

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Копасова Александра Андреевича

«Состояния квазичастиц и электронный транспорт в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Один из трендов современной физики конденсированного состояния связан с изучением гибридных низкоразмерных структур, в которых сочетание и взаимовлияние уникальных свойств составляющих подсистем позволяют достигать характеристик, перспективных с практической точки зрения. Значимое место здесь занимают системы, включающие сверхпроводник в контакте с ферромагнитными материалами или с полупроводниками. При этом существенно, что технологические достижения последних лет позволяют создавать достаточно чистые интерфейсы. В результате, понимание особенностей эффекта близости в системах с зеемановским расщеплением и спин-орбитальным взаимодействием, а также изучение влияния последних на куперовское спаривание в сверхпроводнике являются первоочередными задачами для дальнейшего развития сверхпроводящей электроники. Дополнительный импульс в исследовании свойств и синтезе гибридных сверхпроводящих структур был получен в начале 2010-х годов в связи с идеей майорановских квазичастичных возбуждений в сверхпроводящих нанопроволоках с сильной спин-орбитальной связью. Обнаружение этих состояний является насущной проблемой в свете реализации топологически защищенных квантовых вычислений. Диссертационная работа А.А. Копасова посвящена изучению именно такого круга вопросов, что подчеркивает ее **актуальность и значимость**.

В диссертационной работе автор последовательно и корректно использовал известные методы физики конденсированного состояния, которые оказались эффективными как при описании спектральных и транспортных свойств низкоразмерных сверхпроводящих систем, так и для анализа обратного эффекта близости в присутствии спин-расщепляющего и спин-орбитального полей.

Во введении приведен обзор работ по необычным сверхпроводящим корреляциям и квантовому транспорту в системах со сверхпроводниками; делается акцент на факторе спин-орбитального взаимодействия при генерации спин-триплетного спаривания и в эффекте Джозефсона. Кроме того, приводится мотивация исследований соискателя и коротко объясняются результаты последующих оригинальных глав. Первая глава посвящена исследованию низкоэнергетических квазичастичных возбуждений полупроводниковой проволоки, полностью покрытой сверхпроводящей оболочкой, изучены условия реализации майорановских состояний и найдена волновая функция майорановской моды. Во второй главе рассматривается стационарный эффект Джозефсона в системах с искривленными майорановскими проволоками. Проанализированы особенности аномального джозефсоновского тока и невзаимного сверхпроводящего транспорта с учетом текстурированного спин-орбитального поля Рашбы для случаев пространственно однородного и неоднородного зеемановского расщепления. В третьей главе изучается обратный эффект близости в системе, где сверхпроводник взаимодействует с ферромагнетиком, характеризующимся спин-орбитальной связью Рашбы.

На мой взгляд, некоторые результаты имеют существенное значение и представляют особенный интерес, а именно:

1. Изучены спектральные свойства мезоскопической гибридной проволоки с вихревым сверхпроводящим параметром порядка в продольном магнитном поле. Показано, что учет процессов нормального и андреевского отражения от границы раздела полупроводник – сверхпроводник и от внешней границы сверхпроводящей оболочки, полностью покрывающей полупроводниковый кор, приводит к реализации не только локализованных состояний типа Кароли - де Жена - Матрикона, но и делокализованных мод в бесконечной системе. Зависимость энергии последних от магнитного потока демонстрирует возвратное поведение и скачкообразное уменьшение щели при входе вихрей, что может наблюдаться на практике в виде смены периодичности поведения резонансов кондактанса с $2e$ на $1e$ и обратно в режиме кулоновской блокады.

2. Проанализированы особенности реализации топологически нетривиальной фазы в проволоке со спин-орбитальным взаимодействием и сверхпроводящей оболочкой. Показано, что инверсия мод волноводного типа является необходимым условием для реализации в открытой системе майорановских состояний. Получено аналитическое выражение, описывающее майорановскую волновую функцию для полубесконечного случая.

3. Развита теория джозефсоновского транспорта в системах, где в качестве берегов выступают сверхпроводящие проволоки со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы и зеэмановским расщеплением, а в области слабой связи между ними имеется изгиб. Расчеты проведены с учетом вклада в ток от двух подзон геликоидальных состояний, а также принимая во внимание как подщелевые, так и надщелевые состояния. Показана модификация аномального эффекта Джозефсона и диодного эффекта при переключении между тривиальной и нетривиальной фазами сверхпроводящих проволок для двух конфигураций спин-расщепляющего поля.

4. Проведено микроскопическое обоснование теории Гинзбурга-Ландау с инвариантом Лифшица для сверхпроводящей пленки, находящейся в контакте с материалом, характеризующимся обменным полем и спин-орбитальной связью. Изучение обратного эффекта близости позволило выявить частичную компенсацию спин-орбитальным взаимодействием распаривающего эффекта обменного поля. Обнаружено, что конкуренция этих двух факторов стабилизирует неоднородное сверхпроводящее состояние с отличным от нуля импульсом куперовской пары.

Стоит подчеркнуть, что несмотря на теоретический характер диссертационного исследования, работа ориентирована на системы, изучаемые экспериментально, и обладает **практической значимостью**. В частности, в главе 1 использовались параметры, характерные для гибридных структур InAs/Al, которые активно изучаются с целью детектирования майорановских состояний. В диссертации анализируются аспекты, важные для наблюдения обнаруженных эффектов и проводится сопоставление полученных результатов с современными экспериментами. Например, в главе 2 не взаимность сверхтока демонстрируется за счет геометрических эффектов и уже не требует многомодовости проволок. Результаты главы 3 о компенсации распаривающего эффекта спин-орбитальным взаимодействием согласуются с экспериментальными данными для гибридных нанопроволок InAs/Al/Pt.

Новизна полученных результатов подтверждается обзорами работ других авторов, обсуждающимися, по большей части, во введении и внутри каждой из глав, а также публикацией результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Достоверность результатов и обоснованность выводов, представленных в диссертации А.А. Копасова, подтверждается анализом применимости используемых теоретических подходов и методов, а также сопоставлением полученных в работе результатов с результатами других авторов.

Диссертация написана достаточно ясным языком, включает весьма полный анализ литературных источников по теме исследования. Необходимо отметить, что автором выполнен существенный объем как аналитической, так и численной работы, а качество ее результатов полностью соответствует уровню диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук. В то же время, несмотря на громоздкость выражений и сложность численных алгоритмов, автору удается давать достаточно простые интерпретации получаемых результатов и стоящих за ними физических процессов. В целом диссертация производит весьма благоприятное впечатление.

Вместе с тем следует отметить несколько замечаний к работе.

1. В первой главе при анализе делокализованных состояний и далее майорановских мод в полупроводниковой проволоке со сверхпроводящей оболочкой ничего не говорится о том, могут ли возникать состояния типа Кароли - де Жена - Матрикона с нулевой энергией и может ли их наличие потенциально препятствовать обнаружению майорановских состояний в такой системе. Тот же вопрос возникает и для состояний волноводного типа, которые не гибридизуются при включении спин-орбитального взаимодействия.

2. При выводе критерия существования фазы топологической сверхпроводимости в главе 1 утверждается, что инверсия зон, критически важная для этого явления, должна происходить периодически с изменением числа поперечных мод. При этом, например, в стандартной модели сверхпроводящей проволоки со спин-орбитальным взаимодействием определяющим для реализации нетривиальной фазы является заселенность нечетного числа подзон в многозонной проволоке. Остается неясным, зависит ли топологический характер фазы от положения уровня Ферми в рассматриваемой системе при произвольной четности числа уровней размерного квантования.

3. Во второй главе при расчете джозефсоновского тока автор учитывает вклад в транспорт как от подщелевых андреевских состояний, так и от «надщелевых резонансных уровней», что указывает на дискретный характер последних. При отсутствии дополнительных пояснений это несколько противоречит наличию непрерывного спектра боголюбовских квазичастиц при энергиях больших величины щели.

4. Обзор литературы по обратному эффекту близости выглядит недостаточно полным. В частности, мало анализируются работы других авторов по неоднородной сверхпроводимости с ненулевым импульсом куперовских пар.

Сделанные замечания не изменяют общей высокой оценки диссертации, представляющей собой важное теоретическое исследование спектральных и транспортных свойств гибридных сверхпроводящих систем. Результаты диссертации своевременно опубликованы в престижных научных журналах, докладывались на многочисленных международных научных конференциях и активно обсуждались со специалистами по явлениям переноса в сверхпроводящих наноструктурах и квантовой

