуумом или в случае контакта с другим материалом с другим характером топологии. Поскольку данное взаимодействие возрастает с порядковым номером элемента, содержание висмута является важным фактором при рассмотрении возможности формирования спин-орбитальных эффектов в том или ином материале. Прделанная автором работа позволяет понять как изменяется топология соединений при последовательном увеличении концентрации висмута начиная с тривиального рашбовского полупроводника BiTeX (топологический инвариант $Z_2=0$), затем проходя стадию дуального топологического изолятора Bi_2TeX ($Z_2=(0;001)$) и заканчивая топологическим металлом ($Z_2=1$) в Bi_3TeX .

Ещё одним важным эффектом является магнетизм, наличие которого позволяет также управлять топологическими свойствами материалов. В работе детально исследованы недавно синтезированное семейство магнитных Ван Дер Ваальсовых структур $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot (\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ и $\text{MnSb}_2\text{Te}_4 \cdot (\text{Sb}_2\text{Te}_3)_n$. Результаты, изложенные автором, свидетельствуют о сохранении и усложнении особенностей зонной топологии в таких материалах по сравнению с привычными топологическими изоляторами. Найдено, что они являются первыми примерами класса антиферромагнитных топологических изоляторов. Кроме того, для тонких плёнок данных соединений было обнаружено формирование состояния квантового аномального эффекта Холла.

Целью диссертационной работы является детальное изучение электронной структуры топологических изоляторов и систем со спин-орбитальным расщеплением Рашбы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что были найдены и исследованы материалы, являющиеся представителями новых семейств топологических изоляторов. К таким материалам относятся дуальные топологические изоляторы Bi_2TeI и Bi_2TeBr , принадлежащие одновременно к слабой и кристаллиновой топологическим фазам, а также антиферромагнитные топологические изоляторы в семействах $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot (\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ и $\text{MnSb}_2\text{Te}_4 \cdot (\text{Sb}_2\text{Te}_3)_n$.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность исследования, научная новизна, его теоретическая и практическая значимость. Также описаны методы, которые применялись в работе. Указана достоверность и апробация работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также личный вклад автора и объём работы.

В первой главе диссертации проводится исторический экскурс в теорию топологических изоляторов, а также расщепления Рашбы. Основная причина возникновения указанных эффектов является вклад спин-орбитального взаимодействия в гамильтониан. Данный вклад связывает особенности электростатического потенциала в той или иной системе, квазиимпульс электрона и его спиновый момент. Значительную роль также играет набор симметрий, который во многом определяет топологический класс соединения, а также особенности дисперсии состояний Рашбы. Симметрии также определяют детали транспорта носителей заряда и дисперсии топологического состояния на границах раздела двух сред с разной топологией. В главе обсуждаются как основы теории топологических изоляторов, так и наиболее актуальные на сегодняшний день результаты исследования данных материалов. Прослеживается историческая тенденция от первых открытых топологических изоляторов, зонная топология которых обеспечивается симметрией обращения времени, до топологических изоляторов высших порядков, где основную роль играют также пространственные симметрии кристалла.

Отдельное внимание уделено методам, которые активно применялись в работе. Прежде всего это теория функционала плотности, которая позволяет на основе особенностей атомного строения вещества исследовать электронные свойства. Она хорошо применима для тех материалов, где эффекты, связанные с электрон-электронным рассеянием, достаточно слабы. Далее излагаются основные детали *GW*-приближения, позволяющего учитывать многочастичные эффекты, связанные с электрон-электронным рассеянием. Применение данного метода в частности позволяет получать хорошее согласие по величине запрещённой щели в полупроводниках между теорией и экспериментом.

Вторая глава посвящена изложению результатов исследования электронных спектров соединений $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{X}$ (где $\text{X} = \text{Te}, \text{Se}, \text{S}$) с использованием двух методов: теории функционала плотности и *GW*-приближения. Данные соединения отличаются слоистым строением

кристаллической структуры, которая состоит из повторяющихся пятислойных блоков с центральным атомом халькогена X, разделённых промежутком со слабыми связями Ван Дер Ваальса.

В работе изучалась электронная структура соединений $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{X}$ с применением теории функционала плотности. Данные соединения являются узкозонными полупроводниками с экстремумами краёв запрещённой щели на плоскости отражения трёхмерной зоны Бриллюэна. Дисперсия краёв запрещённой щели указывает на формирование области инвертирования. Рассмотрение топологических свойств на основе рассмотрения чётностей волновых функций в занятой части электронного спектра подтвердило принадлежность данных соединений к классу топологических изоляторов ($Z_2=1$). В работе подробно проанализировано расположение экстремумов и деталей дисперсии состояний краёв запрещённой щели и проведено их сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

Затем были рассчитаны многочастичные поправки в спектр, полученный при помощи теории функционала плотности. Данные поправки не изменяют полупроводниковый характер электронной структуры исследуемых соединений, а также принадлежность к классу топологических изоляторов, но существенно влияют на дисперсию состояний краёв запрещённой щели. Так в области инвертирования вблизи центра зоны Бриллюэна величина запрещённой зоны уменьшается с учётом поправок, а вне этой области — увеличивается. При этом дно зоны проводимости смещается ближе к центру зоны Бриллюэна в направлении Γ -Z. Полученные особенности указанных поправок отличают топологические изоляторы от других полупроводников с малым вкладом спин-орбитального взаимодействия, где учёт многочастичных эффектов приводит лишь к сдвигу зоны проводимости вверх по энергии.

Найдено, что наиболее подходящим для практического приложения является соединение $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$. Во-первых, оно характеризуется самой большой шириной запрещённой зоны в 400 мэВ. Во-вторых, анализ поверхностной электронной структуры этого соединения показал, что квазичастичные поправки приводят к смещению точки Дирака вверх по энергии относительно края валентной зоны. При этом точка Дирака формируется выше вершины валентной зоны, на основе чего возможна реализация квантовых вычислений в устройствах на основе гетероструктуры топологический изолятор-сверхпроводник.

В третьей главе автор исследовал вопрос о связи структурных особенностей теллуригалогенидов висмута BiTeX ($X=\text{I}, \text{Cl}, \text{Br}$) с их электронными и оптическими свойствами. С точки зрения электронных свойств интерес представляет возможность топологического фазового перехода под давлением из фазы тривиального полупроводника в фазу топологического изолятора, поскольку соединения характеризуются наличием инверсионной асимметрии, а также симметрии по обращению времени. Данный переход формируется в конечной области давлений, соответствующей промежуточной фазе вейлевского полуметалла. При сопоставлении давления топологического и кристаллического фазовых переходов был сделан вывод о возможности нетривиальной топологии под давлением только для соединения BiTeI . При этом более высокое значение величины запрещённой щели при нулевом давлении в BiTeBr и BiTeCl приводит к индуцированию кристаллического перехода при меньших давлениях, чем топологического перехода.

Соединение BiTeI также может быть рассмотрено как модельная система, позволяющая исследовать особенности топологического фазового перехода в инверсионно-асимметричных системах с гексагональной решёткой. Так в работе был детально рассмотрен электронный спектр в малой области вблизи уровня Ферми. Автор проследил формирование и аннигиляцию пар объёмных точек Вейля с противоположным значением топологического заряда. На границе с вакуумом также было рассмотрено образование Ферми-арок, соединяющих объёмные точки Вейля в проекции на двумерную зону Бриллюэна. Для Ферми-арок также было рассмотрено влияние потенциала изгиба зон и типа окончания поверхности, что выявило как общие закономерности в дисперсии данных состояний, так и обусловленные особенностями системы вблизи скола кристалла.

Поскольку данные соединения относятся к семейству Ван Дер Ваальсовских материалов с сильной анизотропией, различающей направления в плоскости и вне плоскости, то данная структурная особенность напрямую влияет на оптические характеристики BiTeX . В работе были обнаружены и исследованы два объёмных плазмона, которые имеют различия в энергии в зависимости от направления в кристалле. Также указанная анизотропия отражается в значениях диэлектрических констант и оптических характеристик, полученные значения которых хорошо согласуются с результатами имеющихся экспериментов.

В **четвёртой главе** рассматривались теллуругалогениды с большим содержанием висмута, что приводит к кристаллической структуре, состоящей из разнородных слоёв, связанных слабыми связями Ван Дер Ваальса. Прежде всего были исследованы соединения Bi_2TeX ($X=\text{I,Br}$), которые представляют собой последовательность двух трёхслойных блоков BiTeX и бислоя висмута. Исследование объёмной структуры показало, что они являются слабыми топологическими изоляторами с топологическим индексом равным $Z_2=0;(001)$, что свидетельствует об отсутствии защиты симметрии по обращению временем для состояний в случае естественного скола кристалла (001). В рамках работы впервые было показано, что для слабых топологических изоляторов может также присутствовать защита другими симметриями. В данном случае вдоль Γ -M направления двумерной зоны Бриллюэна сохраняется зеркальная симметрия кристалла, которая обеспечивает бесщелевой характер дисперсии поверхностного топологического состояния, соединяющего проекцию состояний валентной зоны и зоны проводимости. Вследствие нетривиальной топологии объёмного материала, данный вывод не зависит от выбора возможного типа окончания данной поверхности. Таким образом, впервые были найдены примеры так называемых дуальных топологических изоляторов, одновременно являющихся как кристаллиновыми, так и слабыми топологическими изоляторами.

Также ранее кристаллохимикам удалось синтезировать соединения Bi_3TeX ($X=\text{I,Br}$) с ещё большим содержанием висмута. В данном случае соединения состоят из чередующейся последовательности трёхслойного блока BiTeI и бислоя висмута. В работе была рассмотрена электронная структура данных соединений. Было найдено, что она имеет явный металлический характер с множеством пересечений зоны в области Ферми. При этом в центре зоны Бриллюэна также наблюдается локальная запрещённая щель. Расчёт Z_2 инварианта в данном случае свидетельствует о сильном топологическом порядке соединения

вследствие инвертирования зон в локальной запрещённой щели, что отражается в формировании в ней топологических поверхностных состояний конуса Дирака. Рассмотрение всех возможных окончаний поверхности в случае естественного скола кристалла подтвердил данный вывод.

Пятая глава посвящена вопросу о топологии соединений, образованных атомами щелочных металлов и висмута. Известно, что при данном составе образуются материалы с кубической и тетрагональной сингониями. При этом кубические соединения, принадлежащие к указанной группе, ранее не были рассмотрены. В работе была исследована электронная структура ранее синтезированных кубических интерметаллидов KNa_2Bi , K_3Bi и Rb_3Bi . Рассмотрение объёмной электронной структуры свидетельствует о формировании её сложной конфигурации, состоящей из неза занятой зоны и зоны тяжёлых дырок, которые являются вырожденными в центре зоны Бриллюэна, что свидетельствует о полуметаллическом характере спектра. Чуть ниже по энергии располагается зоны лёгких дырок. Все указанные состояния имеют параболическую дисперсию. При этом существует инвертирование неза занятого состояния и состояния тяжёлых дырок. Рассчитанный топологический инвариант данного соединения соответствует о его принадлежности к классу топологических изоляторов ($Z_2=1$). Таким образом, такая конфигурация схожа со случаем известного соединения HgTe . В рамках работы было проведено исследование электронной структуры с учётом продвинутых приближений для обменно-корреляционного функционала, а именно приближения с точным обменом (HSE) и мета-обобщённого градиентного приближения (MGGA). Применение двух данных методов не изменило общий вывод о принадлежности исследуемых соединений к топологическому классу материалов.

Для данных соединений в работе было рассмотрено влияние внешних возмущений, таких как гидростатическое и одноосное сжатие вдоль оси z . В случае гидростатического сжатия происходит топологический фазовый переход из фазы топологического изолятора в фазу тривиального полупроводника, который сопровождается объёмной фазой дираковского полуметалла. Данная фаза характеризуется формированием четырёхкратного вырождения точки Дирака в центре зоны Бриллюэна при некотором значении давления. Одноосное сжатие приводит к тетрагональной сингонии кристаллической структуры. При этом возникает нарушение вырождения состояний в точке Γ трёхмерной зоны Бриллюэна. Это, в свою очередь, приводит к дополнительному инвертированию зон вблизи уровня Ферми. В зависимости от знака одноосной деформации отличается и характер топологии. Так при одноосном сжатии формируется фаза топологического изолятора с ненулевой шириной глобальной запрещённой щели, а при растяжении фаза топологического полуметалла, характеризующаяся касанием валентной зоны и зоны проводимости в точках Дирака. Последние представляют собой двукратно-вырожденную пару точек Вейля с противоположной киральностью, что является следствием симметрии по обращению времени и инверсионной симметрии кристалла. Положение объёмных точек Дирака вдоль Γ - Z направлений обусловлено зеркальной симметрией решётки с нормалью вдоль оси z , а также поворотной симметрией C_4 вдоль той же оси. Вследствие указанных особенностей объёмных точек Дирака, они являются источником двух Ферми-арок, связывающих данные точки в спектре поверхности. Данная особенность поверхностной электронной структуры также была подтверждена прямыми расчётами спектров поверхностей.

В **шестой главе** рассматривались семейства недавно синтезированных соединений, принадлежащих к семействам $\text{MnBi}_2\text{Te}_4 \cdot (\text{Bi}_2\text{Te}_3)_n$ и $\text{MnSb}_2\text{Te}_4 \cdot (\text{Sb}_2\text{Te}_3)_n$. Кристаллическая структура данных материалов представляет собой последовательность семислойных блоков MnBi_2Te_4 (MnSb_2Te_4) и пятислойных блоков Bi_2Te_3 (Sb_2Te_3). При этом между собой блоки связаны слабыми силами Ван Дер Ваальса.

Рассмотрение электронной структуры данных соединений показало, что при малых значениях n они в основном являются антиферромагнитными ТИ. При больших значениях данного параметра дальний магнитный порядок нарушается, что приводит к формированию фрустрированного магнетизма. Принадлежность к фазе ТИ было доказано как на основе чётностей волновых функций в занятой части спектра, так и при помощи метода Ванье-центров. Также для каждого соединения был прослежен топологический фазовый переход из фазы тривиального полупроводника в фазу топологического изолятора. Параметром в рамках данного перехода служил вклад спин-орбитального взаимодействия. При некотором значении данного вклада зона проводимости и валентная зона вырождаются в центре точки Бриллюэна, что и указывает на топологический фазовый переход. Рассчитанные далее спектры поверхностей полностью подтвердили выводы, сделанные на основе анализа объёмного электронного спектра. Боковые сколы характеризуются формированием топологически защищённого поверхностного состояния, а естественная поверхность скола (001) расщеплённым по обмену поверхностным состоянием.

Для тонких плёнок соединений MnBi_2Te_4 и MnSb_2Te_4 показана возможность формирования в них фазы квантового аномального эффекта Холла. В случае MnBi_2Te_4 возможность формирования данной фазы была установлена для систем, образованных нечётным количеством семислойных блоков. При этом в случае чётного количества блоков ферромагнитное упорядочение достижимо за счёт внешнего неквантующего магнитного поля, что также приводит к образованию топологической фазы. Рассмотрение электронной структуры показало, что фаза квантового аномального эффекта Холла характеризуется ненулевым значением числа Черна ($C=-1$) и образованием единственного состояния, соединяющего валентную зону и зону проводимости в случае границы тонкой плёнки с вакуумом. Можно отметить последующее экспериментальное подтверждение данных выводов в рамках транспортных экспериментов. Что касается тонких плёнок соединения MnSb_2Te_4 , то фаза квантового аномального эффекта Холла в них возможно только для плёнки, состоящей из семи семислойных блоков.

В **седьмой главе** рассмотрена электронная структура поверхности магнитных топологических изоляторов и рашбовских систем в случае формирования в них магнитных доменных стенок. В случае единичной магнитной стенки формируется низкоразмерное одномерное состояние, которое значительно модифицируется в зависимости от направления магнитной оси. Оно является бесдисперсионными в случае лёгкой оси намагничивания в плоскости, соединяя две точки Дирака конусов разных магнитных доменов. Его формирование связано с нетривиальной топологией конуса Дирака, поскольку фаза Берри для волновых функций вокруг точек Дирака равна π . В случае ориентации оси

намагничивания вне плоскости происходит индуцирование одномерного кирального топологического состояния. Оно связано с полужелым квантованием холловской проводимости вследствие зонной топологии обменной щели в состояниях Дирака на противоположных магнитных доменах. Вследствие данной топологии найденные особенности одномерных состояний не изменяются при более сложных конфигурациях магнитных доменных стенок неелевского или блоховского типа. При этом вместе с одномерным топологическим состоянием формируются набор тривиальных состояний, формирование которых связано с пространственной протяжённостью магнитной доменной стенки.

В случае рашбовских систем магнитные доменные стенки формируют низкоразмерные состояния двух типов. Первый тип, как и в случае дираковских систем, образуется вследствие зонной топологии локальной обменной щели. Локальный характер щели приводит к отсутствию квантования холловской проводимости. Отсюда формирование одномерных состояний и их спектральные особенности зависят от соотношения кинетического, спин-орбитального и магнитного вкладов. Так, при увеличении магнитного вклада по отношению к спин-орбитальному данные состояния становятся слабо выраженными в суммарной спектральной функции. Состояние второго типа не связано с зонной топологией и наблюдается чуть ниже по энергии континуума проекции двумерных состояний. Оно является стабильным и имеет место при любом соотношении вкладов в гамильтониан.

В заключении обсуждаются и анализируются основные результаты и выводы диссертационной работы.

В работе были применены хорошо зарекомендовавшие себя методы исследования электронной структуры такие как теория функционала плотности, метод сильной связи, эффективность которых многократно подтверждена многочисленными исследованиями в области физики конденсированного состояния. Выводы, полученные автором, являются непротиворечивыми и аргументированными. Стоит отметить также экспериментальные подтверждения результатов, полученных в рамках представляемой диссертации, в последующих экспериментальных работах. Это определяет **достоверность и обоснованность** результатов.

Результаты работы нашли отражение в 20 работах в международных журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, а также докладывались на ведущих конференциях по физике конденсированного состояния.

Имеется несколько **замечаний**.

1. Не совсем понятно почему отсутствуют исследования соединений Bi_2TeCl и Bi_3TeCl в четвёртой главе.
2. Ничего не сказано о возможности вклада интегралов перескока между третьими соседями в рамках метода сильной связи в седьмой главе.

Представленные замечания не снижают научной ценности представляемой работы.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации и опубликованные статьи по её тематике.

Диссертант И. П. Русинов несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния».

Руководитель центра перспективных методов мезофизики и нанотехнологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», д. ф.-м. н.

Столяров Василий Сергеевич

– 27.12.24

Подпись В. С. Столярова заверяю:

141701, Московская область,
г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д.9;

Телефон: +7 (903) 778-90-08
e-mail: Stolyarov.vs@phystech.edu

Список основных работ официального оппонента доктора физико-математических наук Столярова Василия Сергеевича по тематике диссертации Русинова Игоря Павловича «Электронная структура топологических изоляторов и материалов с расщеплением Рашбы» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. A. Kudriashov, I. Babich, R. A. Hovhannisyan, A. G. Shishkin, S. N. Kozlov, A. Fedorov, D. V. Vyalikh, E. Khestanova, M. Yu. Kupriyanov, V. S. Stolyarov. Revealing Intrinsic Superconductivity of the Nb/BiSbTe₂Se Interface // *Advanced Functional Materials*. – 2022. – Vol. 32., № 49 – P. 2209853.
2. O. Mentré, B. Leclercq, A. M. Arevalo-Lopez, A. Pautrat, S. Petit, C. Minaud, S. Daviero, R. A. Hovhannisyan, V. S. Stolyarov. Multivalued Memory via Freezing of Super-Hard Magnetic Domains in a Quasi 2D-Magnet // *Small Methods*. – 2023. – P. 2300491.
3. D. S. Yakovlev, D. S. Lvov, O. V. Emelyanova, P. S. Dzhumaev, I. V. Shchetinin, O. V. Skryabina, S. V. Egorov, V. V. Ryazanov, A. A. Golubov, D. Roditchev, V. S. Stolyarov. Physical Vapor Deposition Features of Ultrathin Nanocrystals of Bi₂(Te_xSe_{1-x})₃ // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2022. – Vol. 13, № 39. – P. 9221-9231.
4. Resonant Oscillations of Josephson Current in Nb-Bi₂Te_{2.3}Se_{0.7}-Nb Junctions / V. S. Stolyarov, D. Roditchev, V. L. Gurtovoi, S. N. Kozlov, D. S. Yakovlev, O. V. Skryabina, V. M. Vinokur, A. A. Golubov // *Advanced Quantum Technologies*. – 2022. – Vol. 5, № 3. – P. 2100124.
5. Magnetic Gap of Fe-Doped BiSbTe₂Se Bulk Single Crystals Detected by Tunneling Spectroscopy and Gate-Controlled Transports / R. Yano, A. Kudriashov, H. T. Hirose, T. Tsuda, H. Kashiwaya, T. Sasagawa, A. A. Golubov, V. S. Stolyarov, S. Kashiwaya // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2021. – Vol. 12, № 17. – P. 4180-4186.
6. T. Karabassov, A.A. Golubov, V.M. Silkin, V.S. Stolyarov, A.S. Vasenko. Reentrant superconductivity in proximity to a topological insulator // *Physical Review B*. – 2021. – Vol. 103, № 22. – P. 224508.
7. L. Desvignes, V. S. Stolyarov, M. Aprili, F. Masee. Tunable High Speed Atomic Rotor in Bi₂Se₃ Revealed by Current Noise // *ACS nano*. – 2021. – Vol. 15. – P. 1421-1425.
8. V. S. Stolyarov, D. S. Yakovlev, S. N. Kozlov, O. V. Skryabina, D. S. Lvov, A. I. Gumarov, O. V. Emelyanova, P. S. Dzhumaev, I. V. Shchetinin, R. A. Hovhannisyan, S. V. Egorov, A. M. Kokotin, W. V. Pogosov, V. V. Ryazanov, M. Yu. Kupriyanov, A. A. Golubov, D. Roditchev. Josephson current mediated by ballistic topological states in Bi₂Te_{2.3}Se_{0.7} single nanocrystals // *Communications Materials*. – 2021. – Vol. 1. – P. 38.

9. Magnetic resonances in EuSn_2As_2 single crystal / I.A. Golovchanskiy, E.I. Maltsev, I.V. Shchetinin, V.A. Vlasenko, P.S. Dzhumaev, K.S. Pervakov, O.V. Emelyanova, A. Yu. Tsvetkov, N.N. Abramov, V.M. Pudalov, V.S. Stolyarov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2022. – Vol. 562. – P. 169713.