


УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр Российской
академии наук» (ФИН КазНЦ РАН)

Российская Федерация, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31


д.ф.-м.н., профессор РАН
Калачев Алексей Алексеевич
«25» марта 2024

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

«Состояния квазичастиц и электронный транспорт в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием» по специальности 1.3.8-«Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы

Джозефсоновские контакты (ДК) являются уникальным макроскопическим квантовым объектом, вызывающим неослабевающий интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. ДК применяются в метрологии (стандарт электрического напряжения) и высокочувствительной магнитометрии (СКВИД-магнитометры), но еще большие масштаб и значение сулит их применение в сверхпроводящей классической и квантовой электронике. Несмотря на более, чем полувековую историю исследований ДК, значительный прогресс в микро- и нанотехнологиях позволяет создавать структуры со слабой связью из разнообразных материалов, таких как ферромагнитные металлы и диэлектрики, магнитные и немагнитные полупроводники, в том числе с двумерным электронным газом, топологические изоляторы и другие материалы с нетривиальными свойствами. Соответственно, свойства ДК с нетривиальной слабой связью становятся также необыкновенными, расширяя их функциональность и области применений. Работа Копосова А.А., в которой рассматриваются слабые связи в виде изогнутой полупроводниковой нанопроволоки с сильным спин-орбитальным взаимодействием, приводящим к

нетривиальной зависимости критического тока от направления его протекания через нанопровод, **несомненно являются актуальной.**

Структура и содержание диссертации

Диссертация Копасова А.А. включает введение, три оригинальные главы, заключение, списки авторской и цитированной литературы, а также три приложения. Общий объем диссертации составляет 113 страниц, включая 22 рисунка. Библиография представлена 204 наименованиями.

Во введении описывается состояние исследований по теме диссертации, обосновывается актуальность работы, формулируется цель исследования, ставятся задачи, на решение которых было направлено защищаемое исследование, обосновываются новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся формулировки положений, выносимых на защиту.

Первая глава посвящена исследованию состояния квазичастиц и полупроводниковом нанопроводе, полностью покрытом сверхпроводящей оболочкой, во внешнем магнитном поле, направленном вдоль оси нанопровода. Сформулирована математическая модель, основанная на формализме уравнений Боголюбова - де Жена. Далее дается решение этих уравнений в полупроводниковой сердцевине с граничными условиями для волновой функции квазичастиц на интерфейсе полупроводник–сверхпроводник. Показано, что конкуренция нормального и андреевского отражения в полупроводниковых нанопроводах, покрытых сверхпроводящей оболочкой, приводит к появлению квазичастичных мод волноводного типа. При включении спин-орбитального взаимодействия Рашбы, вызванного радиальными электрическими полями на интерфейсе, предсказано возникновение майорановских мод в таких системах и представлено аналитическое выражение для волновой функции этих мод.

Вторая глава посвящена исследованию особенностей электронного транспорта в ДК с искривленным полупроводниковым нанопроводом с сильным спин-орбитальным взаимодействием в области слабой связи. Сформулирована математическая модель с двумя конфигурациями спин-расщепляющего поля в нанопроводе. Стационарный эффект Джозефсона проанализирован в рамках формализма уравнений Боголюбова - де Жена. В первой конфигурации ДК находится во внешнем магнитном поле, направленном перпендикулярно подложке, а спиновое расщепление в нанопроводе определяется эффектом Зеемана в поле. Для второй конфигурации спин-расщепляющее поле имеет обменную природу, оно направлено параллельно и антипараллельно оси провода в разных частях системы. Показано, что ДК через искривленный нанопровод может иметь отличную от 0 и π спонтанную разность фаз сверхпроводящего

параметра порядка в берегах контакта в основном состоянии, которая определяется углом изгиба частей нанопровода, а также величиной спин-расщепляющего ноля в нанопровode. Продемонстрирована также возможность сверхпроводящего диодного эффекта – зависимости критического тока от направления протекающего тока.

Глава три посвящена исследованию особенностей зарождения сверхпроводимости в гибридных структурах сверхпроводник - ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы. Сформулирована модель для описания обратного эффекта близости в гибридной системе, которая использует формализм уравнений Горькова. Получено уравнение на критическую температуру сверхпроводящего перехода как для случая пространственно-однородного сверхпроводящего состояния в плоскости слоев, так и для геликоидального сверхпроводящего состояния с отличным от нуля суммарным импульсом куперовских пар. Фокусом дальнейшего рассмотрения является совместный эффект обменного ноля и спин-орбитального взаимодействия на критическую температуру сверхпроводящего перехода и импульс куперовской пары. Показано, что спин-орбитальное взаимодействие приводит к частичной компенсации распаривающего эффекта обменного ноля и стабилизирует неоднородное сверхпроводящее состояние с конечным импульсом куперовских пар в системе центра масс.

В разделе Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые не вызывают сомнений и возражений.

Приложения А-В содержат детали вывода основных уравнения, граничных условий к ним и процедур численного расчета транспорта в ДК.

Наиболее важными результатами диссертации являются следующие:

- показано, что конкуренция нормального и андреевского отражения в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, приводит к появлению квазичастичных мод волноводного типа. Продемонстрировано, что наличие обусловленного спин-орбитальным взаимодействием аккумуляционного слоя для квазичастиц вблизи интерфейса полупроводник сверхпроводник может приводить к возвратному поведению щели в спектре возбуждений при изменении внешнего магнитного поля;
- для полупроводниковых нанопроводов, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, показано, что эффекты спин-орбитального взаимодействия Рашбы приводят к появлению майорановских мод.

Получено аналитическое выражение для волновой функции этих мод, определен их пространственный масштаб;

- для джозефсоновского транспорта в контактах с искривленным майорановским нанопроводом в области слабой связи показано возникновение спонтанной разности фаз в берегах контакта, зависящей от угла между сегментами нанопровода. Продемонстрировано возникновение в таких контактах сверхпроводящего диодного эффекта: зависимости критического тока от направления пропускаемого электрического тока;
- теоретически исследован обратный эффект близости в планарных гибридах сверхпроводника с магнитным материалом с сильным спин-орбитальным взаимодействием Рашбы. Показано, что спин-орбитальное взаимодействие частично компенсирует распаривающий эффект обменного поля и стабилизирует неоднородные сверхпроводящие состояния с конечным импульсом куперовских пар.

Научная новизна работы.

- впервые продемонстрирована возможность возвратного поведения щели в спектре возбуждений полупроводникового нанопровода, полностью покрытого сверхпроводящей оболочкой, в зависимости от величины внешнего магнитного поля, направленного вдоль оси нанопровода;

- установлен критерий появления краевых майорановских мод в таких структурах в присутствии текстурированного спин-орбитального взаимодействия Рашбы с радиальным вектором нормали, и определен их пространственный масштаб;

- для одномодового искривленного нанопровода предсказана зависимость критического сверхтока от направления пропускаемого тока;

- показано, что в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик с сильным спин-орбитальным взаимодействием в последнем, спин-орбитальное взаимодействие частично компенсирует распаривающий эффект обменного поля стабилизирует неоднородное сверхпроводящее состояние с конечным импульсом куперовских пар;

- анализ обратного эффекта близости в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик выполнен в чистом пределе (физически бесконечной длине свободного пробега электронов в материалах структуры).

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов определяются использованием хорошо разработанных и апробированных

подходов Боголюбова и де Жена, Горькова, адекватных сформулированным моделям; проверкой выполнения предельных случаев; проверкой удовлетворения симметричным требованиям, заложенным в формулировку модели; адекватным применением численных методов для моделирования и сравнения результатов с полученными аналитически.

Научная и практическая значимость работы состоит в демонстрации возможности реализации майорановских состояний в сверхпроводящих гибридных структурах с сильным зеемановским или обменным полем и спин-орбитальным взаимодействием, а также нетривиальные транспортные свойства таких структур. Сравнение теоретических предсказаний поведения щели в спектре возбуждений полупроводникового нанопровода в сверхпроводящей оболочке при изменении внешнего магнитного поля с результатами экспериментов по измерению туннельного транспорта позволяет косвенно судить о пиннинге уровня Ферми в полупроводниковой сердцевине. Критерий топологических переходов в полностью покрытых полупроводниковых нанопроводах может быть использован для оптимизации параметров гибридных структур для наблюдения краевых майорановских мод. Расчет сверхпроводящего транспорта в джозефсоновских контактах с искривленным полупроводниковым нанопроводом в области слабой связи интересен для реализации невзаимного сверхпроводящего транспорта в таких системах.

Замечания по диссертации:

1. сильно легированные полупроводники и хорошие металлы имеют плотности носителей тока, различающиеся минимум на 2 порядка ($\sim 10^{20}$ и $\sim 10^{22}$ см⁻³), поэтому хотелось бы видеть при формулировке модели качественное обсуждения вопросов установления равновесия между такими различными материалами еще в нормальном состоянии: положение химпотенциала в полупроводниковой нанопроволоке, сделанной из типичных полупроводников АЗВ5 или кремния и германия. Возможно, это есть в каких-то из множества приведенных ссылок, однако, хотелось бы видеть какие-то типичные числа в самой диссертации;
2. на контакте металла и полупроводника возникает барьер Шоттки, высота которого может составлять значительные доли электрон-вольта. Однако в диссертации только на стр. 13 говорится о «скачке потенциала» на границе и больше ничего, хотя бы на качественном уровне;
3. как известно, прозрачность интерфейсов между двумя проводящими материалами определяется формой и высотой энергетических барьеров на интерфейсе, а также стыковкой плотности числа каналов проводимости по

обе стороны интерфейса. На границе полупроводника и металла можно ожидать и того (барьер Шоттки) и другого (в силу огромной разности в концентрации носителей), поэтому можно ожидать очень низкой прозрачности интерфейса, почти туннельной. Поэтому вклад траекторий, пересекающих две границы, в транспорт можно ожидать незначительным. В диссертации эти вопросы не обсуждаются;

4. на стр. 29 вводится параметр η на словах, без определения, как отношение скоростей Ферми в металле и полупроводнике, и затем, под Рис. 1.4, используются его значения 0.6 и 0.5, что кажется странным, так как скорости Ферми в металлах гораздо больше, чем в полупроводниках;
5. на словах речь идет все время о нанопроволоках, однако вопрос квантования движения носителей в сечении проволоки практически не затрагивается: на стр. 61 говорится, что квантование в сверхпроводящей оболочке несущественно, так как ее толщина значительно больше фермиевской длины волны, а на стр. 67 и рис. 3.2 говорится, что движение электронов поперек плоскости слоя квантовано, а в нанопроволоке? В Главе 2 да, там сказано, что проволока однододовая, движение носителей одномерно, а в первой главе?
6. Обозначения в формуле (3.25) не объяснены, можно только догадываться как ее понимать ($W\dots$ - это степени?).

Приведенные замечания, однако, не снижают общей высокой оценки представленной диссертации, написанной весьма грамотным языком, если закрыть глаза на некоторые кальки из английского. В целом, следует отметить, что диссертационная работа Копасова А.А. демонстрирует высокую квалификацию автора как физика-теоретика, в равной мере владеющего аналитическими и численными методами, навыками моделирования полученных результатов, что существенно повышает их достоверность и значимость.

Полученные результаты представляют заметный интерес и могут быть рекомендованы к использованию в Институте физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), МГТУ им. Н. Э. Баумана, Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», Московском физико-техническом институте, Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), ВНИИА им. Н.Л. Духова, Казанском физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН и в ряде других научных центров, занимающихся исследованиями сверхпроводящих гибридов.

Основные результаты диссертации опубликованы в пяти статьях в высокорейтинговых международных и отечественных научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также докладывались на ряде российских и

международных конференций. **Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание.**

По своему содержанию, объему, новизне, достоверности, и практической значимости полученных результатов диссертация на тему «Состояния квазичастиц и электронный транспорт в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием» удовлетворяет требованиям, установленным "Положением о порядке присуждения степеней" (пункты 9-11,13,14), утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, и Паспорту специальности 1.3.8, а ее автор, Копасов Александр Анатольевич, несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа была доложена и обсуждена на заседании Ученого совета Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), протокол № 9 от 20 марта 2024 г. Отзыв на диссертацию заслушан и одобрен на заседании Ученого совета КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, протокол № 9 от 20 марта 2024 г.

Ведущий научный сотрудник
КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,
д.ф.-м.н. (01.04.02 – теоретическая физика)
КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,
420029. г. Казань, ул. Сибирский тракт 10/7.
тел.: +7 843 231 7094. e-mail: ltagirov@mail.ru
<https://kfti.knc.ru/staff/personal/user/315/>

Тагиров Ленар Рафгатович

Руководитель
КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,
к.ф.-м.н. (01.04.17 – химическая физика)
КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,
420029. г. Казань, ул. Сибирский тракт 10/7.
тел.: +7 843 272 1254. e-mail: khantim@mail.ru
<http://kfti.knc.ru/staff/personal/user/69/>

Хантимеров Сергей Мансурович

