

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
“Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова”
профессор

_____ А.А. Федянин

«_____» 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – ФГБОУВО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова на диссертационную работу Денисова Константина Сергеевича «Теория транспортных явлений в системах с киральным спиновым беспорядком», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - «Теоретическая физика».

В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям спин зависимых явлений в низкоразмерных твердотельных структурах. Это обусловлено значительным влиянием спиновой степени свободы на оптические, электрические и магнитные свойства твердотельных структур. Исследование основ физики спин-зависимых явлений является важным и перспективным не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения, поскольку спин частицы можно рассматривать в качестве физического носителя информации. Значительный интерес к исследованию фундаментальных особенностей спин-зависимых явлений в твердотельных наноструктурах обусловлен успешным опытом разработки твердотельных устройств на их основе, таких как записывающие и считывающие элементы, а также спиновые переключатели. Среди наиболее интересных и активно изучаемых спиновых структур особо стоит отметить магнитные скирмионы – киральные солитонные состояния поля намагниченности компактного размера, которые могут быть применены для кодирования и передачи информации.

Диссертационная работа К.С. Денисова посвящена описанию механизмов кирального спинового упорядочения в твердотельных наноструктурах, а также анализу кинетики электронного газа в системах с киральным спиновым порядком. Диссертационная работа является актуальной как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения возможности практического применения полученных результатов. Достоверность результатов обеспечена

тщательно выполненным комплексным аналитическим и численным анализом транспортных явлений в наноструктурах с киральным спиновым беспорядком качественным согласованием полученных результатов с известными экспериментальными данными, а также многократной апробацией результатов работы на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях. Автором получен ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Разработана теория асимметричного рассеяния электронов на киральных спиновых текстурах. С использованием метода фазовых функций предложена и развита методика точного численного решения задачи рассеяния. Обнаружено, что рассеяние электронов имеет асимметричный характер как для топологически заряженных конфигураций, так и в случае спиновых текстур с тривиальной топологией. Продемонстрировано, что качественные особенности асимметричного рассеяния имеют универсальный характер, то есть не зависят от топологии спинового поля.

2. Разработана согласованная теория кинетических явлений в неупорядоченных двумерных системах с киральными спиновыми текстурами. Продемонстрировано, что для разреженного массива спиновых текстур поперечное сопротивление системы определяется зарядовым и спиновым механизмами топологического эффекта Холла. Обнаружено, что для квазиклассического режима движения через спиновую текстуру происходит насыщение поперечных зарядовых и спиновых токов.

3. Предложено теоретическое описание киральной структуры связанного магнитного полярона в квантовых ямах магнитных полупроводников со спин-орбитальным взаимодействием.

4. Выявлены особенности топологического эффекта Холла в полупроводниковых квантовых ямах, возникающие из-за асимметричного рассеяния носителей заряда на киральных магнитных поляронах, в частности определена область внешних магнитных полей и температур, при которых данное явление может наблюдаться в эксперименте.

5. Построена теория генерации равновесных киральных спиновых текстур за счет электростатического беспорядка в двумерных системах со спин-орбитальным взаимодействием и нарушением симметрии по отношению к инверсии времени.

К достоинствам работы также следует отнести аккуратное и последовательное сравнение результатов расчетов, выполненных автором в рамках предложенных моделей, с имеющимися в литературе данными экспериментальных исследований. Кроме того, результаты численного анализа сопоставлены с данными аналитических расчетов, проведенных для ряда предельных случаев.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 136 страниц, включая 40 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 218 наименований.

Во введении сформулированы цель и основные задачи работы, обоснованы актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены структура и краткое содержание диссертационной работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор основных явлений, обусловленных наличием в исследуемых системах кирального спинового упорядочения. Обсуждены различные формы кирального спинового беспорядка и механизмы, ответственные за формирование киральных спиновых текстур. Приведено описание экспериментальных методик, используемых для детектирования киральных спиновых текстур, и представлено описание реальных систем, в которых наблюдаются исследуемые структуры. Особое внимание уделено проблемам, возникающим при теоретическом описании топологического эффекта Холла.

Во второй главе разработана теория асимметричного рассеяния электронов на киральных спиновых текстурах. Получено решение задачи о рассеянии носителей заряда на одиночных киральных спиновых текстурах. Продемонстрировано, что киральной тип ориентации магнитных центров вызывает асимметрию рассеяния носителей заряда, что приводит к формированию поперечного отклика на внешнее электрическое поле. Предложен метод, позволяющий получить точное решение задачи рассеяния электрона проводимости на магнитной киральной текстуре. Обнаружено, что в режиме слабой связи между спином электрона проводимости и намагниченностью системы реализуются процессы рассеяния электрона с переворотом спина, что вызывает генерацию поперечного зарядового тока даже в случае нулевой начальной спиновой поляризации электронного газа. В случае сильной связи реализуется спиновый режим топологического эффекта Холла, при котором осуществляется генерация поперечного спинового тока. Теоретически проанализировано переключение между спиновым и зарядовым режимами рассеяния, обусловленное изменением размера спиновой текстуры или константы обменного взаимодействия. Также обнаружено, что топологический эффект Холла существует вне зависимости от топологии индивидуальной спиновой текстуры.

В третьей главе разработана последовательная теория кинетических явлений в неупорядоченных системах с киральными спиновыми текстурами. Развитая теория учитывает различные особенности рассеяния электронов на спиновых текстурах. Для случая систем с разреженным массивом спиновых текстур получено выражение для поперечного

сопротивления, соответствующего топологическому эффекту Холла. Продемонстрировано, что зарядовый и спиновый механизмы ответственны за независимые вклады в поперечное сопротивление неупорядоченных систем с разреженными киральными спиновыми текстурами. Проанализирован топологический эффект Холла в зависимости от положения уровня Ферми электронного газа, размера и профиля спиновых текстур, а также соотношения между интенсивностью рассеяния на немагнитных примесях и спиновых текстурах. Показано, что для спиновых текстур с размером, существенно превышающим фермиевскую длину волны, происходит насыщение топологического эффекта Холла. Амплитуда поперечного сопротивления перестает зависеть от размера текстуры и определяется только ее топологией. В главе также исследуются различные транспортные сценарии, которые имеют место в зависимости от относительной интенсивности рассеяния электронов на немагнитных примесях или спиновых текстурах и анализируются зарядовый и спиновый поперечные токи при различных режимах асимметричного рассеяния электронов в области кирального спинового порядка. В третьей главе также приведено квазиклассическое объяснение этого эффекта и определены параметры систем, в которых реализуется режим топологического эффекта Холла.

В четвертой главе дано теоретическое описание механизмов кирального спинового упорядочения в двумерных системах со спин-орбитальным взаимодействием при наличии электростатического беспорядка, который существует в любой реальной системе. Предложен микроскопический механизм спинового упорядочения, обусловленный локализацией носителей заряда и формированием связанных магнитных поляронов. Разработана теория кирального магнитного полярона в узкой квантовой яме в случае линейного по волновому вектору спин-орбитального расщепления спиновых подзон. Детально проанализированы условия, при которых топологический эффект Холла, обусловленный асимметричным рассеянием подвижных носителей на киральных магнитных поляронах, может наблюдаться в квантовых ямах, выращенных из магнитных полупроводников. Кроме того, в четвертой главе предложен механизм генерации термодинамически равновесных киральных спиновых текстур в системах с вырожденным электронным газом. Проанализированы особенности спинового отклика электронного газа на электростатическое возмущение различного характера.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

В качестве замечаний по диссертационной работе К.С. Денисова можно отметить следующее:

1. Во второй главе при рассмотрении задачи рассеяния электронов на двумерной спиновой текстуре не учитывается обратное влияние электрона на спиновое поле. В работе не пояснено на чем основывается такое модельное предположение и к каким изменениям в полученных в работе результатах может привести учет этого эффекта.

2. При решении задачи о рассеянии электрона на двумерной спиновой текстуре анализируется случай рассеяния одного электрона. В действительности со спиновой текстурой взаимодействует множество электронов, тогда представляется важными учитывать не только взаимодействие каждого отдельного электрона со спиновой текстурой, но и взаимодействие между электронами. Представляется важным обсудить вопрос о том, как полученные в работе результаты изменятся в случае учета электрон-электронного взаимодействия.

3. В третьей главе при построении кинетической теории топологического эффекта Холла не учитываются интерференционные эффекты, которые могут возникнуть при одновременном рассеянии электронов на немагнитных центрах и спиновой текстуре. Способны ли такие интерференционные эффекты повлиять на обнаруженный в диссертационной работе кроссовер между зарядовыми и спиновыми холловскими токами?

4. В четвертой главе при исследовании вопроса об образовании магнитного полярона сделан набор предположений, относительно параметров исследуемой системы (например, температура, толщина квантовой яма и т.д.). Какие из параметров системы ответственны за устойчивость магнитного полярона? Допускает ли предложенная автором теория обобщение на случай произвольных параметров исследуемой системы?

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, являющуюся оригинальным и законченным научным исследованием. Полученные результаты являются новыми, актуальными и представляют значительный научный интерес. Актуальность, новизна, практическая значимость, достоверность полученных в работе результатов, а также личный вклад автора не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в статьях в ведущих научных изданиях по тематике диссертационной работы, входящих в базы данных Scopus и Web of Science. Материал, изложенный в диссертационной работе, представлен понятно и логически последовательно. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа была заслушана и подробно обсуждена на заседании кафедры физики полупроводников и криоэлектроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Диссертационная работа К.С. Денисова «Теория транспортных явлений в системах с киральным спиновым беспорядком» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Отзыв составил

Доцент физического факультета
ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук

Владимир Николаевич Манцевич

Подпись В.Н. Манцевича удостоверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
профессор,
доктор физико-математических наук

Н.Н. Сысоев