

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
ИМ.А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25.04.2024 № 4

О Присуждении Копасову Александру Андреевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Состояния квазичастиц и электронный транспорт в сверхпроводящих гибридных структурах со спин-орбитальным взаимодействием» по специальности 1.3.8 — физика конденсированного состояния – принята к защите 01 февраля 2024 г. (протокол заседания №2) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Копасов Александр Андреевич, 1992 года рождения, в 2015 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «Квантовая радиофизика и лазерная физика», освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре ИФМ РАН (срок

обучения 01.09.2015 – 30.06.2019), работает в должности младшего научного сотрудника Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Диссертация выполнена в отделе физики сверхпроводников Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель – Мельников Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий отдела физики сверхпроводников Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

1. 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).
2. Шукринов Юрий Маджнунович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Объединенного Института Ядерных исследований (ОИЯИ).

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук" (ФИЦ КазНЦ РАН) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный

исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН), Тагировым Ленаром Рафгатовичем, и утвержденном Калачевым Алексеем Алексеевичем, директором Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»» (ФИЦ КазНЦ РАН), указала, что «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.» В конце отзыва делается заключение, что диссертация Копасова Александра Андреевича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой

степени кандидата физико-математических наук (пункты 9-11,13,14 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях постановления Правительства РФ)), а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Соискатель по теме диссертации имеет 5 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах, 4 из которых приведены ниже:

1. A.A. Kopasov and A.S. Mel'nikov, Multiple topological transitions driven by the interplay of normal scattering and Andreev scattering // Physical Review B, vol. 101, February 26, 2020, pp. 054515-1-054515-9.
2. A.V. Samokhvalov, A.A. Kopasov, A.G. Kutlin, S.V. Mironov, A.I. Buzdin, and A.S. Mel'nikov, Spontaneous Currents and Topological Protected States in Superconducting Hybrid Structures with the Spin-Orbit Coupling (Brief Review) // JETP Letters, Vol. 113, No. 1, March 11, 2021, pp. 34-46.
3. A.A. Kopasov, A.G. Kutlin, and A.S. Mel'nikov, Geometry controlled superconducting diode and anomalous Josephson effect triggered by the topological phase transition in curved proximitized nanowires // Physical Review B, Vol. 103, April 30, 2021, pp. 144520-1-144520-13.
4. A.A. Kopasov, A.S. Mel'nikov, Nucleation of superconductivity in clean superconductor-ferromagnet hybrid structures with Rashba spin-orbit interaction // Physical Review B, Vol. 105, June 9, 2022, pp. 214508-1-214508-10.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных физике эффекта Джозефсона в контактах

сверхпроводник – ферромагнетик, динамике джозефсоновских φ_0 переходов, а также транспортным и топологическим свойствам квантовых наноструктур (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Аксенов С. В. – более 15 публикаций, оппонент Шукринов Ю. М. – более 20 публикации, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, на основании выполненных соискателем исследований:

Показано, что конкуренция нормального и андреевского отражения в полупроводниковых нанопроводах, полностью покрытых сверхпроводящей оболочкой, может приводить 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. **Установлен** критерий появления майорановских состояний в данных системах, **определена** глубина затухания майорановских мод.

Для джозефсоновских переходов с искривленным полупроводниковым нанопроводом в области слабой связи **показано**, что контакты данного типа могут иметь отличную от 0 или π спонтанную разность фаз сверхпроводящего параметра порядка между берегами контакта в основном состоянии, а также обладать невзаимными сверхпроводящими транспортными свойствами. **Установлено**, что величина спонтанной разности фаз и анизотропия критического тока определяются геометрией системы и величиной спин-расщепляющего поля в нанопроводе,

Для планарных гибридных структур, состоящих из тонкой сверхпроводящей пленки и материала 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.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

- Результаты расчета спектров энергии квазичастиц в полупроводниковых нанопроводах со сверхпроводящей оболочкой применимы для анализа экспериментальных 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 оценить величину пиннинга уровня Ферми в полупроводниковой сердцевине и пространственном распределении волновой функции квазичастиц в таких устройствах.
- Критерий топологических переходов в полностью покрытых сверхпроводником 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 между берегами контакта в основном состоянии спин-расщепляющим полем, а также возможность реализации невзаимного сверхпроводящего транспорта (диодного эффекта) 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.

Оценка достоверности результатов исследования:

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

Личный вклад соискателя состоит в решении поставленных теоретических задач, анализе и обработке результатов теоретических исследований. Подготовка всех публикаций по выполненной работе проводилась с участием соискателя, он также принимал непосредственное участие в постановке задач.

В ходе защиты диссертации официальным оппонентом Ю. М. Шукриновым было высказано следующее замечание:

«В диссертации приведены полученные численно зависимости спонтанной разности фаз от величины расщепляющего поля и угла разориентации нанопроводов. В ряде случаев приведено качественное сопоставление с аналитическими результатами, однако фитинг соответствующих зависимостей не представлен».

Соискатель Копасов А.А. в своём ответе сообщил, что

«Аналитические результаты, представленные в разделе 2.2.1 диссертации основаны на квазиклассическом приближении и справедливы в пределе большого химпотенциала μ по сравнению с параметром наведенной щели $|\Delta|$. Результаты численного расчета, представленные в разделе 2.3.1, справедливы при произвольном соотношении параметров и построены для случая $\mu \sim |\Delta|$. В этой связи совершенно естественно, что сопоставление полученных результатов выявило только качественное согласие, а не количественное.»

На заседании 25.04.2024 г. диссертационный совет, за результаты исследования квазичастичных состояний в полупроводниковых нанопроводах со сверхпроводящей оболочкой, особенностей джозефсоновского транспорта через искривленные полупроводниковые нанопровода, а также обратного эффекта близости в гибридных структурах сверхпроводник – ферромагнетик со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы, принял решение присудить Копасову А. А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.8. — физика конденсированного состояния), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Ученый секретарь диссертационного совета



Гавриленко В.И.

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 25.04.2024 г.