



Копасов Александр Андреевич

**Состояния квазичастиц и электронный транспорт в
сверхпроводящих гибридных структурах со
спин-орбитальным взаимодействием**

Специальность 1.3.8 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Институте Физики Микроструктур РАН - филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук"(ИФМ РАН), Нижний Новгород

Научный руководитель: **Мельников Александр Сергеевич**,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики сверхпроводников ИФМ РАН

Официальные оппоненты: **Аксенов Сергей Владимирович**,
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Института физики им Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН)

Шукринов Юрий Маджнунович,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Объединенного Института Ядерных исследований (ОИЯИ)

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук"

Защита состоится 11 апреля 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 24.1.238.02 при Федеральном исследовательском центре "Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова" Российской академии наук по адресу: 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте http://www.ipmras.ru/UserFiles/Diss/2024/Diss_KopasovAA.pdf.

Автореферат разослан марта 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.238.02,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Водолазов Денис Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

В настоящее время исследование состояний квазичастиц и электронного транспорта в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием является одним из актуальных направлений в области физики конденсированного состояния. Эффекты спин-орбитального взаимодействия вызывают интерес в контексте их использования для расширения функциональных возможностей устройств сверхпроводящей спинтроники [1–6]. Данные системы также являются перспективной платформой для реализации топологической сверхпроводимости и майорановских мод. В литературе утверждается, что майорановские моды могут быть использованы для реализации квантовых вычислений [7–11].

Активно исследуемой платформой в контексте поиска майорановских состояний являются полупроводниковые нанопровода с сильным спин-орбитальным взаимодействием и наведенной сверхпроводимостью [12–15]. Большинство экспериментально исследуемых структур представляют собой нанопровода InSb или InAs, частично покрытые тонким слоем низкотемпературного сверхпроводника Al, Nb или NbTiN [16–18]. Одним из недостатков текущего поколения гибридных нанопроводов на основе систем InAs/Al является достаточно сильное внешнее магнитное поле, необходимое для возникновения майорановских состояний ($H \sim 1$ Т), которое сравнимо с критическим магнитным полем разрушения сверхпроводимости в оболочке. В 2018 году появилось теоретическое предложение поиска майорановских мод в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой [19]. Было предсказано, что изменение завихренности сверхпроводящего параметра порядка (возникновение нетривиального набега фазы параметра порядка при обходе вокруг сверхпроводящего цилиндра) может перевести систему в топологически нетривиальную фазу даже в сравнительно слабых магнитных полях $H \sim 0.1$ Т, направленных вдоль оси нанопровода. Актуальные и важные задачи в данном направлении включают в себя исследование состояний квазичастиц в полностью покрытых нанопроводах, изучение влияния конкуренции нормального и андреевского отражения на возможность появления краевых майорановских мод в системе, а также возможные эффекты изгиба дна зоны проводимости в полупроводниковой сердцевине.

Большое внимание в литературе также уделяется эффектам спин-орбитального взаимодействия в сверхпроводящем транспорте. В частности, одним из активно изучаемых эффектов является аномальный эффект Джозефсона [20; 21], который характеризуется возникновением отличной от 0 или π разности фаз сверхпроводящего параметра порядка в берегах контакта в основном состоянии. В недавних теоретических работах предсказывается возникновение спонтанной разности фаз в джозефсоновских

контактах с нетривиальной геометрией, а именно в контактах с искривленным полупроводниковым нанопроводом в области слабой связи [22; 23]. Анализ геометрических эффектов в джозефсоновском транспорте через полупроводниковые нанопровода с наведенной сверхпроводимостью представляет собой важную и актуальную задачу по ряду причин. В настоящее время изучаются проявления нетривиальной топологии в джозефсоновском транспорте через полупроводниковые нанопровода [24–30]. В частности, факт топологического перехода в системе, возникающего при увеличении спин-расщепляющего поля, проявляется в изменении наклона критического тока как функции спин-расщепляющего поля (см., например, работу [24]). С другой стороны, возможное применение майорановских нанопроводов для квантовых вычислений требует построения сетей нанопроводов достаточно сложных конфигураций [9; 10]. Отметим, что в этом направлении уже был достигнут некоторый экспериментальный прогресс. В частности, несколько экспериментальных групп представили результаты по изготовлению решеток нанопроводов InSb/Al [31] а также нанокрестов из InAs [32].

Отдельно стоит упомянуть, что транспортные характеристики сверхпроводящих гибридных структур с нарушенной симметрией обращения времени и симметрии инверсии могут быть анизотропными. Другими словами, в таких системах может иметь место так называемый сверхпроводящий диодный эффект. В последнее время наблюдается рост интереса к сверхпроводящему диодному эффекту. На данный момент сверхпроводящий диодный эффект активно изучается в различного рода системах, включающих в себя асимметричные сверхпроводящие квантовые интерферометры [33; 34] и материалы со спин-орбитальным взаимодействием [35–44].

Достаточно широкий круг физических явлений, возникающий в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием и включающий в себя возникновение спонтанной разности фаз в джозефсоновских переходах и спонтанных токов, могут быть описаны в рамках феноменологической теории типа Гинзбурга-Ландау (ГЛ) с линейным по градиенту сверхпроводящего параметра порядком вкладом $\sim (\mathbf{n} \times \mathbf{n}_h)(\nabla \Delta) \Delta^*$ в плотность свободной энергии (так называемый инвариант Лифшица) [45–49]. Здесь $\nabla = (\partial_x, \partial_y, \partial_z)$, \mathbf{n} (\mathbf{n}_h) - единичный вектор вдоль оси с нарушенной симметрией инверсии (единичный вектор вдоль направления обменного поля), и Δ - сверхпроводящий параметр порядка. Несмотря на наличие вывода функционала Гинзбурга-Ландау для сверхпроводников со спин-орбитальным взаимодействием как в чистом, так и в грязном пределе [50–56], обоснование инварианта Лифшица в гибридных структурах представляет собой актуальную задачу. Решение данного вопроса напрямую связано с исследованием влияния спин-орбитального

взаимодействия на критическую температуру сверхпроводящего перехода и пространственную структуру волновой функции куперовских пар в сверхпроводящих гибридных структурах типа сверхпроводник-ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием.

Целью данной работы является исследование состояний квазичастиц и электронного транспорта в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- расчет спектра энергии квазичастиц в полупроводниковом нанопроводе, полностью покрытом сверхпроводящей оболочкой, во внешнем магнитном поле, направленном вдоль оси нанопровода;
- установление критерия появления краевых майорановских мод в полностью покрытых полупроводниковых нанопроводах с сильным спин-орбитальным взаимодействием Рашбы с радиальным вектором нормали во внешнем магнитном поле, направленном вдоль оси нанопровода;
- расчет аномальной фазы и критического тока джозефсоновских контактов, содержащих односторонний искривленный полупроводниковый нанопровод в области слабой связи, в зависимости от величины спин-расщепляющего поля в нанопроводе;
- исследование взаимного влияния обменного поля и спин-орбитального взаимодействия на критическую температуру сверхпроводящего перехода и пространственный профиль параметра порядка в гибридных структурах сверхпроводник - ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы.

Научная новизна работы

Научная новизна работы определяется оригинальностью поставленных задач, полученными новыми результатами и заключается в следующем.

- 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.
- Анализ характеристик сверхпроводящего транспорта в джозефсоновских контактах с искривленным полупроводниковым нанопроводом в области слабой связи проведен в *широком* диапазоне спинового расщепления в нанопроводе, покрывающем как топологически тривиальную, так и нетривиальную области фазовой диаграммы. При заданном значении угла разориентации частей

нанопровода продемонстрирована возможность перестройки сверхпроводящей разности фаз в берегах контакта в основном состоянии спин-расщепляющим полем. Для *однодогового* искривленного нанопровода предсказан невзаимный сверхпроводящий транспорт, а именно зависимость критического сверхтока от направления пропускаемого тока.

- В рамках *микроскопической* теории проведен расчет критической температуры и профиля сверхпроводящего параметра порядка в гибридных структурах сверхпроводник - ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы. Показано, что спин-орбитальное взаимодействие частично компенсирует распаривающий эффект обменного поля и стабилизирует неоднородное сверхпроводящее состояние с конечным импульсом куперовских пар. Исследовано поведение импульса куперовских пар в зависимости от обменного поля и энергии спин-орбитального взаимодействия. В отличие от известных в литературе результатов, анализ обратного эффекта близости выполнен для гибридных структур с *конечной* толщиной слоев в *чистом* пределе.

Теоретическая и практическая значимость работы

С практической точки зрения интерес представляет реализация майорановских состояний в сверхпроводящих гибридных структурах с сильным зеемановским (или обменным) полем и спин-орбитальным взаимодействием, а также транспортные свойства таких структур. Подчеркнем ключевые аспекты возможных приложений результатов диссертации.

- Результаты расчета спектров энергии квазичастиц в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, применимы для анализа транспортных характеристик таких структур. Сравнение теоретических предсказаний поведения щели в спектре возбуждений гибридного нанопровода при изменении внешнего магнитного поля с результатами экспериментов по измерению туннельного транспорта позволяет косвенно судить о пиннинге уровня Ферми в полупроводниковой сердцевине и пространственном распределении волновой функции квазичастиц в таких устройствах.
- Критерий топологических переходов в полностью покрытых полупроводниковых нанопроводах может быть использован для оптимизации параметров гибридных структур, в которых возможно появление краевых майорановских мод.
- Расчет сверхпроводящего транспорта в джозефсоновских контактах с искривленным полупроводниковым нанопроводом в области слабой связи демонстрирует возможность перестройки разности фаз сверхпроводящего параметра порядка в берегах контакта в

основном состоянии спин-расщепляющим полем, а также возможность реализации невзаимного сверхпроводящего транспорта в таких системах.

- Расчет импульса куперовских пар в системе сверхпроводник-ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы, выполненный в рамках микроскопической теории, позволяет обосновать стандартный феноменологический подход для описания таких систем в рамках теории Гинзбурга-Ландау с инвариантом Лифшица, а также установить диапазон параметров гибридных структур, для которых такого рода упрощенное описание справедливо.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач были применены стандартные теоретические подходы, позволяющие адекватно описывать свойства сверхпроводящих гибридных структур:

- подход Боголюбова - де Жена для исследования состояний квази-частиц в сверхпроводящих гибридных структурах;
- численные методы нахождения собственных значений и собственных функций конечно-разностной аппроксимации гамильтониана системы;
- микроскопический подход, основанный на уравнениях Горькова, для исследования обратного эффекта близости в гибридных структурах сверхпроводник - ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, конкуренция нормального и андреевского отражения может приводить к появлению майорановских состояний, а также мод квазичастиц волноводного типа. Возникновение майорановских мод возможно при нечетных значениях завихренности сверхпроводящего параметра порядка в оболочке в случае, когда спектр состояний с нулевым продольным импульсом и минимальной по модулю проекцией углового момента на ось нанопровода становится инвертированным.
2. Джозефсоновские переходы с искривленным полупроводниковым нанопроводом в области слабой связи могут иметь отличную от 0 или π спонтанную разность фаз сверхпроводящего параметра порядка между берегами контакта в основном состоянии, а также демонстрировать невзаимный сверхпроводящий транспорт. Величина спонтанной разности фаз и анизотропия критического тока определяются геометрией системы и величиной спин-расщепляющего поля в нанопроводе.
3. В гибридных структурах сверхпроводник - ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы связь импульса квазичастиц

со спином приводит к ослаблению распаривающего эффекта обменного поля и стабилизирует неоднородные сверхпроводящие состояния с конечным импульсом куперовских пар.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечена выбором адекватных физических моделей, отражающих основные свойства исследуемых систем.

Основные результаты работы обсуждались на семинарах в ИФМ РАН. Материалы диссертационной работы были представлены на международных симпозиумах "Нанозифика и нанозлектроника" (Нижний Новгород, 2020, 2021); XXIII и XXIV "Уральской международной зимней школе по физике полупроводников" (Екатеринбург, 2020, 2022); XXXIX Международной зимней школе физиков-теоретиков "Коуровка" (Екатеринбург, 2022); II Международной конференции ФКС-2021, посвященной 90-летию со дня рождения академика Ю. А. Осипьяна (Черноголовка, 2021); XVIII и XIX Всероссийской конференции "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений" (Сочи, 2019, 2020). Результаты диссертации опубликованы в 13 работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [A1—A5] и 8 работ в сборниках тезисов докладов и трудов конференций [A6—A13].

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в постановке и решении теоретических задач, в обсуждении полученных результатов и их интерпретации.

В работах [A1; A2] вклад автора является определяющим в части вывода граничных условий для волновой функции квазичастиц в полностью покрытых полупроводниковых нанопроводах на интерфейсе полупроводник/сверхпроводник и численного моделирования спектров энергии квазичастиц в таких системах. Равнозначным (с А. С. Мельниковым) является вклад соискателя в решение вопроса об установлении критерия топологических переходов в таких структурах [A1].

Вклад автора в работе [A4] является определяющим в части численного моделирования сверхпроводящего транспорта в джозефсоновских контактах, содержащих искривленный полупроводниковый нанопровод в области слабой связи, и равнозначным с соавторами (А. Г. Кутлиным и А. С. Мельниковым) в части аналитических расчетов характеристик джозефсоновского транспорта в таких структурах.

В работе [A5] вклад автора является определяющим в части вывода и решения уравнения на критическую температуру сверхпроводящего перехода гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы.

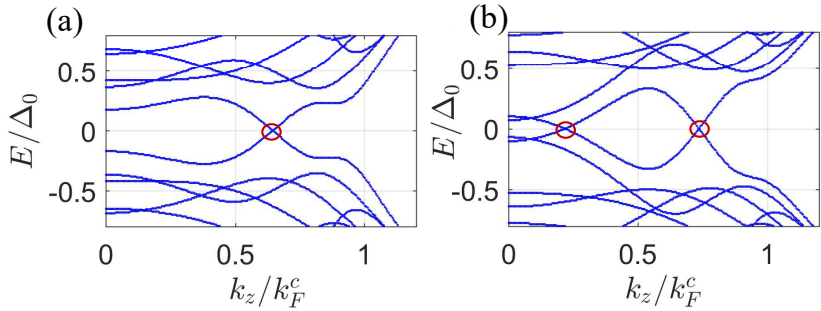


Рис. 1 — Типичные спектры энергии подщелевых квазичастиц в полупроводниковом нанопроводе, полностью покрытом сверхпроводящей оболочкой, после входа вихря для плоского профиля потенциала в полупроводниковом ядре. Здесь $\hbar k_z$ - продольный импульс, $\hbar k_F^c$ - импульса Ферми в полупроводниковой сердцевине. Красными кружками показаны пересечения подщелевых уровней и уровня Ферми. Изображения взяты из работы [A1].

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 113 страниц, включая 22 рисунка. Список литературы содержит 204 наименования.

Во **введении** описывается состояние исследований по теме диссертации на момент её написания, обосновывается актуальность выбранной темы, раскрывается новизна и значимость работы, приводятся выносимые на защиту положения и план диссертации.

Первая глава посвящена исследованию состояний квазичастиц в полупроводниковом нанопроводе, полностью покрытом сверхпроводящей оболочкой, во внешнем магнитном поле, направленном вдоль оси нанопровода. В разделе 1.1 изложена математическая модель: в данной главе для описания состояний квазичастиц используется формализм уравнений Боголюбова - де Жена (БдЖ). В разделе 1.1 приведены общие решения уравнений БдЖ в полупроводниковой сердцевине для некоторых модельных профилей потенциала конфайнмента, а также граничные условия для волновой функции квазичастиц на интерфейсе полупроводник - сверхпроводник. Результаты численного расчета спектров энергии подщелевых квазичастиц представлены в разделе 1.2. Показано, что конкуренция нормального и андреевского отражения в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, приводит к появлению квазичастичных мод волноводного типа (см. Рис. 1). Продемонстрировано, что наличие аккумуляционного слоя для квазичастиц вблизи интерфейса полупроводник-сверхпроводник может приводить к увеличению щели в спектре возбуждений нанопровода при увеличении внешнего магнитного

потока в пределах состояния с фиксированной завихренностью сверхпроводящего параметра порядка в оболочке. В разделе 1.3 исследованы эффекты текстурированного спин-орбитального взаимодействия Рашбы, вызванного радиальными электрическими полями на интерфейсе. Учет спин-орбитального взаимодействия был выполнен по теории возмущений. В разделе 1.3 представлен критерий появления майорановских мод в таких системах, представлено аналитическое выражение для волновой функции этих мод. С помощью вычисления топологического инварианта показано, что возникновение майорановских мод возможно при нечетных значениях завихренности сверхпроводящего параметра порядка в оболочке в случае, когда спектр состояний с нулевым продольным импульсом и минимальной по модулю проекцией углового момента на ось нанопровода становится инвертированным. Результаты первой главы опубликованы в работах [A1–A3; A6–A8].

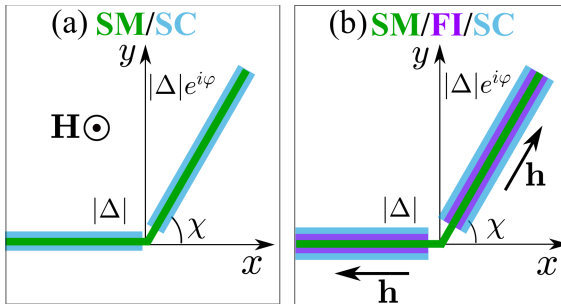


Рис. 2 — Джозефсоновский контакт с искривленным полупроводниковым нанопроводом в области слабой связи. Здесь φ - разность фаз сверхпроводящего параметра порядка в берегах контакта, и χ - угол разориентации. На панели (a) гибридный нанопровод полупроводник/сверхпроводник (SM/SC) находится во внешнем магнитном поле \mathbf{H} , а на панели (b) в нанопроводе наводится текстурированное спин-расщепляющее поле за счет контакта с ферромагнитным изолятором (FI). Изображения взяты из работы [A4].

Вторая глава посвящена исследованию особенностей электронного транспорта в джозефсоновских контактах с искривленным полупроводниковым нанопроводом с сильным спин-орбитальным взаимодействием в области слабой связи. В разделе 2.1 изложена математическая модель и представлены рассматриваемые профили спин-расщепляющего поля в нанопроводе. Основные особенности стационарного эффекта Джозефсона проанализированы в рамках формализма уравнений БдЖ для двух конфигураций спин-расщепляющего поля (см. Рис. 2). Для первой конфигурации джозефсоновский контакт находится во внешнем магнитном поле, направленном перпендикулярно подложке, и спиновое расщепление

в нанопроводе появляется из-за эффекта Зеемана. Для второй конфигурации спин-расщепляющее поле имеет обменную природу, соответствующее обменное поле направлено параллельно и антипараллельно оси провода в разных частях системы. Раздел 2.2.1 содержит аналитические результаты, полученные для первой конфигурации системы. Показано, что джозефсоновский контакт через искривленный нанопровод может иметь отличную от 0 и π спонтанную разность фаз сверхпроводящего параметра порядка в берегах контакта в основном состоянии. Спонтанная разность фаз определяется геометрией системы (углом разориентации частей нанопровода), а также величиной спин-расщепляющего поля в нанопроводе. В рамках аналитической модели также продемонстрирована возможность анизотропии критического тока в системе (сверхпроводящего диодного эффекта). Результаты численного моделирования джозефсоновского транспорта для рассматриваемых профилей спин-расщепляющего поля, представленные в разделе 2.3, также демонстрируют возникновение спонтанной разности фаз в основном состоянии системы и возможность анизотропии критического тока - зависимости критического тока от направления (см. Рис. 3). Результаты второй главы опубликованы в работах [A3; A4; A9–A11].

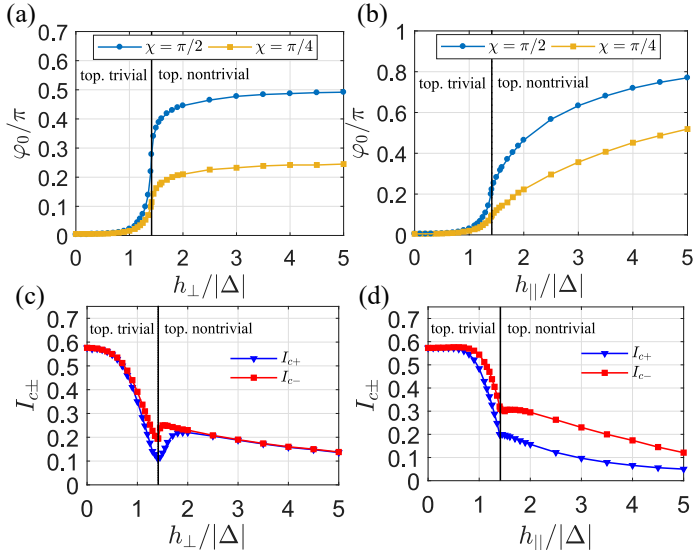


Рис. 3 — (a), (b) Спонтанная разность фаз сверхпроводящего параметра порядка в основном состоянии контакта φ_0 в зависимости от спин-расщепляющего поля в нанопроводе. (c), (d) Зависимости критических токов $I_{c+} = \max_{\varphi} I_s(\varphi)$, $I_{c-} = \min_{\varphi} |I_s(\varphi)|$ от спин-расщепляющего поля. Здесь $I_s(\varphi)$ - ток-фазовое соотношение контакта. Панели (a) и (c) ((b) и (d)) соответствуют конфигурациям, изображенным на Рис. 2(a) (Рис. 2(b)). Изображения взяты из работы [A4].

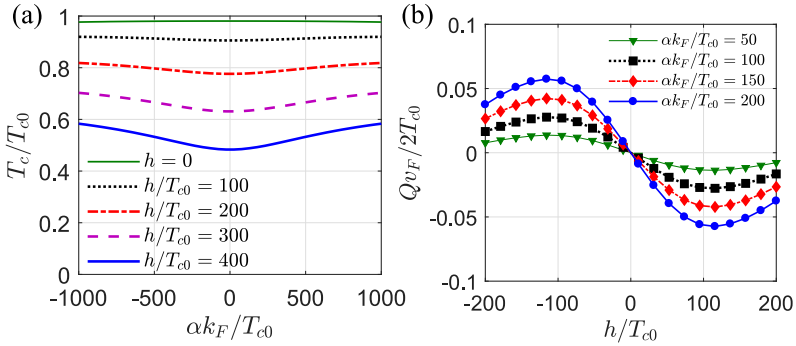


Рис. 4 — (a) Температура сверхпроводящего перехода T_c в зависимости от энергии спин-орбитального взаимодействия αk_F для $h/T_{c0} = 0, 100, 200, 300, 400$. (b) Зависимости импульса куперовских пар $Q(h)$ для $\alpha k_F/T_{c0} = 50, 100, 150, 200$. Здесь α - константа спин-орбитального взаимодействия, h - обменное поле, v_F (k_F) - скорость (импульс) Ферми в нормальном состоянии сверхпроводника, и T_{c0} - критическая температура объемного сверхпроводника. Изображения взяты из работы [A5].

Третья глава посвящена исследованию особенностей зарождения сверхпроводимости в гибридных структурах сверхпроводник - ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы. В разделе 3.1 изложена математическая модель: в данной главе для описания обратного эффекта близости используется формализм уравнений Горькова для гибридной структуры. В разделе 3.2 представлено 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. Приводится обсуждение связи импульса пары с типичной величиной инварианта Лишвица в плотности свободной энергии Гинзбурга-Ландау. В разделе 3.3 представлены качественные аргументы, проясняющие совместный эффект обменного поля и спин-орбитального взаимодействия на критическую температуру сверхпроводящего перехода и импульс куперовской пары. Достаточно простые объяснения рассматриваемых спин-зависимых эффектов следуют из того обстоятельства, что в условиях эффекта близости в сверхпроводящем слое наводится зависящее от импульса квазичастиц спин-расщепляющее поле. В разделе 3.4 представлены результаты численного решения уравнения на критическую температуру сверхпроводящего перехода и импульс куперовских пар. Показано, что спин-орбитальное взаимодействие приводит к частичной компенсации распаривающего эффекта обменного поля и стабилизирует неоднородное сверхпроводящее состояние с конечным импульсом куперовских пар в системе центра масс (см. Рис. 4). Показано, что величина

импульса определяется параметрами структуры, которые включают в себя величину обменного поля и энергию спин-орбитального взаимодействия. Результаты третьей главы опубликованы в работах [A5; A12; A13].

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

1. Показано, что конкуренция нормального и андреевского отражения в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, приводит к появлению квазичастичных мод волноводного типа. Продемонстрировано, что наличие аккумуляционного слоя для квазичастиц вблизи интерфейса полупроводник/сверхпроводник может приводить к возвратному поведению щели в спектре возбуждений при изменении внешнего магнитного потока в пределах заданного вихревого состояния.
2. Для полупроводниковых нанопроводов, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, изучены эффекты спин-орбитального взаимодействия Рашбы, вызванного радиальными электрическими полями на интерфейсе. Установлен критерий появления майорановских мод в таких системах, получено аналитическое выражение для волновой функции этих мод, определен их пространственный масштаб.
3. Изучены особенности джозефсоновского транспорта в контактах с искривленным майорановским нанопроводом в области слабой связи. Исследовано поведение спонтанной разности фаз в берегах контакта в основном состоянии при изменении спин-расщепляющего поля, переводящего нанопровод из топологически тривиальной в топологически нетривиальную фазу. Продемонстрировано возникновение в таких контактах сверхпроводящего диодного эффекта: зависимости критического тока от направления пропускаемого тока.
4. Исследованы особенности обратного эффекта близости в планарных гибридных структурах, состоящих из тонкой сверхпроводящей пленки в контакте с материалом с сильным обменным полем и 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 в системе центра масс. Рассчитаны зависимости импульса пары от параметров гибридной структуры.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. *Kopasov, A. A.* Multiple topological transitions driven by the interplay of normal scattering and Andreev scattering / A. A. Kopasov, A. S. Mel'nikov // *Phys. Rev. B.* — 2020. — Vol. 101. — P. 054515-1-054515—9.
- A2. *Kopasov, A. A.* Influence of the Accumulation Layer on the Spectral Properties of Full-Shell Majorana Nanowires / A. A. Kopasov, A. S. Mel'nikov // *Phys. Solid State.* — 2020. — Vol. 62. — P. 1592—1597.
- A3. Spontaneous Currents and Topological Protected States in Superconducting Hybrid Structures with the Spin-Orbit Coupling (Brief Review) / A. V. Samokhvalov [et al.] // *JETP Letters.* — 2021. — Vol. 113. — P. 34—46.
- A4. *Kopasov, A. A.* Geometry controlled superconducting diode and anomalous Josephson effect triggered by the topological phase transition in curved proximitized nanowires / A. A. Kopasov, A. G. Kutlin, A. S. Mel'nikov // *Phys. Rev. B.* — 2021. — Vol. 103. — P. 144520-1-144520—13.
- A5. *Kopasov, A. A.* Nucleation of superconductivity in clean superconductor-ferromagnet hybrid structures with Rashba spin-orbit interaction / A. A. Kopasov, A. S. Mel'nikov // *Phys. Rev. B.* — 2022. — Vol. 105. — P. 214508-1-214508—10.
- A6. *Копасов, А. А.* Состояния Кароли - де Жена - Матрикона в полупроводниковых проводах с наведенной сверхпроводимостью / А. А. Копасов, А. С. Мельников // *Проблемы физики твердого тела и высоких давлений: Тезисы XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых (Сочи, 18-29 сентября 2019 г.)* — С. 63—65.
- A7. *Kopasov, A. A.* Многократные топологические переходы, вызванные конкуренцией нормального и андреевского отражения / A. A. Kopasov, A. S. Mel'nikov // *Тезисы докладов XXIII Уральской международной зимней школы по физике полупроводников (Екатеринбург, 17-22 февраля 2020 г.)* — С. 11—12.
- A8. *Kopasov, A. A.* Multiple topological transitions driven by the interplay of the normal and Andreev scattering / A. A. Kopasov, A. S. Mel'nikov // *Труды XXIV Международного симпозиума "Нанопизика и нанoeлектроника г. Нижний Новгород. Т. 1.* — 2020. — С. 11—12.

- A9. *Kopasov, A. A.* Особенности аномального эффекта Джозефсона в искривленных майорановских нанопроводах / А. А. Копасов, А. Г. Кутлин, А. С. Мельников // Проблемы физики твердого тела и высоких давлений: Тезисы XIX Всероссийской конференции (Сочи, 18-27 сентября 2020 г.) — С. 105—107.
- A10. *Kopasov, A. A.* Superconducting diode effect in curved proximitized nanowires / А. А. Kopasov, А. G. Kutlin, А. S. Mel'nikov // Труды XXV Международного симпозиума "Нанозифика и нанозлектроника"(Нижний Новгород, 9-12 марта 2021 г.) Т. 1. — С. 11—12.
- A11. *Kopasov, A. A.* Geometry controlled Josephson diode based on curved proximitized nanowires / А. А. Kopasov, А. G. Kutlin, А. S. Mel'nikov // Физика конденсированных состояний: сб. тезисов II Международной конференции (Черноголовка, 31 мая - 4 июня 2021 г.) — С. 41.
- A12. *Kopasov, A. A.* Влияние спин-орбитального взаимодействия на температуру сверхпроводящего перехода гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик / А. А. Копасов, А. С. Мельников // Программа и Тезисы докладов XXIV Уральской международной зимней школы по физике полупроводников (Екатеринбург, 14-19 февраля 2022 г.) — С. 211—212.
- A13. *Kopasov, A. A.* Влияние спин-орбитального взаимодействия на температуру сверхпроводящего перехода гибридных структур сверхпроводник-ферромагнетик / А. А. Копасов, А. С. Мельников // Тезисы докладов XXXIX Международной зимней школы физиков-теоретиков "Коуровка"(Екатеринбург, 3 - 9 апреля 2022 г.) — С. 37.

Список литературы

1. *Linder, J.* Superconducting spintronics / J. Linder, J. W. A. Robinson // Nat. Phys. — 2015. — Vol. 11. — P. 307—315.
2. *Eschrig, M.* Spin-polarized supercurrents for spintronics: a review of current progress / M. Eschrig // Rep. Prog. Phys. — 2015. — Vol. 78. — 104501(50).
3. Сверхпроводящая спинтроника: современное состояние и перспективы / А. С. Мельников [и др.] // УФН. — 2022. — Т. 192. — С. 1339—1384.
4. *Tagirov, L. R.* Low-Field Superconducting Spin Switch Based on a Superconductor / Ferromagnet Multilayer / L. R. Tagirov // Phys. Rev. Lett. — 1999. — Vol. 83. — P. 2058—2061.

5. *Buzdin, A. I.* Spin-orientation-dependent superconductivity in F/S/F structures / A. I. Buzdin, A. V. Vedyayev, N. V. Ryzhanova // Europhys. Lett. — 1999. — Vol. 48. — P. 686—691.
6. *Oh, S.* A superconductive magnetoresistive memory element using controlled exchange interaction / S. Oh, D. Youm, B. M. R. // Appl. Phys. Lett. — 1997. — Vol. 71. — P. 2376—2378.
7. *Kitaev, A. Y.* Unpaired Majorana fermions in quantum wires / A. Y. Kitaev // Phys.-Usp. — 2001. — Vol. 44. — P. 131—136.
8. *Alicea, J.* New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems / J. Alicea // Rep. Prog. Phys. — 2012. — Vol. 75. — 076501(36).
9. *Das Sarma, S.* Majorana zero modes and topological quantum computation / S. Das Sarma, M. Freedman, C. Nayak // npj Quantum Inf. — 2015. — Vol. 1. — P. 15001.
10. Milestones Toward Majorana-Based Quantum Computing / D. Aasen [et al.] // Phys. Rev. X. — 2016. — Vol. 6. — 031016(28).
11. *Aguado, R.* Majorana quasiparticles in condensed matter / R. Aguado // Riv. del Nuovo Cim. — 2017. — Vol. 40. — P. 523—593.
12. *Lutchyn, R. M.* Majorana Fermions and a Topological Phase Transition in Semiconductor-Superconductor Heterostructures / R. M. Lutchyn, J. D. Sau, S. Das Sarma // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Vol. 105. — P. 077001-1-077001—4.
13. *Oreg, Y.* Helical Liquids and Majorana Bound States in Quantum Wires / Y. Oreg, G. Refael, F. von Oppen // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Vol. 105. — P. 077002-1-077002—4.
14. *Aksenov, S. V.* Strong Coulomb interactions in the problem of Majorana modes in a wire of the nontrivial topological class BDI / S. V. Aksenov, A. O. Zlotnikov, M. S. Shustin // Phys. Rev. B. — 2020. — Vol. 101. — P. 125431-1-125431—17.
15. *Shustin, M. S.* Effect of strong intersite Coulomb interaction on the topological properties of a superconducting nanowire / M. S. Shustin, S. V. Aksenov // Phys. Solid State. — 2022. — Vol. 64. — P. 2047—2053.
16. Signatures of Majorana Fermions in Hybrid Superconductor-Semiconductor Nanowire Devices / V. Mourik [et al.] // Science. — 2012. — Vol. 336. — P. 1003—1007.
17. Zero-bias peaks and splitting in an Al-InAs nanowire topological superconductor as a signature of Majorana fermions / A. Das [et al.] // Nat. Phys. — 2012. — Vol. 8. — P. 887—895.

18. Exponential protection of zero modes in Majorana islands / S. M. Albrecht [et al.] // Nature (London). — 2016. — Vol. 531. — P. 206—209.
19. Topological superconductivity in full shell proximitized nanowires / R. M. Lutchyn [et al.] // arXiv:1809.05512. — 2020.
20. Шукринов, Ю. М. Аномальный эффект Джозефсона / Ю. М. Шукринов // УФН. — 2022. — Т. 194. — С. 345—385.
21. Bobkova, I. V. Magnetoelectric effects in Josephson junctions / I. V. Bobkova, A. M. Bobkov, M. A. Silaev // J. Phys.: Condens Matter. — 2022. — Vol. 34. — 353001(32).
22. Spånslätt, C. Geometric Josephson effects in chiral topological nanowires / C. Spånslätt // Phys. Rev. B. — 2018. — Vol. 98. — 054508(7).
23. Kutlin, A. G. Geometry-dependent effects in Majorana nanowires / A. G. Kutlin, A. S. Mel'nikov // Phys. Rev. B. — 2020. — Vol. 101. — 045418(7).
24. Multiple Andreev reflection and critical current in topological superconducting nanowire junctions / P. San-Jose [et al.] // New J. Phys. — 2013. — Vol. 15. — 075019(18).
25. Marra, P. Signatures of topological phase transitions in Josephson current-phase discontinuities / P. Marra, R. Citro, A. Braggio // Phys. Rev. B. — 2016. — Vol. 93. — 220507(6).
26. Signatures of topological Josephson junctions / Y. Peng [et al.] // Phys. Rev. B. — 2016. — Vol. 94. — 085409(22).
27. Nesterov, K. N. Anomalous Josephson effect in semiconducting nanowires as a signature of the topologically nontrivial phase / K. N. Nesterov, M. Houzet, J. S. Meyer // Phys. Rev. B. — 2016. — Vol. 93. — 174502(9).
28. Energy spectrum and current-phase relation of a nanowire Josephson junction close to the topological transition / C. Murthy [et al.] // Phys. Rev. B. — 2020. — Vol. 101. — 224501(26).
29. Transparent Semiconductor-Superconductor Interface and Induced Gap in Epitaxial Heterostructure Josephson Junction / M. Kjaergaard [et al.] // Phys. Rev. Appl. — 2017. — Vol. 7. — 034029(9).
30. Conduction channels of an InAs-Al nanowire Josephson weak link / M. F. Goffman [et al.] // New J. Phys. — 2017. — Vol. 19. — 092002(5).
31. Epitaxy of advanced nanowire quantum devices / S. Gazibegovic [et al.] // Nature (London). — 2017. — Vol. 548. — P. 434—438.

32. Growth of InAs Wurtzite Nanocrosses from Hexagonal and Cubic Basis / F. Krizek [et al.] // Nano Lett. — 2017. — Vol. 17. — P. 6090—6096.
33. *Fominov, Y. V.* Asymmetric higher-harmonic SQUID as a Josephson diode / Y. V. Fominov, D. S. Mikhailov // Phys. Rev. B. — 2022. — Vol. 106. — P. 134514-1-134514—15.
34. *Souto, R. S.* Josephson Diode Effect in Supercurrent Interferometers / R. S. Souto, M. Leijnse, C. Schrade // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 129. — P. 267702-1-267702—6.
35. *Yokoyama, T.* Anomalous Josephson effect induced by spin-orbit interaction and Zeeman effect in semiconductor nanowires / T. Yokoyama, M. Eto, Y. V. Nazarov // Phys. Rev. B. — 2014. — Vol. 89. — 195407(14).
36. *Dolcini, F.* Topological Josephson ϕ_0 junctions / F. Dolcini, M. Houzet, J. S. Meyer // Phys. Rev. B. — 2015. — Vol. 92. — 035428(7).
37. Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors / R. Wakatsuki [et al.] // Sci. Adv. — 2017. — Vol. 3. — e1602390(8).
38. Nonreciprocal charge transport at topological insulator/superconductor interface / K. Yasuda [et al.] // Nat. Commun. — 2019. — Vol. 10. — 2734(6).
39. *Daido, A.* Intrinsic Superconducting Diode Effect / A. Daido, Y. Ikeda, Y. Yanase // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 128. — P. 037001-1-037001—6.
40. *Yuan, N. F. Q.* Supercurrent diode effect and finite momentum superconductivity / N. F. Q. Yuan, L. Fu // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. — 2022. — Vol. 119. — e2119548119(7).
41. *Ilić, S.* Theory of the Supercurrent Diode Effect in Rashba Superconductors with Arbitrary Disorder / S. Ilić, F. S. Bergeret // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 128. — P. 177001-1-177001—6.
42. Hybrid helical state and superconducting diode effect in superconductor/ferromagnet/topological insulator heterostructures / T. Karabassov [et al.] // Phys. Rev. B. — 2022. — Vol. 106. — P. 224509-1-224509—11.
43. *Kokkeler, T. H.* Field-free anomalous junction and superconducting diode effect in spin-split superconductor/topological insulator junctions / T. H. Kokkeler, A. A. Golubov, F. S. Bergeret // Phys. Rev. B. — 2022. — Vol. 106. — P. 214504-1-214504—8.
44. *Davydova, M.* Universal Josephson diode effect / M. Davydova, S. Prembabu, L. Fu // Sci. Adv. — 2022. — Vol. 8. — eabo0309(7).

45. *Buzdin, A.* Direct Coupling Between Magnetism and Superconducting Current in the Josephson φ_0 Junction / A. Buzdin // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 101. — 107005(4).
46. Currents Induced by Magnetic Impurities in Superconductors with Spin-Orbit Coupling / S. S. Pershoguba [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2015. — Vol. 115. — P. 116602-1-116602—6.
47. *Mironov, S.* Spontaneous Currents in Superconducting Systems with Strong Spin-Orbit Coupling / S. Mironov, A. Buzdin // Phys. Rev. Lett. — 2017. — Vol. 118. — P. 077001-1-077001—5.
48. *Robinson, J. W. A.* Chirality-controlled spontaneous currents in spin-orbit coupled superconducting rings / J. W. A. Robinson, A. V. Samokhvalov, A. I. Buzdin // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99. — 180501(5).
49. Phase transitions in superconductor/ferromagnet bilayer driven by spontaneous supercurrents / Z. Devizorova [et al.] // Phys. Rev. B. — 2021. — Vol. 103. — P. 064504-1-064504—7.
50. *Edelstein, V. M.* Characteristics of the Cooper pairing in two-dimensional noncentrosymmetric electron systems / V. M. Edelstein // Sov. Phys. JETP. — 1989. — Vol. 68. — P. 1244—1249.
51. *Edelstein, V. M.* The Ginzburg-Landau equation for superconductors of polar symmetry / V. M. Edelstein // J. Phys.: Condens. Matter. — 1996. — Vol. 8. — P. 339—349.
52. *Samokhin, K. V.* Magnetic properties of superconductors with strong spin-orbit coupling / K. V. Samokhin // Phys. Rev. B. — 2004. — Vol. 70. — P. 104521-1-104521—13.
53. *Kaur, R. P.* Helical Vortex Phase in the Noncentrosymmetric CePt₃Si / R. P. Kaur, D. F. Agterberg, M. Sigrist // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 94. — P. 137002-1-137002—4.
54. *Dimitrova, O.* Theory of a two-dimensional superconductor with broken inversion symmetry / O. Dimitrova, M. V. Feigel'man // Phys. Rev. B. — 2007. — Vol. 76. — P. 014522-1-014522—22.
55. *Mineev, V. P.* Nonuniform states in noncentrosymmetric superconductors: Derivation of Lifshitz invariants from microscopic theory / V. P. Mineev, K. V. Samokhin // Phys. Rev. B. — 2008. — Vol. 78. — P. 144503-1-144503—5.
56. *Houzet, M.* Quasiclassical theory of disordered Rashba superconductors / M. Houzet, J. Meyer // Phys. Rev. B. — 2015. — Vol. 92. — P. 014509-1-014509—5.

Копасов Александр Андреевич

Состояния квазичастиц и электронный транспорт в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____