

*На правах рукописи*

**Аладышкин Алексей Юрьевич**

**Эффекты размерного квантования и  
локализованной сверхпроводимости в  
гибридных металлических наноструктурах**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико–математических наук

Нижний Новгород — 2020

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН — филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН), Нижний Новгород

Научный консультант: **Мельников Александр Сергеевич**,  
доктор физико–математических наук, г. н. с.,  
зав. отделом физики сверхпроводников ИФМ РАН

Официальные оппоненты: **Пудалов Владимир Моисеевич**,  
член–корр. РАН, доктор физико–математических наук,  
старший научный сотрудник, и. о. рук. Центра высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов  
ФГБУН Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН

**Тагиров Ленар Рафгатович**,  
доктор физико–математических наук, профессор,  
в. н. с. лаборатории нелинейной оптики Казанского  
физико–технического института им. Е. К. Завойского —  
обособленного структурного подразделения ФГБУН ФИЦ  
«Казанский научный центр Российской академии наук»

**Зайцев-Зотов Сергей Владимирович**,  
доктор физико–математических наук, старший научный  
сотрудник, рук. лаборатории электронных процессов  
в квантовых структурах и зам. директора ФГБУН Институт  
радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

Ведущая организация: **ФГБУН Институт физики твёрдого тела РАН**  
Черноголовка Московской обл.

Защита состоится 18 февраля 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.03 при Институте физики микроструктур РАН (603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ РАН и на сайте [http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2020AladyshkinAY/Thesis\\_Aladyshkin\\_2020.pdf](http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/2020AladyshkinAY/Thesis_Aladyshkin_2020.pdf)

Автореферат диссертации разослан «\_\_» декабря 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного  
совета Д 002.069.03, доктор физико–  
математических наук, профессор РАН

Д. Ю. Водолазов

# Общая характеристика работы

## Актуальность и степень разработанности темы исследования

Вопрос о сосуществовании двух антагонистических коллективных электронных явлений – сверхпроводимости (S) и ферромагнетизма (F), поставленный еще в 50–60-х годах XX века (например, [1,2]) до сих пор постоянно привлекает внимание исследователей (см. обзоры [3–5]). Интерес к гибридным S/F системам также связан с возможностью создания сверхпроводящих систем с контролируемым магнитным пиннингом [6,7] и систем с квазидномерными сверхпроводящими каналами, повторяющими форму магнитных доменов или доменных стенок [8,9,10], создания логических элементов [11], элементов с контролируемыми слабыми связями [12] и спин-поляризованным транспортом [13,14], создания необычных сверхпроводящих состояний ( $\pi$ -контактов [15], триплетной и пространственно-модулированной сверхпроводимости [16,17]). Всё вышеперечисленное может найти применение при разработке устройств сверхпроводящей электроники и флаксоники.

Можно выделить три направления исследований гибридных S/F структур:

1. Исследование термодинамических и транспортных свойств ферромагнитных сверхпроводников (например, [9,10,18,19]).

2. Исследование термодинамических и транспортных свойств гибридных структур S/F и S/F/S с доминирующим *обменным* взаимодействием между S и F подсистемами (например, [13–17]). Отметим, что обменное взаимодействие является примером короткодействующего взаимодействия, что накладывает серьезные ограничения на толщины слоёв и качество границ раздела.

3. Исследование термодинамических и транспортных свойств гибридных структур S/F и F/S/F с доминирующим *электромагнитным* взаимодействием между S и F подсистемами (например, [6–8,20–22], а также обзор [A8] и приведенные в нём ссылки). Подавление обменного взаимодействия обычно достигается введением изолирующих прослоек или применением ферромагнитных изоляторов. Отметим, что магнитостатическое взаимодействие является дальнедействующим, что в некоторой степени облегчает создание гибридных структур такого рода, поскольку не требует создания туннельно-прозрачных интерфейсов и не накладывает жёсткие требования на толщины слоёв и степень их однородности.

Свойства сверхпроводящих структур в неоднородном магнитном поле, создаваемом ферромагнитными доменами и частицами, а также токнесущими проводниками являются основным предметом исследования в данной диссертации. Кратко обсудим ключевые работы, посвященные анализу зарождения сверхпроводимости и исследованию транспортных свойств сверхпроводящих каналов в неоднородном магнитном поле.

В теоретических работах [9,10] была предсказана так называемая доменная сверхпроводимость (domain-wall superconductivity, DWS) – новое неоднород-

ное сверхпроводящее состояние, локализованное вблизи уединённой доменной стенки в ферромагнитном сверхпроводнике или в сверхпроводящей плёнке над доменной стенкой. В работе [10] было показано, что внешнее магнитное поле  $H$ , ориентированное перпендикулярно плоскости сверхпроводящей плёнки, может компенсировать (частично или полностью) перпендикулярную  $z$ -компоненту «встроенного» магнитного поля над ферромагнитным доменом с противоположной намагниченностью по отношению в знаку  $H$ . Такая компенсация при условии  $|H| \gtrsim B_0$  может привести к перемещению сверхпроводящего зародыша в область с ослабленным магнитным полем,  $B_0$  есть амплитуда  $z$ -компоненты магнитного поля над доменами. В литературе такое состояние получило название «компенсированная сверхпроводимость над обратными доменами» (reverse-domain superconductivity, RDS), которая формируется над магнитными доменами с противоположной по отношению к знаку  $H$  намагниченностью. Переход от доменной сверхпроводимости при  $|H| \ll B_0$  к компенсированной сверхпроводимости при  $|H| \gtrsim B_0$  сопровождается необычным повышением критической температуры  $T_c$  при увеличении  $|H|$ , при этом форма зависимости  $T_c(H)$  может рассматриваться как результат конкуренции различных механизмов формирования локализованной сверхпроводимости. Для обозначения немонотонной зависимости  $T_c(H)$  часто используется термин «возвратная сверхпроводимость» (reentrant superconductivity). Диссертантом в работах [A5], [A6] и [A7] теоретически исследованы особенности зарождения сверхпроводимости в гибридных тонкоплёночных S/F и F/S/F системах в поле одномерной крупномасштабной доменной структуры с учётом неоднородного распределения магнитного поля над доменами, конечной толщины изолирующей прослойки и ширины доменных стенок, а также с учётом неоднородности поля по толщине сверхпроводящей плёнки. Об актуальности этих работ свидетельствует высокий индекс цитирования.

Экспериментальному исследованию модификации зависимости  $T_c(H)$  в магнитосвязанных S/F структурах посвящены работы [8,20–22]. Для сверхпроводящих плёнок в поле решётки магнитных частиц была обнаружена индуцированная внешним магнитным полем сверхпроводимость (field-induced superconductivity, FIS) в областях между магнитными частицами [20,21]. К числу пионерских работ по исследованию модификации формы зависимости  $T_c(H)$  полями рассеяния магнитных доменов в планарных S/F структурах следует отнести работы [8] и [22]. Поскольку использованные в работе [8] ферромагнитные кристаллы  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  легко перемагничивались во внешнем поле, авторам не удалось наблюдать чёткий и обратимый переход от (предположительно) доменной сверхпроводимости к компенсированной сверхпроводимости над обратными доменами. Такой переход был впервые обнаружен для тонкоплёночных структур  $\text{CoPd}/\text{Nb}/\text{CoPd}$  в работе [A5] при участии диссертанта. В работе [23] было показано, что путем неполного размагничивания можно получать произвольную остаточную намагниченность для многослойных ферромагнитных плёнок типа  $\text{CoPt}$  и  $\text{CoPd}$ . Это позволило диссертанту получить немонотонную зависимость  $T_c(H)$  с желаемым соотношением между

амплитудами максимумов критической температуры, соответствующих компенсированной сверхпроводимости над доменами с положительной и отрицательной намагниченностью различной ширины [A9]–[A12]. Обнаруженный эффект был назван управляемым размерным эффектом (tunable quantum-size effect) для сверхпроводящего конденсата в неоднородном магнитном поле.

Для исследования транспортных свойств сверхпроводников в неоднородном магнитном поле следует использовать S/F системы с хорошо определенной структурой полей рассеяния для того, чтобы избежать ослабления эффектов из-за пространственной нерегулярности магнитного поля, индуцированного лабиринтными доменными структурами. Принципиальная возможность повышения критического тока сверхпроводящих структур в критическом состоянии при наличии магнитных элементов рассмотрена в работе [24]. В работах [25] и [26] экспериментально обнаружен диодный эффект – зависимость критического тока от его полярности, связанный с эффектом частичной компенсации внешнего неоднородного поля собственным полем сверхтока. В серии работ [27–30] исследована анизотропия сопротивления и направления проникновения магнитного потока, индуцированная в сверхпроводящих плёнках и кристаллах полем ламинарной доменной структуры в слоях пермаллоя (сплава Fe и Ni). Отметим, что направление доменных стенок в слоях пермаллоя определяется параллельной компонентой внешнего поля и потому может быть легко изменено переориентацией подмагничивающего поля.

В работе [31] было показано, что доменная структура кристаллов  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  при надлежащей подготовке поверхности может стать ламинарной с прямолинейными доменными стенками, положения которых не зависят последующих технологических операций и внешнего поля в процессе измерений. Это позволило диссертанту создать серию гибридных структур  $\text{Al}/\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  и  $\text{Pb}/\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  с заданным расположением доменных стенок относительно сверхпроводящего микромостика (т. е. транспортного тока). В работе [A20] для  $\text{Al}/\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  крестообразной формы была обнаружена гигантская анизотропия сопротивления, что является прямым экспериментальным подтверждением формирования локализованных сверхпроводящих каналов в поле доменной структуры. Для гибридных S/F систем с уединёнными доменными стенками в состояниях компенсированной и доменной сверхпроводимости была теоретически и экспериментально обнаружена зависимость пропускной способности сверхпроводящих каналов от полярности тока [A22], [A23]. Заметим, что анизотропия транспортных свойств гибридных S/F структур с изолированными доменами и доменными стенками до появления работ диссертанта не изучалась. Для структур  $\text{Pb}/\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  по инициативе и при участии диссертанта была выполнена серия работ по визуализации переходов между доменной и компенсированной сверхпроводимостью методом низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии [A17], [A18]. Позднее аналогичные исследования для тонкоплёночных гибридных структур  $\text{Pb}/\text{CoPd}$  были

проведены методом сканирующей туннельной спектроскопии [32].

Исследование транспортных свойств латерально-ограниченных гибридных S/F систем тесно связано с вопросами о роли граничных условий и свойствах мезоскопических сверхпроводников. Наличие внешних и/или внутренних границ изменяет условие для появления сверхпроводимости, в результате чего сверхпроводящее состояние может возникать в виде локализованного решения вблизи границ, при этом объёмная сверхпроводимость внутри образца вдали от границ будет подавлена [33]. Формирование прикраевой сверхпроводимости вблизи внешних границ для мезоскопических сверхпроводников было обнаружено методами сканирующей туннельной микроскопии [34,35] и сканирующей лазерной микроскопии [A1]. Для мезоскопических сверхпроводников характерно осцилляторное изменение критической температуры (эффект Литтла-Паркса [36]), намагничённости и критического тока как функции внешнего поля  $H$ , при этом период осцилляций соответствует изменению завихренности образца на единицу. Смена предпочтительного режима зарождения в мезоскопических S/F структур в поле магнитных частиц приводит к резкому изменению завихренности [37], а также к резкому изменению наклона огибающей  $T_c(H)$ , амплитуды и периода осцилляций Литтла-Паркса. Этот эффект был исследован диссертантом теоретически в работах [A15] и [A16]. Ранее было показано [38], что в перфорированных сверхпроводящих микроэлементах с потенциалом пиннинга без центра инверсии при инжекции тока с нулевым средним может возникать средний поток вихрей, что сопровождается появлением среднего напряжения и является проявлением диодного или ratchet-эффекта. Диссертантом было показано, что генерация высших чётных фурье-гармоник напряжения в образце с потенциалом пиннинга нарушенной симметрии является естественным обобщением диодного эффекта и потому может быть использована в качестве чувствительного теста на симметрию потенциала пиннинга и внешних границ, а также при исследовании эффектов соизмеримости [A2].

Неоднородное магнитное поле регулируемой амплитуды может быть создано токонесущими проводниками. В работе [39] было исследовано зарождение сверхпроводимости в сверхпроводящем мостике в неоднородном поле управляющего провода, имеющего форму меандра, и показано, что в такой системе может реализоваться возвратная сверхпроводимость. Это направление исследований было развито серии работ [A24] и [A25]. Было показано, что квантованное изменение числа пар вихрь-антивихрь вблизи прямолинейного управляющего провода приводит к осцилляциям критического тока  $I_c$  сверхпроводящего Al микроэлемента в зависимости от силы тока в управляющем Nb проводе.

Открывшееся окно возможностей позволило перейти от исследования макроскопических размерных эффектов для сверхпроводящего конденсата к изучению микроскопического квантового размерного эффекта для квазичастиц в

металлических наноструктурах методами низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии (STM) и спектроскопии (STS). В качестве материала для исследования был выбран свинец (Pb), что связано со следующими обстоятельствами. Во-первых, тонкие Pb плёнки и квазидвумерные островки с плоскими вершинами являются удобным объектом для исследования особенностей вихревого состояния методом STM/STS [34,35]. Во-вторых, сверхпроводящими свойствами обладают не только тонкие Pb плёнки, но и двумерные реконструкции, такие как полосатая несоизмеримая SIC-фаза (stripe-incommensurate) и  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  Pb/Si(111) [40,41]. В-третьих, Pb как материал с тяжелыми ядрами часто применяют в качестве допирующей примеси при создании наноструктур с нетривиальными электронными свойствами [42,43]. В-четвёртых, в плёнках Pb очень ярко проявляются размерные эффекты, связанные с формированием стоячих электронных волн (quantum-well states, QWS) и подзон размерного квантования. Это приводит к появлению резонансных особенностей для транспортных, фотоэмиссионных и туннельных характеристик тонких металлических плёнок [44–46]. Отметим, что точечная туннельная спектроскопия, выполненная для ограниченного числа точек, не позволяет надёжно установить границы областей с постоянной толщиной Pb слоя. Диссертантом было показано, что модуляционная STS методика представляет собой превосходный диагностический инструмент, позволяющий визуализировать Pb террасы с различной чётностью числа монослоёв Pb и обнаруживать скрытые дефекты, такие как моноатомные ступени подложки, инородные включения, дислокационные линии и участки с неквантованным изменением толщины посредством изучения особенностей резонансного туннелирования через QWS-состояния.

Кроме QWS-состояний *внутри* металлической плёнки, размерные состояния могут возникать *над* слоем металла в локализирующем электрическом поле. Если локализация происходит в кулоновском потенциале сил электрического изображения, то такие состояния называют image potential states (IPS) [47]. В большой степени эффект локализации электронов над проводящей поверхностью может проявляться при наличии электрического поля в зазоре между двумя металлическими электродами. Такие состояния можно называть модифицированные IPS-состояния. Осцилляторная зависимость коэффициента прохождения  $D$  через трапецевидный потенциальный барьер от разности потенциалов  $V$  была исследована в работе Gundlach [48]. Было показано, что это приводит к осцилляции дифференциальной проводимости  $dI/dV$  туннельного контакта (осцилляции Гундлаха). В работе [49] предложен метод оценки локальной работы выхода образца по результатам анализа положений резонансных пиков  $V_n$  в зависимости от их порядкового номера и экстраполяции линейной аппроксимации для зависимости  $V_n(n^{2/3})$ , полученной для высших резонансов, в точку  $n = 0$ . Таким методом были получены оценки локальной работы выхода для Pt [49], Ag и Co [50], NaCl [51]. На основе исследования спектра эмиссионных IPS резонансов диссертантом получена оценка локальной работы выхода для террас Pb(111) постоянной высоты.

## Цели диссертационного исследования

- определение области параметров, при которых можно получить локализованные состояния в сверхпроводящих плёнках в неоднородном магнитном поле, создаваемом магнитными доменами, частицами или токонесящими проводниками;
- визуализация различных локализованных сверхпроводящих состояний методами сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии;
- оценка критического тока сверхпроводящих наноструктур и гибридных S/F структур в режиме локализованной сверхпроводимости;
- изучение возможности манипулирования положением локализованных сверхпроводящих каналов, возникающих в неоднородном магнитном поле, посредством изменения внешнего магнитного поля и/или температуры;
- исследование локальных электронных свойств металлических гибридных наноструктур методом резонансной туннельной спектроскопии через квантово-размерные состояния.

## Научная новизна

- Для тонкоплёночных гибридных S/F и F/S/F систем с крупномасштабной лабиринтной доменной структурой в ферромагнитных слоях (таких как CoPd/Nb/CoPd и Al/CoPt) экспериментально обнаружена возвратная сверхпроводимость, теоретически и экспериментально исследовано влияние амплитуды неоднородного магнитного поля и ширины магнитных доменов на форму зависимости критической температуры  $T_c$  от внешнего магнитного поля  $H$ .
- Для тонкоплёночных S/F систем с ламинарной доменной структурой на основе аналитических оценок и результатов численного моделирования предсказан новый режим зарождения сверхпроводимости над центрами магнитных доменов при  $H \simeq 0$ , при этом скачкообразное перемещение сверхпроводящего зародыша между центрами положительных и отрицательных доменов при изменении знака внешнего поля  $H$  должно приводить к излому на зависимости  $T_c(H)$  при  $H = 0$ .
- Для S/F систем с ламинарной доменной структурой на основе численного решения уравнений Гинзбурга–Ландау проведен теоретический анализ зарождения сверхпроводимости в плёнках конечной толщины с учётом неоднородности магнитного поля по толщине.
- Для мезоскопических S/F систем (микромостиков Al крестообразной формы в поле ламинарной доменной структуры в кристаллах феррита бария  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) экспериментально обнаружена гигантская анизотропия сопротивления, индуцированная полями рассеяния магнитных доменов и свидетельствующая о появлении квазиодномерных сверхпроводящих каналов в окружении нормального металла.



- Для мезоскопических S/F систем (микромостиков Al/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>) экспериментально обнаружен диодный эффект в состоянии компенсированной сверхпроводимости. Показано, что диодный эффект обусловлен формированием безвихревого канала, который переносит значительную часть сверхпроводящего тока, для транспортного тока определенной полярности. Для мезоскопических гибридных S/F структур предсказан диодный эффект в состоянии доменной сверхпроводимости.
- Для перфорированных сверхпроводящих микромостиков исследована связь нелинейных свойств таких образцов и симметрии потенциала пиннинга, в частности, обнаружена генерация чётных фурье-гармоник в отклике наноструктурированных микромостиков Al с нарушенной пространственной симметрией потенциала пиннинга.
- Для мезоскопических S/F систем (микромостиков Pb/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>) экспериментально визуализирована доменная сверхпроводимость, а также переходы между доменной и компенсированной сверхпроводимостью над обратными доменами при изменении внешнего поля. Для сверхпроводящих Nb микромостиков в перпендикулярном магнитном поле экспериментально визуализирована прикраевая сверхпроводимость, а также переходы между прикраевой и объёмной сверхпроводимостью при изменении внешнего поля.
- Для сверхпроводящих микромостиков в поле управляющего провода с током (мезоскопических криотронов) предсказаны осцилляции критического тока, аналогичные осцилляциям критического тока джозефсоновских переходов; такие осцилляции для мезоскопических Al/Nb криотронов были обнаружены экспериментально.
- Для тонких плёнок Pb(111) предложен оригинальный способ визуализации скрытых дефектов, таких как монатомные ступени в подложке, инородные включения, дислокационные линии и террасы с неквантованной толщиной.
- Для тонких плёнок Pb(111) на основе результатов туннельных спектроскопических измерений получена оценка локальной работы выхода  $3.8 \pm 0.1$  эВ. Показано, что эта величина для террас Pb(111) квантованной высоты не зависит от толщины плёнки и формы иглы туннельного микроскопа.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Полученные в диссертационной работе результаты вносят существенный вклад в понимание особенностей формирования и транспортных свойств гибридных S/F структур с магнитной связью в режиме локализованной сверхпроводимости. Практическая значимость работы связана с

- возможностью создания квазиодномерных сверхпроводящих каналов и управления их параметрами, которая имеет перспективы применения в устройствах сверхпроводящей электроники (флаксоники);

- возможностью создания сверхпроводящих элементов с анизотропными характеристиками (проводимостью, критическим током, нелинейными свойствами);
- существенным развитием методов диагностики металлических наноструктур, основанных на резонансном туннелировании через квазистационарные квантово–размерные состояния, с возможностью визуализации скрытых дефектов в металлических плёнках (таких как участки с неквантованным изменением высоты, инородные включения и дислокационные линии) и оценки микроскопических параметров таких плёнок (скорости и импульса Ферми, эффективной массы и локальной работы выхода).

## Методология и методы исследования

Для решения теоретических задач применялись следующие подходы, позволяющие качественно и количественно описывать термодинамические и транспортные свойства наноструктурированных сверхпроводников и гибридных S/F систем с магнитной связью: приближение Лондонов для расчёта параметров вихревых структур и распределения тока в сверхпроводящих мостиках при низких температурах; стационарная и нестационарная теории Гинзбурга–Ландау (ГЛ) для описания сверхпроводящего состояния при высоких температурах в однородном или неоднородном магнитном поле с помощью программы GLDD; численные методы решения одномерных и двумерных задач Штурма–Лиувилля со смешанными граничными условиями.

Для решения экспериментальных задач применялись следующие стандартные методы и подходы: термическое и электронно–лучевое осаждение металлов (Al, Pb, Co, Pt, Pd) и полупроводников (Si, Ge) в условиях сверхвысокого вакуума; магнетронное напыление Nb плёнок в атмосфере Ar; электронно–лучевая литография и «взрывное» (lift-off) травление; четырехточечный метод измерения электрического сопротивления и получения вольт–амперных характеристик микромостиков на постоянном и переменном токе с применением техники синхронного детектирования; низкотемпературная холловская, вибрационная и SQUID–магнитометрия; атомно–силовая и магнитно–силовая микроскопия при комнатной температуре; низкотемпературная сканирующая лазерная микроскопия; низкотемпературная сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия с применением техники синхронного детектирования; методы обработки сигналов и изображений в пакетах Gwyddion, Matlab и Python.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Для сверхпроводящих плёнок в магнитном поле крупномасштабной доменной структуры ( $L \gg D_f$ , где  $L$  – ширина магнитных доменов,  $D_f$  – средняя толщина ферромагнитной плёнки) реализуется режим возвратной сверхпроводимости, который характеризуется немонотонным и обратимым изменением

критической температуры  $T_c$  в зависимости от модуля внешнего магнитного поля  $H$ . Увеличение амплитуды неоднородной  $z$ -компоненты магнитного поля приводит к расширению интервала  $T$  и  $H$ , в котором наблюдается рост критической температуры при увеличении  $|H|$ .

2. Для сверхпроводящих плёнок в магнитном поле крупномасштабной доменной структуры ( $L \gg D_f$ ) реализуется макроскопический квантово-размерный эффект для сверхпроводящего конденсата в неоднородном магнитном поле: критическая температура  $T_{c1}$ , соответствующая компенсированной сверхпроводимости над магнитными доменами с большей шириной  $L_1$ , превышает критическую температуру  $T_{c2}$ , соответствующую компенсированной сверхпроводимости над магнитными доменами с меньшей шириной  $L_2$ , при этом  $(T_{c0} - T_{c1}) / (T_{c0} - T_{c2}) \simeq L_2^2 / L_1^2$ , где  $T_{c0}$  – критическая температура сверхпроводника в нулевом магнитном поле.

3. Метод низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии может быть использован для визуализации локализованных сверхпроводящих состояний в мезоскопических гибридных S/F структурах (доменной сверхпроводимости, локализованной сверхпроводимости над магнитными доменами различной полярности) и в наноструктурированных сверхпроводниках (объёмной и прикраевой сверхпроводимости), а также для исследования переходов между такими состояниями при изменении  $T$  и  $H$ .

4. Сверхпроводящее состояние, локализованное вблизи точек пересечения проекции линии минимума модуля  $z$ -компоненты полного магнитного поля и границы сверхпроводника, имеет критическую температуру, превышающую критическую температуру появления прикраевой сверхпроводимости вдали от неоднородностей магнитного поля. Переходы между состояниями объёмной компенсированной сверхпроводимости и прикраевой компенсированной сверхпроводимости при изменении внешнего поля  $H$  соответствуют изломам на изотермических зависимостях сопротивления от  $H$ .

5. Поля рассеяния ламинарной доменной структуры в кристаллах  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  индуцируют гигантскую анизотропию сопротивления сверхпроводящих микромостиков, свидетельствующую о появлении квазиодномерных сверхпроводящих каналов в окружении нормального металла. Для мезоскопических S/F структур в поле прямолинейной доменной стенки в состояниях доменной и компенсированной сверхпроводимости наблюдается диодный эффект.

6. Наблюдаемая асимметрия отклика сверхпроводящих микромостиков в экспериментах с применением сканирующей лазерной микроскопии в состоянии прикраевой сверхпроводимости (при  $H_{c2} < |H| < H_{c3}$ , где  $H_{c2}$  и  $H_{c3}$  – критические поля формирования объёмной и прикраевой сверхпроводимости) свидетельствует о неравномерном распределении сверхпроводящего тока на границах микромостика в резистивном состоянии и связана с суперпозицией транспортного и экранирующих токов.

7. Если переменный ток с нулевым средним инжектируется в перфориро-

ванные сверхпроводящие микромосты с потенциалом пиннинга без центра инверсии, то в спектре напряжения появляются чётные фурье–гармоники. Этот эффект является обобщением диодного эффекта, предсказанного ранее для систем с нарушенной пространственной симметрией, на высшие фурье–компоненты и открывает возможности создания сверхпроводников с анизотропной нелинейностью.

8. Для сверхпроводящих микромостиков в поле управляющего провода с током (мезоскопических криотронов) наблюдаются осцилляции критического тока  $I_c$  в зависимости от силы тока в управляющем проводе  $I_w$ . Такие осцилляции, связанные с квантованным изменением числа захваченных пар вихрь–антивихрь вблизи управляющего провода при изменении  $I_w$  и аналогичные «фраунгоферовским» осцилляциям критического тока короткого джозефсоновского перехода в зависимости от внешнего магнитного поля, для Al/Nb криотронов были обнаружены экспериментально.

9. Метод модуляционной сканирующей туннельной спектроскопии, основанный на синхронном получении топографической карты и карт дифференциальной туннельной проводимости на заданных энергиях, позволяет визуализировать террасы с различной чётностью числа монослоёв в плёнках Pb(111), а также обнаруживать скрытые дефекты (ступени монокристаллической поверхности, инородные включения, дислокационные линии и террасы с неквантованным изменением толщины) в плёнках Pb(111).

10. Спектр эмиссионных резонансов  $V_n$  зависит от измерительного тока и формы иглы туннельного микроскопа и не зависит от локальной толщины плёнки. Оценка локальной работы выхода  $W$ , основанная использовании соотношения  $|e|V_n = W + \text{const} \cdot n^{2/3}$  для описания экспериментальных зависимостей резонансных энергий  $|e|V_n$  от номера резонанса  $n$  в пределе  $n \gg 1$ , для плёнок Pb(111) с террасами квантованной высоты является состоятельной, поскольку величина  $W$  не зависит от локальной толщины плёнки и формы иглы.

## **Личный вклад диссертанта**

Диссертант сделал определяющий вклад в постановку конкретных научных задач, проведение экспериментальных исследований, анализ и интерпретацию результатов измерений, сопоставление теоретических и экспериментальных результатов, а также в подготовку результатов исследований для публикации в научных изданиях. Комплекс прикладных программ GLDD для моделирования транспортных свойств мезоскопических сверхпроводников был разработан И. М. Нефёдовым, И. А. Шерешевским и В. В. Куриным, диссертант принимал участие в разработке модулей, описывающих неоднородное магнитное поле, отладке программы и проведении основного массива вычислений. Идея о существовании диодного эффекта для S/F структур в состоянии доменной сверхпроводимости была предложена М. А. Силаевым,

диссертант принимал участие в проверке этого предположения для мезоскопических сверхпроводников. Экспериментальные исследования транспортных свойств магнитосвязанных гибридных S/F структур проведены в Католическом университете Лёвена (K. U. Leuven) в группе проф. В. В. Мошалкова. Все работы по экспериментальному исследованию локализованных сверхпроводящих состояний в планарных гибридных S/F системах с лабиринтной доменной структурой были выполнены при непосредственном участии диссертанта совместно с М. Ланге (M. Lange), М. Ван Бал (M. J. Van Bael), В. Гилляйнсом (W. Gillijns), А. Силанеком (A. V. Silhanek), А. П. Володиным, при этом структуры были изготовлены Б. Оппердусом (B. Oppendoes). Все работы по экспериментальному исследованию локализованных сверхпроводящих состояний в гибридных S/F системах с ламинарной доменной структурой были выполнены диссертантом совместно с И. Фритzsche (J. Fritzsche) и Р. Крамером (R. Kramer), интерпретация результатов была проведена совместно с Д. Ю. Володазовым. Все работы по экспериментальному исследованию транспортных свойств мезоскопических гибридных S/F структур с магнитными частицами и мезоскопических криотронов были выполнены В. Гилляйнсом, А. Силанеком, Й. Ван де Вонделом (J. Van de Vondel), Н. Схилдерманс (N. Schildermans), Г. Атакли (G. W. Ataklti), диссертант принимал участие в обработке полученных результатов и их интерпретации. Все работы по экспериментальному исследованию нелинейных свойств перфорированных сверхпроводящих мостиков были выполнены лично диссертантом на образцах, часть из которых изготовлена диссертантом, часть – предоставлена Й. Ван де Вонделом. Все измерения отклика сверхпроводящих микромостиков и гибридных S/F структур в экспериментах с применением метода сканирующей лазерной микроскопии выполнены в Тюбингенском университете Р. Вернером (R. Werner), Д. Кёлле (D. Koelle) и Р. Кляйнером (R. Kleiner), диссертант принимал участие в постановке задачи, обработке полученных результатов и их интерпретации. Все задачи по изучению квантово-размерных состояний в островках Рb методами сканирующей туннельной спектроскопии были поставлены диссертантом, все измерения были выполнены диссертантом лично при участии А. В. Путилова, С. С. Уставщикова и С. И. Божко (обработка и интерпретация некоторых результатов). Все работы по исследованию эмиссионных резонансов для Рb островков выполнены диссертантом самостоятельно.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных в диссертации теоретических результатов обеспечена адекватным выбором моделей, корректно описывающих основные свойства реальных систем, и методов численного моделирования. Достоверность экспериментальных результатов обеспечена адекватным выбором методик измерения и процедур анализа результатов. Все полученные в диссертации экспериментальные результаты воспроизводимы, теоретические и экспериментальные результаты качественно и в некоторых случаях количественно

согласуются друг с другом и результатами, полученными в других группах.

Диссертация выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН) в период с 2003 по 2020 год. Все основные результаты диссертации неоднократно обсуждались на семинарах и вебинарах ИФМ РАН. Частично результаты диссертации были представлены на семинарах в Католическом университете Лёвена (K. U. Leuven – 2005-2010, 2019), Санкт-Петербургском государственном университете (2008), Институте нанофизики (INSP) при университете Пьера и Марии Кюри (UPMC Paris-VI – 2012), Московском физико-техническом институте (2012), Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН (2017, 2019), Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН (2020), Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского (2020).

Результаты работы были представлены на всероссийских и международных конференциях: всероссийских совещаниях по физике низких температур (Екатеринбург – 2003, Черногловка – 2009); международных конференциях «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (Звенигород – 2004, 2008, 2011); международных симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород – 2008-2020); всероссийских конференциях «Особенности применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах» (Черногловка – 2019, 2020); NATO Advanced Research Workshop on Theory of Quantum Transport in Metallic and Hybrid Nanostructures (С.-Петербург – 2003); International workshops on Nanoscale Superconductivity and Magnetism (Лёвен, Бельгия – 2006, 2007); International conferences on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (Крит, Греция – 2005; Родос, Греция – 2007, 2009, 2011); International Conference on Trends in Future Electronics (Бордо, Франция – 2006); Annual Scientific Meeting of the Belgian Physical Society (Антверпен, Бельгия – 2007, Брюссель, Бельгия – 2008, Хасселт, Бельгия – 2009); International Conferences on Low Temperature Physics (Амстердам, Нидерланды – 2008; Пекин, Китай – 2011); General meeting of the American Physical Society (Нью-Орлеан, США – 2008); International Conference for Young Scientists on Low Temperature Physics (Харьков, Украина – 2010); Moscow International Symposium on Magnetism (Москва – 2011).

Основные результаты диссертации опубликованы в 28 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах (Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. B, Appl. Phys. Lett., J. Appl. Phys., J. Phys. Condens. Matter, Письма в ЖЭТФ), включая один тематический обзор (Supercond. Sci. Technol.) и одну главу в монографии (NATO Science Series, Springer).

## **Объём и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, четырех приложений, списка работ диссертанта и списка цитированной литературы (509 наименований). Общий объём диссертации 295 страниц, включая 147 рисунков.

# Основное содержание работы

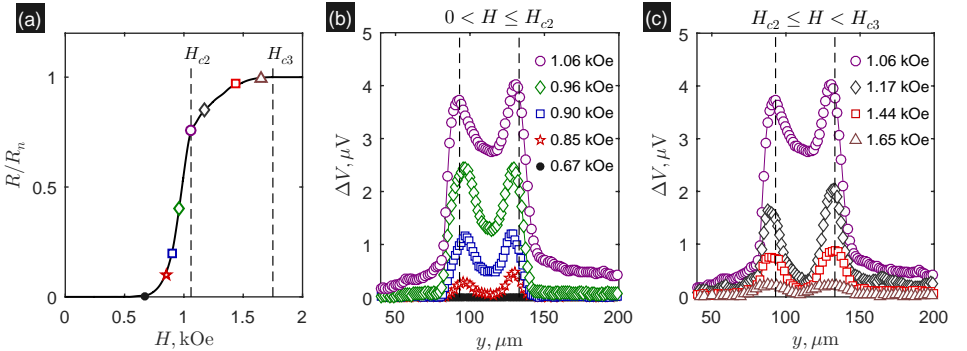
Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, представлено краткое описание текущего состояния исследований, сформулированы цели работы, описаны методы исследования, показана научная новизна и значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, и описан личный вклад диссертанта.

**Глава 1** посвящена исследованию особенностей транспортных свойств Nb и Al микромостиков, включая перфорированные микромостики с двумерной решёткой сквозных отверстий, во внешнем однородном магнитном поле, ориентированном перпендикулярно плоскости образца. В разделе 1.1 вводятся основные понятия феноменологической теории сверхпроводимости ГЛ, в частности, критические температуры формирования объёмной и поверхностной (прикраевой) сверхпроводимости в однородном магнитном поле  $H$

$$T_{c2}/T_{c0} = 1 - |H|/H_{c2}^{(0)} \quad \text{и} \quad T_{c3}/T_{c0} \simeq 1 - 0.59 \cdot |H|/H_{c2}^{(0)}, \quad (1)$$

где  $T_{c0}$  есть критическая температура сверхпроводника в нулевом поле,  $H_{c2}^{(0)}$  и  $H_{c3}^{(0)} \simeq 1.69 H_{c2}^{(0)}$  есть верхнее критическое поле и критическое поле поверхностной сверхпроводимости при  $T = 0$  [33].

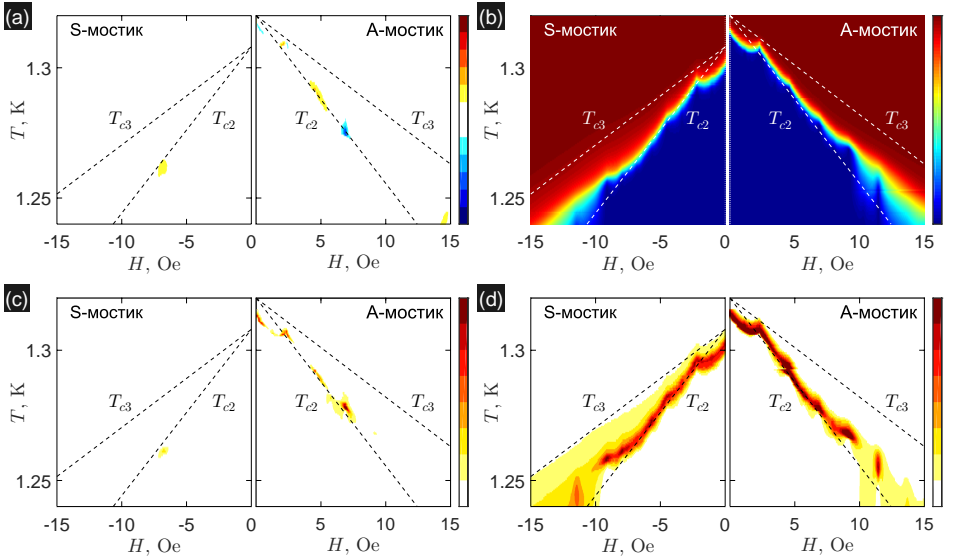
В разделе 1.2 изучены транспортные свойства Nb микромостиков. Обнаружено, что при увеличении  $|H|$  изменение сопротивления микромостиков происходит в две стадии, соответствующие последовательному подавлению объёмной и покраевой сверхпроводимости (рис. 1a). Построена фазовая  $H - T$  диаграмма и определена область параметров, соответствующих покраевой сверхпроводимости. Показано, что уменьшение измерительного тока приводит



**Рис. 1:** (a) Зависимость сопротивления  $R$  от  $H$  при  $T = 7.5$  К, вертикальными пунктирными линиями отмечены критические поля  $H_{c2}$  и  $H_{c3}$  для данной температуры. (b, c) Зависимости индуцированного лазерным лучом падения напряжения  $\Delta V$  от координаты  $y$  для  $H \leq H_{c2}$  (b) и  $H_{c2} \leq H < H_{c3}$  (c), вертикальными пунктирными линиями отмечены края микромостика.

к смещению резистивного перехода в сторону больших значений  $H$  вплоть до критического поля поверхностной сверхпроводимости  $H_{c3}$  при данной температуре. Подробно описана процедура визуализации прикраевой сверхпроводимости для сверхпроводящих Nb микромостиков методом низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии при  $T = 7.0$  и  $7.5$  К в интервале полей  $H_{c2} \leq |H| < H_{c3}$  для данных температур (рис. 1с). Для объяснения наблюдаемой в эксперименте асимметрии зависимости индуцированного лазерным лучом падения напряжения  $\Delta V$  от поперечной координаты  $y$  было проведено численное моделирование распределения локальной плотности сверхпроводящего и нормального тока в интервале  $H_{c2} < |H| < H_{c3}$  в рамках нестационарной модели ГЛ с учётом неоднородного распределения локальной температуры из-за воздействия лазерного луча. Это позволило интерпретировать асимметрию зависимости  $\Delta V(y)$  как следствие неравномерного распределения средней плотности сверхпроводящего тока в резистивном состоянии на противоположных сторонах микромостика.

В разделе 1.3 исследованы особенности транспортных свойств перфорированных Al микромостиков, для которых перфорация представляла собой комбинацию двух вложенных подрешёток больших и малых сквозных отверстий. В зависимости от расстояния между центрами подрешёток результирующий



**Рис. 2:** (а) Зависимости среднего напряжения  $V_0$  от внешнего магнитного поля  $H$  и температуры  $T$  для мостиков с симметричным (S-мостик) и асимметричным (А-мостик) потенциалом пиннинга. (b–d) Зависимости амплитуды первой ( $V_1$ ), второй ( $V_2$ ) и третьей ( $V_3$ ) фурье-гармоник напряжения от  $H$  и  $T$ . Пунктирные линии соответствуют зависимостям  $T_{c2}(H)$  и  $T_{c3}(H)$ , где  $T_{c0} \simeq 1.31$  К для S-мостика и  $1.32$  К для А-мостика,  $H_{c2}^{(0)} \simeq 200$  Э, см. соотношения (1).



потенциал пиннинга может обладать или не обладать центром инверсии [38]. Были построены зависимости амплитуды постоянного напряжения и нескольких низших фурье–гармоник напряжения, возникающих при инъекции переменного измерительного тока с нулевым средним, от  $H$  и  $T$  (рис. 2). Исследованы эффекты соизмеримости в линейном и нелинейном отклике таких микромостиков. Под эффектами соизмеримости мы понимаем резонансное изменение сопротивления в процессе изотермических измерений при изменении внешнего поля  $H$  с периодом  $H_1 \equiv \Phi_0/S$ , где  $\Phi_0 \simeq 2 \cdot 10^{-7}$  Гс·см<sup>2</sup> – квант магнитного потока,  $S$  – площадь элементарной ячейки искусственно созданной решётки неоднородностей. Показано, что нарушение симметрии потенциала пиннинга для движения вихрей под действием силы Лоренца вызывает появление среднего напряжения (диодный эффект) и чётных фурье–гармоник напряжения вблизи линии  $T_{c2}(H)$ . Обнаруженный эффект позволяет создавать сверхпроводящие образцы с анизотропной нелинейностью посредством создания потенциала пиннинга заданной симметрии. Исследование нелинейных свойств наноструктурированных сверхпроводников может быть хорошим диагностическим инструментом при изучении слабых эффектов асимметрии границ и потенциала пиннинга в физике вихревого состояния из-за большего отношения «сигнал–шум» по сравнению с измерениями на постоянном токе.

Основные результаты главы опубликованы в работах [A1], [A2] и [C1].

**Глава 2** посвящена исследованию особенностей зарождения сверхпроводимости в неоднородном магнитном поле, создаваемом крупномасштабной лабиринтной доменной структурой в ферромагнитной подложке.

Общие свойства решений уравнения Гинзбурга–Ландау в неоднородном магнитном поле описаны в разделах 2.1.1–2.1.3. Задача о зарождении доменной сверхпроводимости в тонких сверхпроводящих плёнках в неоднородном поле в виде *ступенчатой* функции  $B_z(x) = H + B_0 \operatorname{sgn} x$  была рассмотрена в работе [10], при этом в работе [A3] было получено приближенное выражение для кривой фазового перехода

$$\frac{T_c^{DWS}}{T_{c0}} \simeq 1 - \frac{B_0}{H_{c2}^{(0)}} \times \left\{ 0.59 - 0.70 \left( \frac{H}{B_0} \right)^2 + 0.09 \left( \frac{H}{B_0} \right)^4 \right\}. \quad (2)$$

при  $|H| < B_0$ . Если  $z$ –компонента неоднородного магнитного поля изменяется в пространстве от  $b_{\min} = \min b_z(x, y)$  до  $b_{\max} = \max b_z(x, y)$ , то обобщением соотношений (1) легко получить оценки критической температуры формирования компенсированной сверхпроводимостью над доменами с обратной полярностью по отношению к знаку  $H$  при  $|H| \gg \max\{b_{\max}, |b_{\min}|\}$

$$T_{c2}^{(+)} / T_{c0} = 1 - |H + b_{\max}| / H_{c2}^{(0)} \quad \text{для доменов с } M_z > 0, \quad (3)$$

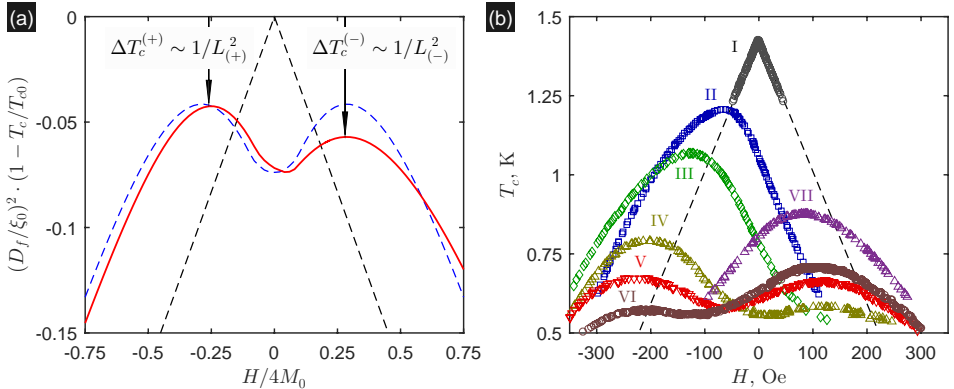
$$T_{c2}^{(-)} / T_{c0} = 1 - |H + b_{\min}| / H_{c2}^{(0)} \quad \text{для доменов с } M_z < 0. \quad (4)$$

Таким образом, кривая  $T_c(H)$  для S/F структур в сильных полях напоминает зависимость  $T_{c2}(H)$  с той разницей, что правая и левая части кривой

сдвинуты в сторону больших полей (magnetic bias). Детальный обзор работ по исследованию зарождения сверхпроводимости в тонкоплёночных гибридных S/F системах, включая системы с лабиринтной доменной структурой, представлен в разделе 2.1.4.

Разделы 2.2 и 2.3 посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей зарождения сверхпроводимости в тонкоплёночных гибридных S/F и F/S/F системах с магнитной связью и лабиринтной доменной структурой в ферромагнитных слоях. В этих разделах исследуются особенности магнитосопротивления тонкоплёночных гибридных структур без изготовления микромостиков с контактами во внутренней части образцов (large-area S/F hybrids), что позволяет минимизировать граничные эффекты, связанные с прикраевой сверхпроводимостью, в реальных образцах.

В разделе 2.2 изучены свойства двухслойных гибридных систем Al/CoPt. Показано, что соотношение между ширинами доменов с положительной и отрицательной намагниченностью может быть изменено в процессе неполного намагничивания [21] или размагничивания [23]. Например, можно получить практически любое значение остаточной намагниченности в зависимости от величины поля «возврата»  $H_{ret} < 0$  в процессе следующей процедуры:  $H = 0 \Rightarrow H = 10$  кЭ (намагничивание)  $\Rightarrow H = H_{ret}$  (неполное размагничивание)  $\Rightarrow H = 0$ . Изменение пространственной структуры магнитного поля приводит к обратимому изменению формы кривой фазового перехода  $T_c(H)$ . Показано, что формирование компенсированной сверхпроводимости над об-

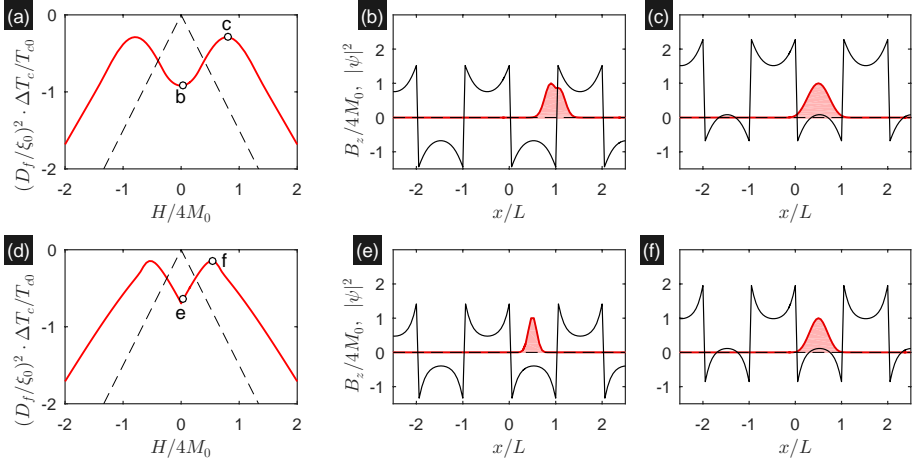


**Рис. 3:** (а) Зависимости  $T_c(H)$  (а) для тонкоплёночной S/F структуры с одинаковыми и различными ширинами доменов с положительной и отрицательной намагниченностью:  $L_{(+)} = L_{(-)} = 200$  нм (пунктирная линия),  $L_{(+)} = 200$  нм и  $L_{(-)} = 140$  нм (сплошная линия);  $M_0 = 500$  Гс,  $D_f = 23$  нм,  $h = 16$  нм. (б) Эволюция линий фазового перехода для гибридной структуры Al(50 нм)/[Co(0.4 нм)/Pt(1.0 нм)]<sub>15</sub> в различных магнитных состояниях: намагниченное состояние,  $H_{ret} = 0$  (I), и частично размагниченные состояния  $H_{ret} = -3.93$  кЭ (II),  $-4.16$  кЭ (III),  $-4.42$  кЭ (IV),  $-4.55$  кЭ (V),  $-4.61$  кЭ (VI) и  $-5.00$  кЭ (VII). Пунктирная линия представляет собой оценку линии фазового перехода  $T_{c2}(H)$  для Al плёнки в однородном магнитном поле, см. соотношение (1).

ратными доменами с большей шириной соответствует большей критической температуре и наоборот, что является прямым следствием квантового размерного эффекта для сверхпроводящего конденсата в неоднородном магнитном поле (рис. 3). Исследован вопрос о влиянии толщины ферромагнитной плёнки на форму зависимости  $T_c(H)$ . Исследовано зарождение сверхпроводимости в тонких плёнках в поле двумерного массива CoPt частиц. Показано, что изменение среднего магнитного момента частиц вызывает квантованный сдвиг главного максимума  $T_c$ , соответствующего зарождению сверхпроводимости между магнитными частицами, без существенного изменения его амплитуды.

В разделе 2.3 исследовано зарождение сверхпроводимости в трёхслойных гибридных системах CoPd/Nb/CoPd. Благодаря тому, что «верхний» и «нижний» ферромагнитные слои обладают разными полями коэрцитивности, оказалось возможным исследовать сверхпроводящие свойства одного и того же образца в трёх магнитных состояниях: (i) однородно намагниченном состоянии, (ii) состоянии с намагниченным верхним слоем (без доменной структуры) и размагниченным нижним слоем (с доменной структурой) и (iii) состоянии с двумя размагниченными слоями. Увеличение амплитуды неоднородного магнитного поля для трёхслойных гибридных структур в состоянии (iii) с размагниченными верхним и нижним ферромагнитными слоями приводит к существенному расширению интервала температур, в котором наблюдается возвратная сверхпроводимость, и формированию доменной сверхпроводимости при  $|H| \simeq 0$ .

В разделе 2.4 теоретически исследовано влияние амплитуды намагниченности  $M_0$  и ширины магнитных доменов  $L$  на форму зависимости критической температуры  $T_c$  от внешнего однородного магнитного поля  $H$ . В разделе 2.4.1 исследован вопрос зарождения сверхпроводимости в ультратонких плёнках. Были определены области параметров, соответствующие формированию доменной сверхпроводимости и локализованной сверхпроводимости над центрами магнитных доменов в сверхпроводящих плёнках пренебрежимо малой толщины при  $|H| \simeq 0$  и  $h \rightarrow 0$ , где  $h$  – толщина изолирующего слоя между сверхпроводником и ферромагнетиком. Показано, что в режиме доменной сверхпроводимости  $T_c = \alpha_1 + \alpha_2 |H|^2$  при  $|H| \simeq 0$ , где постоянные  $\alpha_{1,2} > 0$  определяются параметрами сверхпроводника и характеристиками доменной структуры (рис. 4a,b); напротив, если при  $|H| \simeq 0$  зарождение сверхпроводимости происходит над центрами магнитных доменов, то  $T_c = \alpha_1 + \alpha_2 |H|$ , где  $\alpha_1 > 0$  и  $\alpha_2 \simeq T_{c0}/H_{c2}^{(0)} > 0$  (рис. 4d,e). Показано, что рассмотрение конечных значений  $h$  позволяет качественно описать зарождение сверхпроводимости в поле доменных стенок конечной толщины. Увеличение  $h$  приводит к существенному расширению области параметров на плоскости  $M_0 - L$ , соответствующих доменной сверхпроводимости. В разделе 2.4.2 исследован вопрос о зарождении сверхпроводимости в плёнках конечной толщины  $D_s$ . Было показано, что увеличение  $D_s$  приводит к эффективному ослаблению роли неоднородной компоненты магнитного поля, поэтому при  $|H| \simeq 0$  формирование



**Рис. 4:** (а–с) Линия фазового перехода  $T_c(H)$  (а), профили волновой функции  $|\psi(x)|^2$  и  $z$ -компоненты полного магнитного поля  $B_z(x) = b_z(x) + H$  для различных значений внешнего поля  $H \simeq 0$  (b) и  $H \simeq B_0$  (с) для тонкоплёночной гибридной S/F структуры с намагниченностью  $M^* \equiv 8\pi M_0 D_f^2 / \Phi_0 = 1.5$  и шириной доменов  $L^* \equiv L/D_f = 4$ ,  $\Delta T_c \equiv T_c - T_{c0}$ . (d–f) Зависимости  $T_c(H)$ ,  $|\psi(x)|^2$  и  $B_z(x)$  для  $M = 1.5$  и  $L^* = 7$ . Пунктирные линии соответствуют зависимости  $T_{c2}(H)$  для сверхпроводника в однородном поле.

сверхпроводимости над центрами магнитных доменов становится энергетически невыгодным по сравнению с доменной сверхпроводимостью.

Основные результаты главы опубликованы в работах [A3]–[A13].

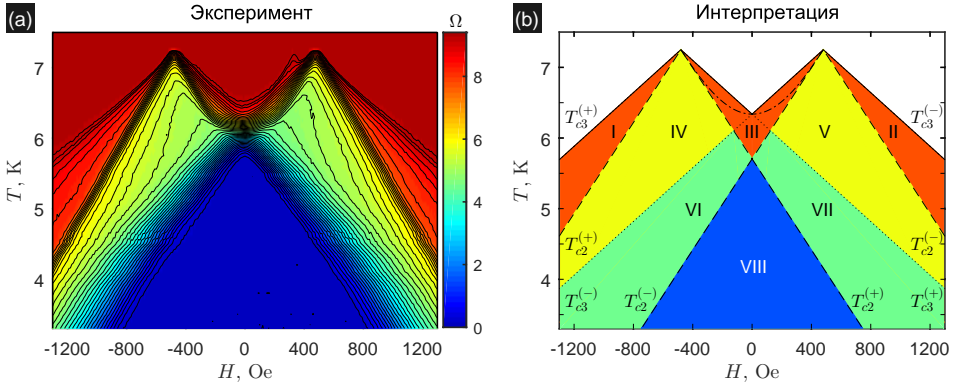
**Глава 3** посвящена исследованию особенностей зарождения сверхпроводимости в мезоскопических сверхпроводниках в неоднородном магнитном поле частиц, доменов и токнесущих проводников с учётом прикраевой сверхпроводимости.

В разделе 3.2 экспериментально исследовано зарождение сверхпроводимости в Pb микромостиках в поле ламинарной доменной структуры кристалла  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . На основе магниторезистивных измерений построена фазовая  $H - T$  диаграмма, на которой легко указать область параметров, соответствующих компенсированной сверхпроводимости, прикраевой компенсированной сверхпроводимости, доменной сверхпроводимости и полной сверхпроводимости (рис. 5). Оценка критической температуры формирования прикраевой компенсированной сверхпроводимости может быть получена обобщением соотношений (1)

$$T_{c3}^{(+)} / T_{c0} = 1 - 0.59 \cdot |H + b_{\max}| / H_{c2}^{(0)} \quad \text{для доменов с } M_z > 0, \quad (5)$$

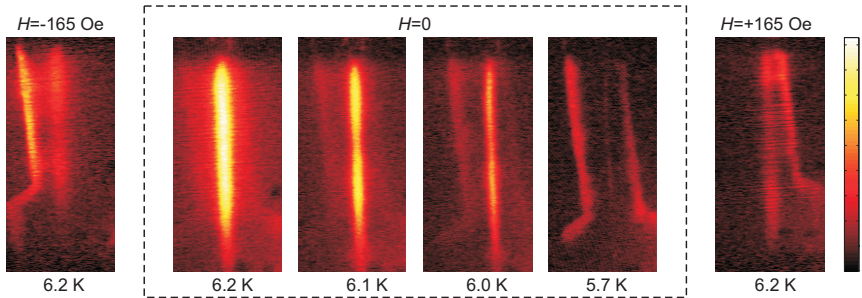
$$T_{c3}^{(-)} / T_{c0} = 1 - 0.59 \cdot |H + b_{\min}| / H_{c2}^{(0)} \quad \text{для доменов с } M_z < 0. \quad (6)$$

Переходы между локализованными и делокализованными сверхпроводящими



**Рис. 5:** (а) Зависимость  $R$  от  $H$  и  $T$  для микромостика  $\text{Pb}/\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . (б) Интерпретация результатов измерений: сплошные линии соответствуют формулам (5)–(6) для прикраевой сверхпроводимости над обратными доменами, пунктирные линии соответствуют формулам (3)–(4) для объёмной компенсированной сверхпроводимости над обратными доменами; линия из точек соответствует зарождению прикраевой сверхпроводимости над параллельными доменами, штрих-пунктирная линия соответствует формуле (2) для доменной сверхпроводимости. Для построения были использованы следующие параметры:  $T_{c0} = 7.25$  К,  $B_0 = 480$  Ое и  $H_{c2}^{(0)} = 2.25$  кЭ.

состояниями при изменении  $H$  или  $T$  были изучены методом низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии (рис. 6). Теоретически исследовано формирование локализованной сверхпроводимости в мезоскопическом сверхпроводнике в поле уединённой доменной стенки. Показано, что сверхпроводимость может возникать вблизи точек пересечения проекции доменной стенки на плоскость образца и границы образца (рис. 7б) и/или вблизи границ



**Рис. 6:** Индуцированная лазерным лучом разность потенциалов  $\Delta V$  как функция положения центра  $(x, y)$  пучка для микромостика  $\text{Pb}/\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  с изолированной доменной стенкой при  $T = 6.2$  К и  $6.4$  К. Поля рассеяния кристалла  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  способны обеспечить формирование доменной сверхпроводимости при  $H \simeq 0$ , при этом изменение внешнего поля способно вызвать перемещение сверхпроводящей области из левой половины мостика (при  $H = -165$  Э) в правую половину (при  $H = +165$  Э).



**Рис. 7:** (а) Распределение модуля параметра порядка  $|\psi(x, y)|$  при  $H = 0$  и  $T = 0$ , соответствующее развитой прикраевой и доменной сверхпроводимости в поле уединённой доменной стенки (DW) пренебрежимо малой ширины. (б) Локализованная сверхпроводимость вблизи точек пересечения проекции доменной стенки и границы образца,  $H = 0$  и  $T = 0.2T_{c0}$ . (в) Компенсированная сверхпроводимость над доменом обратной полярности по отношению к знаку  $H$  при  $H = 1.5H_{c2}^{(0)}$  и  $T = 0.2T_{c0}$ . (д) Компенсированная прикраевая сверхпроводимость над доменом обратной полярности при  $H = 2.5H_{c2}^{(0)}$  и  $T = 0.2T_{c0}$ . Размер образца  $20\xi_0 \times 20\xi_0$ , амплитуда поля  $B_0 = 1.5H_{c2}$ , при моделировании были использованы нулевые граничные условия при  $x \pm L/2$  для подавления прикраевой сверхпроводимости на внешних  $90^\circ$ -углах образца.

образца над доменом с компенсированным магнитным полем (рис. 7д).

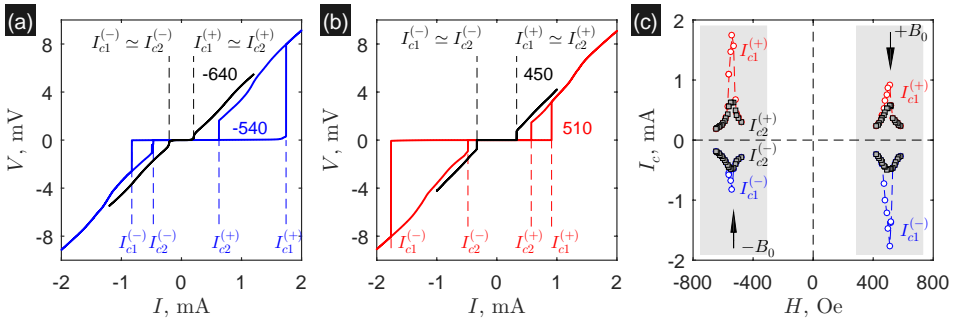
В разделе 3.3 теоретически и экспериментально изучено зарождение локализованной сверхпроводимости в мезоскопических криотронах – сверхпроводящих микромостиках в поле управляющего провода с током  $I_w$ , ориентированного перпендикулярно микромостика. Магниторезистивные измерения для Al/Nb криотронов с двумя парами потенциальных контактов позволили обнаружить предсказанное теорией перемещение сверхпроводящего зародыша по сверхпроводящему микромостика при изменении  $H$ .

В разделе 3.4 теоретически и экспериментально исследовано зарождение сверхпроводимости в сверхпроводящих дисках конечной толщины в поле магнитных частиц с перпендикулярной намагничённостью. Показано, что конкуренция двух механизмов формирования локализованной сверхпроводимости вблизи краев образца и во внутренней области образца может приводить к резкому изменению наклона огибающей  $T_c(H)$ , а также изменению периода и амплитуды осцилляций критической температуры (эффект Литтла–Паркса). Для гибридной структуры, состоящей из сверхпроводящего Al и ферромагнитного CoPt дисков одинакового диаметра, экспериментально обнаружено расширение диапазона магнитных полей, соответствующих безвихревому состоянию, при этом прикраевая сверхпроводимость оказывается подавленной полями рассеяния намагничённого ферромагнитного диска.

Основные результаты главы опубликованы в работах [A14]–[A19] и [C2].

**Глава 4** посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям транспортных свойств сверхпроводящих микромостиков в неоднородном магнитном поле доменных стенок и токнесущих проводников.

В разделе 4.1 экспериментально исследована анизотропия сопротивления крестообразного сверхпроводящего Al мостика в поле ламинарной доменной



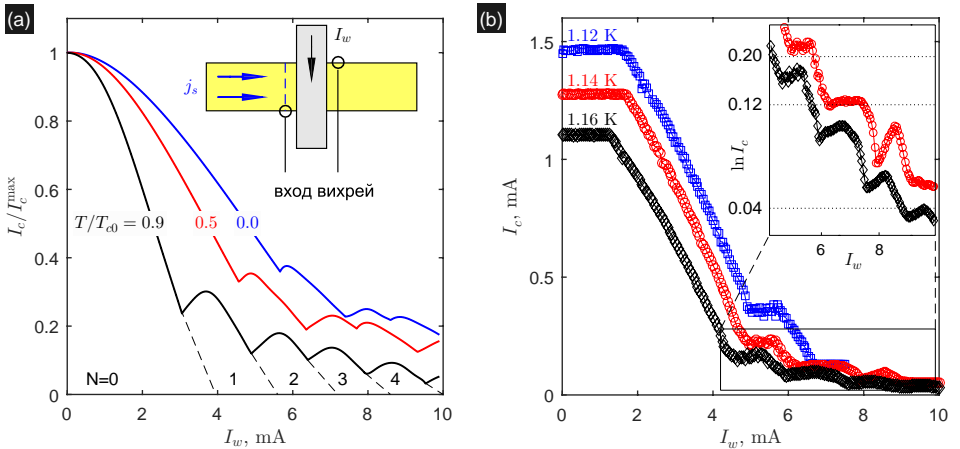
**Рис. 8:** (a, b) Типичные вольт–амперные характеристики микромостика Al/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> при инжекции тока параллельно доменным стенкам при  $H < 0$  (a) и  $H > 0$  (b) при  $T = 0.5$  K. Все измерения были выполнены из одного и того же состояния  $I = 0$ . (c) Зависимости  $I_{c1}^{\pm}$  и  $I_{c2}^{\pm}$  от  $H$  при  $T = 0.5$  K, заштрихованные области соответствуют значениям  $H$ , при которых реализуется режим компенсированной сверхпроводимости над обратными доменами.

структуры кристалла BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>. Было показано, что в режиме компенсированной сверхпроводимости возникает гигантская анизотропия сопротивления  $R_{\perp}/R_{\parallel} \gtrsim 10^3$ , где  $R_{\perp}$  и  $R_{\parallel}$  есть сопротивления микромостика при инжекции тока перпендикулярно и параллельно доменным стенками. Это является прямым экспериментальным подтверждением формирования локализованных каналов, повторяющих форму магнитных доменов и способных переносить сверхпроводящий ток.

В разделе 4.2 экспериментально исследована температурная зависимость критического тока, соответствующего подавлению компенсированной сверхпроводимости, при инжекции тока перпендикулярно доменным стенками.

В разделе 4.3 экспериментально и теоретически исследована асимметрия вольт–амперных характеристик  $I(V)$  и связанная с ней асимметрия критического тока (иначе говоря, диодный эффект) в состоянии компенсированной сверхпроводимости (рис. 8). Показано, что наблюдаемый эффект можно связать с формированием безвихревого канала при определенной полярности  $H$  и  $I$ . Именно через такой канал может протекать значительная часть транспортного тока бездиссипативным образом, поскольку плотность тока внутри такого канала может превышать плотность тока депиннинга. Предсказана асимметрия критического тока в состоянии доменной сверхпроводимости, связанная с взаимодействием транспортного тока и экранирующих токов внутри сверхпроводящего канала. Выделенное направление вдоль канала определяется вектором  $\mathbf{j}_M = \text{rot } \mathbf{M}$ . Показано, что критический ток для параллельной конфигурации (сторонний ток направлен вдоль вектора  $\mathbf{j}_M$ ) превышает критический ток для антипараллельной конфигурации.

В разделе 4.4 теоретически исследован процесс формирования связанных вихревых состояний (вихревых молекул) в мезоскопических криотронах. Было показано, что при увеличении силы тока  $I_w$  в управляющем проводе происходит последовательная генерация пар вихрь–антивихрь. Численное модели-



**Рис. 9:** (а) Зависимости критического тока  $I_c$  мезоскопического криотрона от силы тока  $I_w$  управляющего провода при  $H = 0$  и  $T/T_{c0} = 0, 0.5$  и  $0.9$ , полученные численно с помощью пакета программ GLDD. Для каждого сегмента диаграммы  $I_c - I_w$  указано число вихрей  $N_v$  и антивихрей  $N_{av}$ . (б) Критический ток Al/Nb криотрона  $I_c$  в зависимости от силы тока в управляющем проводе  $I_w$  при  $H = 0$  для различных температур; вставка показывают зависимости  $I_c$  от  $I_w$  в полулогарифмическом масштабе.

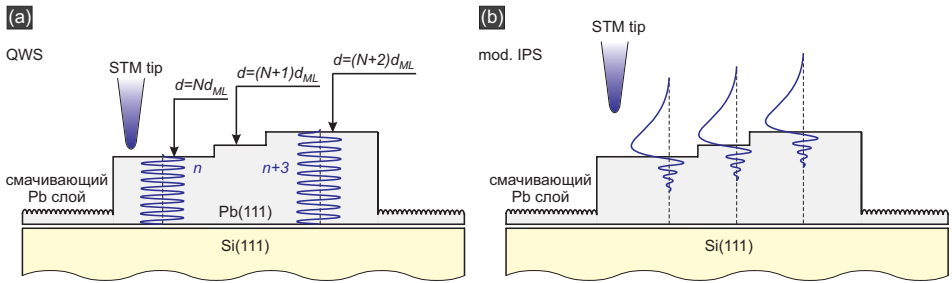
рование позволило установить взаимосвязь между скачкообразным изменением числа пар вихрь-антивихрь при увеличении  $I_w$  с изломами на зависимости критического тока мезоскопического криотрона  $I_c$  от  $I_w$  (рис. 9а). Осцилляции критического тока для тонкоплёночных мезоскопических Al/Nb криотронов были обнаружены экспериментально (рис. 9б).

Основные результаты главы опубликованы в работах [A17], [A20]–[A25].

**Глава 5** посвящена экспериментальному исследованию особенностей электронных свойств Pb наностроек при малых напряжениях. Раздел 5.1 представляет собой обзор работ по исследованию особенностей структурных и электронных свойств монослойных покрытий на основе Pb, ультратонких Pb плёнок и островков, включая квантово-размерные эффекты, обусловленные формированием стоячих электронных волн (quantum well states, QWS) в слое металла (рис. 10а).

В разделе 5.2 методом низкотемпературной туннельной спектроскопии исследованы особенности дифференциальной туннельной проводимости  $dI/dV$  в зависимости от напряжения  $V$  (в режиме заданной высоты) и в зависимости от координат  $x$  и  $y$  в латеральной плоскости (в режиме заданного среднего тока) для Pb островков на поверхности Si(111)  $7 \times 7$  с атомарно-гладкими террасами квантованной толщины. Было показано, что средняя величина  $dI/dV$  для террас Pb(111) с чётным и нечётным числом монослоёв существенно различается, что позволяет проводить визуализацию террас различной чётности числа монослоёв (рис. 11). По результатам туннельных измерений на Pb островках различной высоты построена диаграмма  $V_n - N$  (рис. 12а), где  $|e|V_n -$

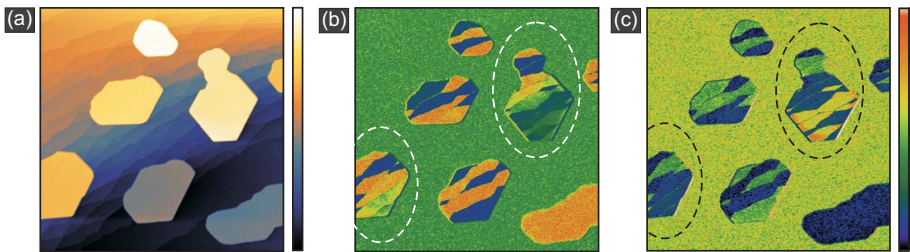




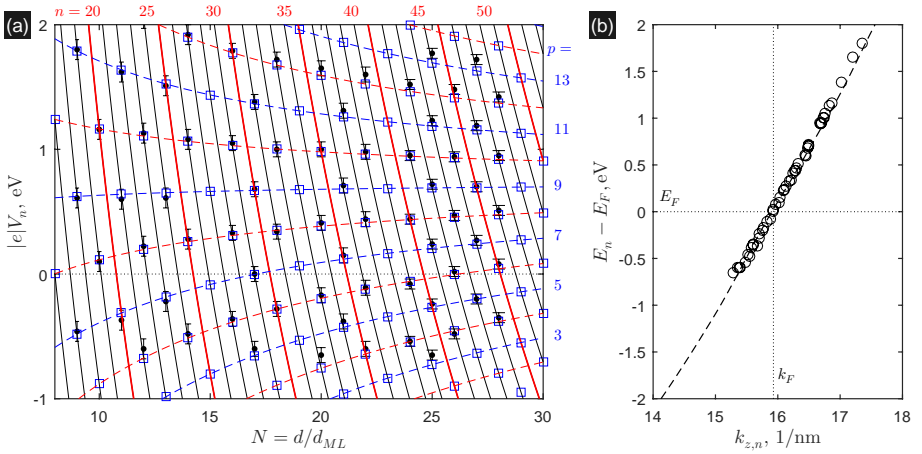
**Рис. 10:** (а) Схематическое представление иглы микроскопа, неупорядоченного смачивающего Pb слоя и Pb островка с несколькими атомарно-гладкими террасами, а также структура стоячих электронных волн внутри островка для некоторой энергии  $E^*$  вблизи  $E_F$ , параметр  $n$  характеризует число полуволн. Отметим, что для выбранного значения  $E^*$  стоячие волны для террасы с толщиной  $(N + 1)d_{ML}$  отсутствуют, здесь  $d_{ML}$  есть высота монослоя для поверхности Pb(111). (б) Схематическое представление структуры модифицированных поверхностных электронных состояний.

энергия  $n$ -го резонанса относительно уровня Ферми,  $N$  – номинальная толщина островка над уровнем смачивающего слоя, выраженная в единицах  $d_{ML}$ . Это позволило получить оценки скорости и импульса Ферми, эффективной массы электронов и толщины смачивающего слоя, а также восстановить энергетический спектр  $E(k)$  в направлении [111] (рис. 12б).

Возможность синхронного получения топографических изображений и карт дифференциальной туннельной проводимости на заданной энергии представляется крайне важной для поиска и дальнейшего исследования локальных электронных свойств вблизи дефектов. В разделе 5.3 методом модуляционной сканирующей туннельной спектроскопии исследуется пространственная зависимость дифференциальной проводимости на заданной энергии для Pb террас вблизи дефектов или участков с некантованным изменением высоты. С помощью такой методики могут быть обнаружены монокатомные ступени подложки,

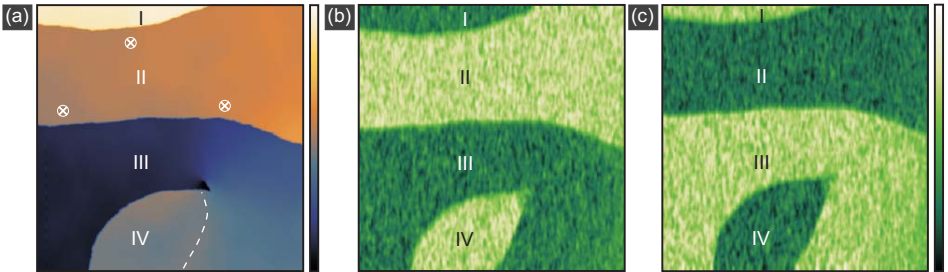


**Рис. 11:** (а) Топографическое изображение участка поверхности образца с Pb островками, полученное в режиме заданного тока (размер кадра  $1160 \times 1160 \text{ нм}^2$ ,  $V_0 = 600 \text{ мВ}$ ,  $\langle I \rangle = 200 \text{ пА}$ ). (б, с) Карты дифференциальной туннельной проводимости  $dI/dV$  для  $V_0 = 600 \text{ мВ}$  (б) и  $V_0 = 900 \text{ мВ}$  (с), полученные синхронно с топографическим изображением. Распределение амплитуды локальной проводимости для островков меньшей толщины близко к бинарному, для островков большей толщины, отмеченных пунктирными контурами, становится более сложным («радужным») с плавным изменением интенсивности.

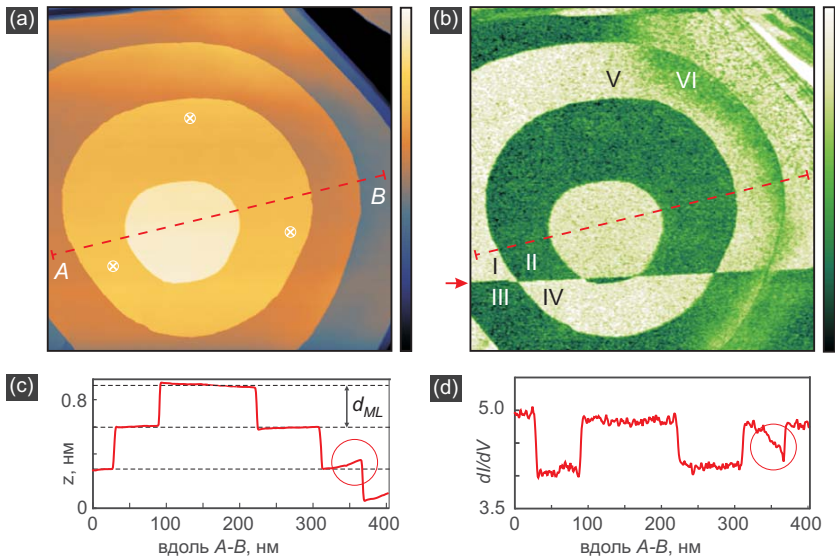


**Рис. 12:** (а) Зависимость положения максимумов  $V_n$  туннельной проводимости от номинальной толщины  $N = d/d_{ML}$  для системы Pb/Si(111)7×7. Символами  $\square$  отмечены ожидаемые положения уровней размерной квантования с учётом реальной толщины  $D = d_{ML} \cdot (N + 3) + 0.02$  нм [45], сплошные тонкие и толстые линии соответствуют постоянным значениям  $n$ , равным числу полувольт стоячей электронной волны, пунктирные линии соответствуют целочисленным значениями параметра  $p = 2n - 3N$ . (б) Спектр  $E_n(k_{z,n})$ , восстановленный по результатам измерений, представленных на рисунке (а);  $k_F \approx 15.93$  нм<sup>-1</sup> в схеме расширенных зон. Пунктирная линия соответствует спектру  $E(k_z)$  объёмного кристалла Pb в направлении [111] с учётом спин-орбитального взаимодействия [46].

скрытые части дислокационных петель (рис. 13), а также инородные включения под слоем металла, которые не проявляются в топографическом изображении. Показано, что мелкомасштабная модуляция туннельной проводимости на атомарно-гладких террасах постоянной высоты обусловлена влиянием периодического потенциала Si(111)7 × 7. В ряде случаев для Pb островков



**Рис. 13:** (а) Топографическое изображение поверхности Pb островка ( $175 \times 175$  нм<sup>2</sup>,  $V_0 = 500$  мВ,  $I = 400$  пА), пунктирной линией в нижней части кадра показана проекция линии дислокационной петли на поверхность образца, символами  $\otimes$  отмечены реперные точки, по которым было выполнено выравнивание изображения. (б, в) Карты дифференциальной проводимости  $dI/dV(x, y)$  для участка поверхности, изображенного на (а), полученные при  $V_0 = 500$  мВ (б) и  $V_0 = 600$  мВ (в);  $V_1 = 40$  мВ,  $f_0 = 7285$  Гц. Светлые области соответствуют большей туннельной проводимости, тёмные области – меньшей проводимости.



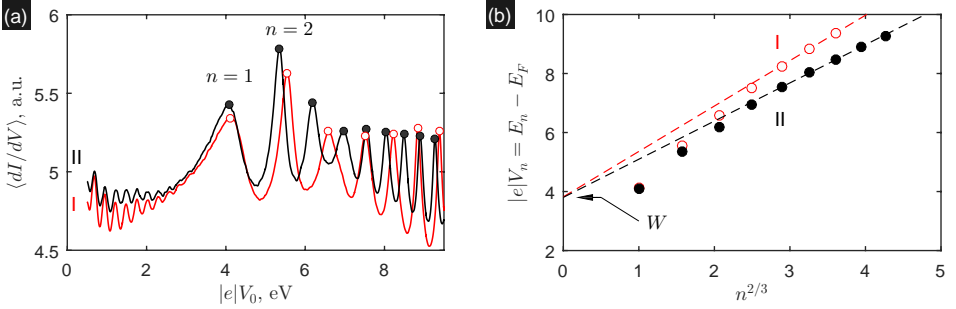
**Рис. 14:** (a, b) Топографическое изображение  $z(x, y)$  (a) и карта дифференциальной туннельной проводимости  $dI/dV(x, y)$  для участка поверхности Рb островка (размер кадра  $460 \times 460 \text{ нм}^2$ ,  $V_0 = 700 \text{ мВ}$ ,  $V_1 = 40 \text{ мВ}$ ,  $\langle I \rangle = 400 \text{ пА}$ ); стрелка указывает положение ступени монотонной высоты в подложке. (c, d) Профили  $z(s)$  и  $dI/dV(s)$  вдоль линии  $A - B$ , пунктирные линии соответствуют уровням террас  $\text{Pb}(111)$  квантованной высоты.

достаточно большой толщины ( $\gtrsim 50$  монослоёв) были обнаружены крупномасштабные неоднородности туннельной проводимости на заданной энергии (рис. 11 и 14). Было показано, что такие неоднородности проявляются также в плавном и согласованном изменении энергии уровней размерного квантования и могут указывать на внутренние напряжения в Рb плёнках с протяжёнными дефектами и неквантованным изменением толщины.

Основные результаты главы опубликованы в работах [A26] и [A27].

**Глава 6** посвящена экспериментальному исследованию особенностей электронных свойств Рb наностроек в режиме квантованной электронной эмиссии при больших напряжениях, сравнимых или превышающих работу выхода  $W$ . В качестве основного метода исследования была использована низкотемпературная туннельная спектроскопия в режиме заданного тока и переменной высоты иглы над поверхностью образца. Раздел 6.1 представляет собой работу по исследованию электронных состояний, локализованных вблизи поверхности проводящих образцов в поле сил электрического изображения и внешних источников (рис. 10b). Такие состояния в литературе часто называют image potential states (IPS).

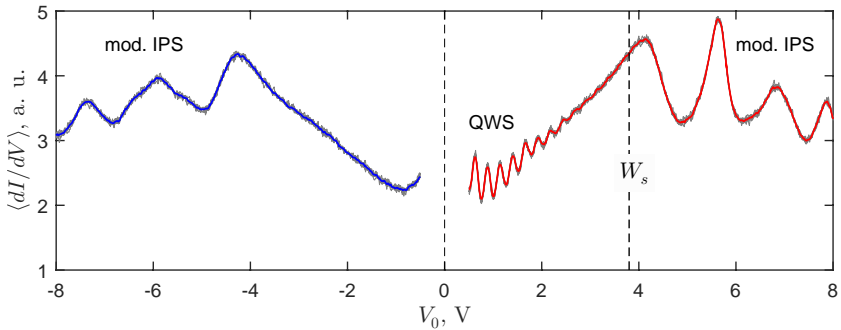
В разделе 6.2 с помощью квазиклассического соотношения Борн-Зоммерфельда для частицы в «треугольной» потенциальной яме, образованной поверхностью кристалла с одной стороны и линейно растущим элект-



**Рис. 15:** (а) Зависимости  $\langle dI/dV \rangle_I$  и  $\langle dI/dV \rangle_{II}$  от среднего потенциала  $V_0$ , полученные в режиме заданного тока  $\langle I \rangle = 800$  пА и переменной высоты и усреднённые по координате  $x$  по областям I и II до и после модификации иглы в пределах одной и той же террасы Pb(111), соответственно. (б) Зависимость энергии эмиссионных резонансов  $V_n$  от порядкового номера: серия  $\circ$ -точек соответствует максимумам на зависимости  $\langle dI/dV \rangle_I$  от  $V_0$ , серия  $\bullet$ -точек соответствует максимумам на зависимости  $\langle dI/dV \rangle_{II}$  от  $V_0$ . Экстраполяция линейной аппроксимации для высших резонансов на зависимости  $V_n$  от  $n^{2/3}$  позволяет получить оценку локальную работу выхода:  $W = 3.8 \pm 0.1$  эВ.

трическим потенциалом внешних источников с другой стороны, получена формула для оценки положения высших эмиссионных резонансов  $|e|V_n \simeq W + \text{const} \cdot n^{2/3}$ , где  $n$  – номер IPS-резонанса,  $W$  – локальная работа выхода образца. Это соотношение, ранее полученное в работах [48,49] для положений максимумов дифференциальной проводимости, позволяет оценить локальную работу выхода по результатам анализа положений серии IPS-резонансов и экстраполяции линейной асимптотики для зависимости  $V_n$  от  $n^{2/3}$  для высших резонансов ( $n \gg 1$ ) в точку  $n = 0$ .

В разделе 6.3 для атомарно-плоских террас Pb(111) получена количествен-



**Рис. 16:** Зависимости дифференциальной туннельной проводимости  $\langle dI/dV \rangle$  от напряжения  $V_0$ , полученные для островка Рь толщины порядка 50 монослоёв в режиме заданного тока при  $\langle I \rangle = +400$  пА (справа) и  $\langle I \rangle = -400$  пА (слева) и усреднённые по серии из пяти измерений.

ная оценка локальной работы выхода  $W \simeq 3.8 \pm 0.1$  эВ, которая согласуется с результатами расчётов [52] в рамках теории псевдопотенциала. Экспериментально доказано, что полученная оценка работы выхода не зависит от формы иглы и локальной толщины плёнки (рис. 15). Также была исследована зависимость энергии и амплитуды квантово-размерных QWS и IPS-резонансов от полярности напряжения (рис. 16).

В разделе 6.4 представлены первые результаты по исследованию спектра модифицированных IPS-резонансов для Pb террас с неквантованным изменением толщины вблизи дислокационных линий и скрытых дефектов. Обнаружена пространственная зависимость спектра резонансных состояний  $V_n$  от точки наблюдения, что может быть интерпретировано как свидетельство неоднородного распределения электрического потенциала и/или локальной работы выхода по поверхности образца.

Основные результаты главы опубликованы в работе [A28].

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Для тонкоплёночных гибридных систем CoPd/Nb/CoPd и Al/CoPt с крупномасштабной лабиринтной доменной структурой в ферромагнитных слоях ( $L \gg D_f$ , где  $L$  – ширина магнитных доменов,  $D_f$  – толщина ферромагнитной плёнки) экспериментально обнаружена возвратная сверхпроводимость – немонотонная зависимость критической температуры  $T_c$  от абсолютного значения внешнего магнитного поля  $H$ . Для системы CoPd/Nb/CoPd теоретически и экспериментально исследовано влияние амплитуды неоднородного магнитного поля на форму зависимости  $T_c$  от  $H$  в однородно намагниченном состоянии, состоянии с одним и двумя размагниченными ферромагнитными слоями. Предлагаемая интерпретация экспериментальных данных подкреплена результатами модельных расчетов в рамках линейризованной модели ГЛ для одномерных доменных структур с реалистичными параметрами.
2. Показано, что изменением параметров доменной структуры плёнок CoPt в процессе неполного размагничивания можно обратимым образом трансформировать форму зависимости  $T_c(H)$  и перейти от монотонной зависимости  $T_c$  от  $|H|$  к немонотонной зависимости. Показано, что формирование компенсированной сверхпроводимости над магнитными доменами с большей шириной соответствует большей критической температуре и наоборот, что является прямым следствием квантового размерного эффекта для сверхпроводящего конденсата в неоднородном магнитном поле.
3. Для тонкоплёночных гибридных S/F систем с крупномасштабной ламинарной доменной структурой ( $L \gg D_f$ ) предсказан новый режим зарождения сверхпроводимости над центрами доменов с положительной намагниченностью при  $H \rightarrow 0^-$  и над центрами доменов с отрицательной намагниченностью при  $H \rightarrow 0^+$ . Показано, что скачкообразное перемещение сверхпроводящего зародыша между центрами положительных и отрицательных доменов при изменении знака  $H$  приводит к «инвертированной» линейной зависимо-

сти критической температуры от внешнего поля:  $T_c = \alpha_1 + \alpha_2 |H|$  с изломом  $H = 0$ , при этом постоянная  $\alpha_2 \simeq T_{c0}/H_{c2}^{(0)} > 0$ .

4. Теоретически исследован вопрос о влиянии ширины переходной области в распределении  $z$ -компоненты магнитного поля вблизи доменных стенок на формирование доменной сверхпроводимости. Показано, что увеличение ширины доменных стенок, толщины изолирующей прослойки и/или толщины сверхпроводящей плёнки приводит к расширению области параметров, соответствующих доменной сверхпроводимости, на плоскости  $M_0 - L$ , где  $M_0$  - остаточная намагниченность ферромагнетика,  $L$  - ширина доменов.

5. Показано, что для сверхпроводящих Nb микромостиков в перпендикулярном внешнем магнитном поле резистивный переход при увеличении  $|H|$  происходит в две стадии, которые отличаются наклоном  $dR/dH$  и соответствуют последовательному разрушению объёмной и прикраевой сверхпроводимости. При уменьшении измерительного тока резистивный переход смещается от значений  $H$  близких к верхнему критическому полю  $H_{c2}$  в сторону больших магнитных полей и приближается к критическому полю поверхностной сверхпроводимости  $H_{c3}$  при данной температуре.

6. Для сверхпроводящих Nb микромостиков методом низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии экспериментально визуализирована прикраевая сверхпроводимость. Обнаружено, что пространственная зависимость индуцированного лазерным лучом падения напряжения  $\Delta V$  от положения центра луча  $(x, y)$  при  $H_{c2} < |H| < H_{c3}$  имеет вид двух параллельных каналов, располагающихся вдоль краёв микромостика. Показано, что наблюдаемая в экспериментах асимметрия зависимости  $\Delta V$  от поперечной координаты  $y$ , которая зависит от знака  $H$  и транспортного тока  $I$ , связана с усилением и ослаблением локальной плотности сверхпроводящего тока на разных границах образца из-за взаимодействия транспортного и экранирующего токов.

7. Для мезоскопических гибридных систем Pb/VaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> с крупномасштабной ламинарной доменной структурой в ферромагнитном слое обнаружены переходы между различными режимами формирования локализованной сверхпроводимости. Показано, что переходы между состояниями объёмной компенсированной сверхпроводимости и прикраевой компенсированной сверхпроводимости над обратными магнитными доменами проявляют себя как изломы на изотермических зависимостях сопротивления от  $H$ .

8. Для мезоскопических гибридных систем Pb/VaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> с ламинарной доменной структурой методом низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии экспериментально визуализированы состояния доменной сверхпроводимости, компенсированной сверхпроводимости над обратными доменами и локализованной сверхпроводимости над параллельными доменами, а также изучены переходы между такими состояниями при изменении  $H$  и  $T$ .

9. Для гибридных микромостиков Al/VaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> крестообразной формы обнаружена гигантская анизотропия сопротивления ( $\gtrsim 10^3$ ), свидетельствующая о

формировании непрерывных сверхпроводящих каналов над областями с компенсированным магнитным полем, повторяющих форму магнитных доменов, в окружении нормального металла.

10. Показано, что сверхпроводящие микромостики в поле уединённой доменной стенки конечной ширины в состоянии доменной сверхпроводимости обладают анизотропией токнесущей способности. Дiodный эффект для такой задачи был обнаружен в численных экспериментах, проведенных в рамках нестационарной модели Гинзбурга–Ландау. Дiodный эффект для мезоскопических гибридных систем Al/BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> в состоянии компенсированной сверхпроводимости был обнаружен экспериментально и объяснен теоретически в рамках модели критического состояния.

11. Для мезоскопических гибридных структур, состоящих из сверхпроводящих Al дисков конечной толщины и магнитных CoPt частиц, экспериментально и теоретически исследована конкуренция двух механизмов зарождения сверхпроводимости: на краю сверхпроводящего диска и в его центре. Показано, что изменение режима зарождения сверхпроводимости сопровождается резким изменением наклона огибающей  $T_c(H)$ , а также скачкообразным изменением периода и амплитуды осцилляций критической температуры.

12. Экспериментально исследованы особенности нелинейных свойств перфорированных Al микромостиков с двумя вложенными подрешётками больших и малых отверстий. Показано, что нарушение симметрии потенциала пиннинга для движения вихрей вызывает появление среднего напряжения (дiodный эффект) и появление чётных фурье–гармоник напряжения. Обнаруженный эффект позволяет создавать сверхпроводящие образцы с анизотропной нелинейностью посредством создания потенциала пиннинга заданной симметрии. Экспериментально обнаружен эффект резонансной генерации чётных фурье–гармоник в образце с симметричным потенциалом пиннинга при  $|H| \simeq 3H_1$ , где  $H_1$  – так называемое поле соизмеримости.

13. Теоретически исследован процесс формирования вихревых молекул в мезоскопических криотронах. Показано, что при увеличении силы управляющего тока  $I_w$  происходит последовательная генерация пар вихрь–антивихрь, что приводит к осцилляторной зависимости критического тока криотрона  $I_c$  от  $I_w$ . Такие джозефсоновские осцилляции критического тока для мезоскопических Al/Nb криотронов были обнаружены экспериментально.

14. Методом туннельной спектроскопии экспериментально исследованы квантово-размерные состояния для электронов в тонких плёнках Pb(111) (QWS-состояния) в режиме заданной высоты или заданного тока. Показано, что энергетический спектр  $V_n$  таких состояний зависит от локальной толщины плёнки, при этом амплитуда осцилляций дифференциальной проводимости в зависимости от потенциала образца зависит от формы иглы. Указана связь энергии одного из пиков дифференциальной проводимости, который располагается на 0.65 эВ выше уровня Ферми и практически не зависит от толщины

плёнки, с микроскопическими параметрами – толщиной монослоя  $d_{ML}$  в направлении [111], импульсом Ферми  $k_F$  и эффективной массой  $m^*$ .

15. Развита методика модуляционной сканирующей туннельной спектроскопии, основанная на одновременном получении согласованных карт дифференциальной туннельной проводимости на заданной энергии с применением техники синхронного детектирования и топографической карты в режиме заданного тока. Метод позволяет визуализировать области с различной чётностью числа монослоёв и обнаруживать скрытые дефекты в Pb(111) плёнках (ступени монокристаллической высоты в подложке, инородные включения и дислокационных линий) и отличать артефакты топографических изображений, связанными с неидеальностью работы пьезосканера, системы обратной связи и/или несовершенством алгоритмов обработки изображений, от изображений террас Pb(111) с неквантованным изменением высоты. Обнаруженные крупномасштабные неоднородности электронных свойств для террас Pb(111) с неквантованным изменением толщины могут свидетельствовать о наличии внутренних напряжений в плёнках Pb.

16. Методом туннельной спектроскопии экспериментально исследованы квантово-размерные состояния для электронов, локализованных над плёнками Pb в неоднородном электрическом поле (модифицированные IPS-состояния) в режиме заданного туннельного тока. Показано, что для террас Pb(111) постоянной высоты спектр эмиссионных IPS-резонансов не зависит от локальной толщины плёнки, но зависит от измерительного тока и формы иглы. С помощью квазиклассического соотношения Бора–Зоммерфельда для частицы в «треугольной» потенциальной яме, образованной поверхностью кристалла с одной стороны и линейно растущим электрическим потенциалом внешних источников с другой стороны, получена формула для оценки положения высших эмиссионных резонансов  $|e|V_n \simeq W + \text{const} \cdot n^{2/3}$ . Это соотношение позволяет оценить работу выхода образца  $W$  по результатам анализа зависимости  $V_n$  от  $n^{2/3}$  для высших IPS-резонансов. Для плёнок Pb(111) с террасами квантованной высоты получена оценка локальной работы выхода ( $W \simeq 3.8 \pm 0.1$  эВ), которая согласуется с результатами микроскопических расчётов. Показано, что величина  $W$  не зависит от локальной толщины плёнки и формы иглы.

Приложение 1 посвящено обсуждению симметричных свойств решений линейаризованного уравнения Гинзбурга–Ландау в периодическом поле одномерной доменной структуры. Приложение 2 посвящено описанию процедуры решения одно- и двумерных задач Штурма–Лиувилля со смешанными граничными условиями матричным способом. Приложения 3 и 4 содержат предварительные экспериментальные результаты для туннельной проводимости плёнок Pb на вицинальной поверхности Si(557), а также SIC-фазы и плёнок Pb/SIC.



## Список публикаций по теме диссертации

Публикации в журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus

[A1] Werner, R. *Edge superconductivity in Nb thin film microbridges revealed by electric transport measurements and visualized by scanning laser microscopy* / R. Werner, A. Yu. Aladyshkin, I. M. Nefedov, A. V. Putilov, M. Kemmler, D. Bothner, A. Loerincz, K. Ilin, M. Siegel, R. Kleiner, D. Koelle // *Supercond. Sci. Technol.* – 2013. – Vol. 26. – N. 095011.

[A2] Aladyshkin, A. Yu. *Tunable anisotropic nonlinearity in superconductors with asymmetric antidot array* / A. Yu. Aladyshkin, J. Van de Vondel, C. C. de Souza Silva, V. V. Moshchalkov // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 93. – N. 082501.

[A3] Aladyshkin, A. Yu. *Domain-wall superconductivity in hybrid superconductor–ferromagnet structures* / A. Yu. Aladyshkin, A. I. Buzdin, A. A. Fraerman, A. S. Mel'nikov, D. A. Ryzhov, A. V. Sokolov // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 68. – N. 184508.

[A4] Aladyshkin A. Yu. *Domain wall superconductivity in ferromagnetic superconductors and hybrid S/F structures* / A. Yu. Aladyshkin, A. I. Buzdin, A. A. Fraerman, A. S. Mel'nikov, D. A. Ryzhov, A. V. Sokolov // book chapter in *Theory of Quantum Transport in Metallic and Hybrid Nanostructures*, A. Glatz, V. I. Kozub, V. M. Vinokur (eds.), NATO Science Series, Springer, Netherlands. – 2006. – Vol. 230. – P. 209-214.

[A5] Gillijns, W. *Domain-wall guided nucleation of superconductivity in hybrid ferromagnet–superconductor–ferromagnet layered structures* / W. Gillijns, A. Yu. Aladyshkin, M. Lange, M. J. Van Bael, V. V. Moshchalkov // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 95. – N. 227003.

[A6] Gillijns, W. *Domain-wall superconductivity in a ferromagnet/ superconductor/ferromagnet trilayer* / W. Gillijns, A. Yu. Aladyshkin, M. Lange, M. J. Van Bael, V. V. Moshchalkov // *Physica C: Superconductivity.* – 2006. – Vol. 437-438. – P. 73-76.

[A7] Aladyshkin A. Yu. *Thin-film superconductor–ferromagnet hybrids: Competition between nucleation of superconductivity at domain walls and domains' centers* / A. Yu. Aladyshkin, V. V. Moshchalkov // *Phys. Rev. B.* – 2006. – Vol. 74. – N. 064503.

[A8] Aladyshkin, A. Yu. *Nucleation of superconductivity and vortex matter in superconductor–ferromagnet hybrids* / A. Yu. Aladyshkin, A. V. Silhanek, W. Gillijns, V. V. Moshchalkov // *Supercond. Sci. Technol.* – 2009. – Vol. 22. – N. 053001.

[A9] Gillijns, W. *Magnetic confinement of the superconducting condensate in superconductor–ferromagnet hybrid composites* / W. Gillijns, A. Yu. Aladyshkin,

A. V. Silhanek, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 76. – N. 060503(R).

[A10] Aladyshkin, A. Yu. *Magnetic tunable confinement of the superconducting condensate in superconductor/ferromagnet hybrids* / A. Yu. Aladyshkin, W. Gillijns, A. V. Silhanek, V. V. Moshchalkov // Physica C: Superconductivity. – 2008. – Vol. 468. – P. 737-740.

[A11] Gillijns, W. *Field induced superconductivity in magnetically modulated films* / W. Gillijns, A. V. Silhanek, A. Yu. Aladyshkin, V. V. Moshchalkov // Physica C: Superconductivity. – 2008. – Vol. 468. – P. 741-744.

[A12] Аладышкин, А. Ю. *Локализованная сверхпроводимость в гибридных структурах сверхпроводник–ферромагнетик* / А. Ю. Аладышкин, А. С. Мельников, Д. А. Рыжов, А. В. Самохвалов, А. А. Фраерман, В. Гилляйнс, А. В. Силанек, В. В. Мошchalkov // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. – Т. 73. – С. 8-12 (Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2009. – Vol. 73. – P. 3–7).

[A13] Aladyshkin, A. Yu. *Effect of ferromagnetic film thickness on magnetoresistance of thin-film superconductor–ferromagnet hybrids* / A. Yu. Aladyshkin, A. P. Volodin, V. V. Moshchalkov // Journ. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 108. – N. 033911.

[A14] Aladyshkin, A. Yu. *Hybridization and interference effects for localized superconducting states in strong magnetic field* / A. Yu. Aladyshkin, A. S. Melnikov, D. A. Savinov, I. M. Nefedov, M. A. Silaev, I. A. Shereshevsky // Phys. Rev. B. – 2012. – Vol. 85. – N. 184528.

[A15] Aladyshkin A. Yu. *Localized superconductivity and Little–Parks effect in superconductor/ferromagnet hybrids* / A. Yu. Aladyshkin, D. A. Ryzhov, A. V. Samokhvalov, D. A. Savinov, A. S. Mel'nikov, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 75. – N. 184519.

[A16] Schildermans, N. *Different regimes of nucleation of superconductivity in mesoscopic superconductor/ferromagnet hybrids* / N. Schildermans, A. Yu. Aladyshkin, A. V. Silhanek, J. van de Vondel, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 77. – N. 214519.

[A17] Aladyshkin, A. Yu. *Crossover between different regimes of inhomogeneous superconductivity in planar superconductor–ferromagnet hybrids* / A. Yu. Aladyshkin, J. Fritzsche, R. B. G. Kramer, R. Werner, S. Guénon, R. Kleiner, D. Koelle, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. B. – 2011. – Vol. 84. – N. 094523.

[A18] Werner, R. *Domain–wall and reverse–domain superconducting states of a Pb thin-film bridge on a ferromagnetic BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> single crystal* / R. Werner, A. Yu. Aladyshkin, S. Guénon, J. Fritzsche, I. M. Nefedov, V. V. Moshchalkov, R. Kleiner, D. Koelle // Phys. Rev. B. – 2011. – Vol. 84. – N. 020505(R).

- [A19] Ataklti, G. W. Localization of superconductivity in superconductor–electromagnet hybrids / G. W. Ataklti, A. Yu. Aladyshkin, W. Gillijns, I. M. Nefedov, J. Van de Vondel, A. V. Silhanek, M. Kemmler, R. Kleiner, D. Koelle, V. V. Moshchalkov // *Supercond. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 25. – N. 065015.
- [A20] Aladyshkin, A. Yu. *Planar superconductor/ferromagnet hybrids: Anisotropy of resistivity induced by magnetic templates* / A. Yu. Aladyshkin, J. Fritzsche, V. V. Moshchalkov // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94. – N. 222503.
- [A21] Aladyshkin, A. Yu. *Giant anisotropy of the resistance induced by magnetic domains in superconductor/ferromagnet hybrids* / A. Yu. Aladyshkin, J. Fritzsche, V. V. Moshchalkov // *Physica C: Superconductivity.* – 2010. – Vol. 470. – P. 883.
- [A22] Aladyshkin, A. Yu. *Reverse-domain superconductivity in superconductor–ferromagnet hybrids: effect of a vortex-free channel on symmetry of  $I - V$  characteristics* / A. Yu. Aladyshkin, D. Yu. Vodolazov, J. Fritzsche, R. B. G. Kramer, V. V. Moshchalkov // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 97. – N. 052501.
- [A23] Silaev, M. A. *The diode effect induced by domain–wall superconductivity* / M. A. Silaev, A. Yu. Aladyshkin, M. V. Silaeva, A. S. Aladyshkina // *Journ. Phys.: Condens. Matt.* – 2014. – Vol. 26. – N. 095702.
- [A24] Aladyshkin, A. Yu. *Mesoscopic cross–film cryotrons: Vortex trapping and dc–Josephson–like oscillations of the critical current* / A. Yu. Aladyshkin, G. W. Ataklti, W. Gillijns, I. M. Nefedov, I. A. Shereshevsky, A. V. Silhanek, J. Van de Vondel, M. Kemmler, R. Kleiner, D. Koelle, V. V. Moshchalkov // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 83. – N. 144509.
- [A25] Aladyshkin, A. Yu. *Formation of bound vortex–antivortex pairs and their depinning in mesoscopic cross–film cryotrons* / A. Yu. Aladyshkin, I. M. Nefedov, A. S. Aladyshkina, I. A. Shereshevsky // *Physica C: Superconductivity.* – 2012. – Vol. 479. – P. 98-101.
- [A26] Уставщиков, С. С. *Туннельная интерферометрия и измерение толщины ультратонких металлических плёнок Pb(111)* / С. С. Уставщиков, А. В. Путилов, А. Ю. Аладышкин // *Письма в ЖЭТФ.* – 2017. – Т. 106. – С. 476-482 (*JETP Lett.* – 2017. – V. 106. – P. 491-497).
- [A27] Путилов, А. В. *Пространственно-неоднородные квантово-размерные состояния и визуализация скрытых дефектов в пленках Pb(111)* / А. В. Путилов, С. С. Уставщиков, С. И. Божко, А. Ю. Аладышкин // *Письма в ЖЭТФ.* – 2019. – Т. 109. – С. 789-796 (*JETP Lett.* – 2019. – Vol. 109. – P. 755-761).
- [A28] Aladyshkin A. Yu. *Quantum–well and modified image–potential states in thin Pb(111) films: an estimate for the local work function* / A. Yu. Aladyshkin // *Journ. Phys.: Condens. Matt.* – 2020. – Vol. 32. – N. 435001.

## Публикации в тезисах и трудах конференций

В 2003–2020 гг. автором по теме диссертации сделано более сорока докладов на всероссийских и международных конференциях.

## Прочие публикации

[С1] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011612682 «Моделирование процессов в сверхпроводящих мезоскопических пленках во внешних полях (GLDD)», правообладатель — Учреждение Российской академии наук Институт физики микроструктур РАН, авторы — И. М. Нефёдов, И. А. Шерешевский, А. Ю. Аладышкин, В. В. Курин, Д. А. Рыжов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 1 апреля 2011 г.

[С2] Мельников, А. С. *Электродинамика гибридных структур сверхпроводящей спинтроники* / А. С. Мельников, С. В. Миронов, А. В. Самохвалов, А. Ю. Аладышкин, А. И. Буздин // Научное обеспечение реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации. Доклады на Общих собраниях тематических и региональных отделений РАН: в 2-х томах. — М.: Российская академия наук / Под редакцией академика РАН В. Г. Бондура и члена-корреспондента РАН А. А. Макоско, т. 2. — 2019. — с. 51–62.

Часть результатов диссертации также опубликована в виде препринтов в базе данных [www.arxiv.org](http://www.arxiv.org) с открытым доступом: 0302520, 0706.3803, 0904.1605, 0902.1630, 0905.2590, 1005.1246, 1007.2527, 1102.4545, 1105.1596, 1105.6048, 1112.2256, 1204.4690, 1205.3992, 1906.04472, 1906.04487, 2005.09041.

## Список цитируемой литературы

- 1 Anderson P. W. *Spin alignment in the superconducting state* / P. W. Anderson, H. Suhl // Phys. Rev. — 1959. — Vol. 116. — P. 898–900.
- 2 Jaccarino V. *Ultra-high-field superconductivity* / V. Jaccarino, M. Peter // Phys. Rev. Lett. — 1962. — Vol. 9. — P. 290–292.
- 3 Bulaevskii L. N. *Coexistence of superconductivity and magnetism: Theoretical predictions and experimental results* / L. N. Bulaevskii, A. I. Buzdin, M. L. Kulić, S. V. Panyukov // Adv. Phys. — 1985. — Vol. 34. — P. 175–261.
- 4 Изюмов Ю. А. *Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник* / Ю. А. Изюмов, Ю. Н. Прошин, М. Г. Хусаинов // УФН. — 2002. — Т. 172. — P. 113–154.
- 5 Buzdin A. I. *Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures* / A. I. Buzdin // Rev. Mod. Phys. — 2005. — Vol. 77. — P. 935.
- 6 Van Bael M. J. *Magnetic properties of submicron Co islands and their use as artificial pinning centers* / M. J. Van Bael, K. Temst, V. V. Moshchalkov, Y. Bruynseraede // Phys. Rev. B — 1999. — Vol. 59. — P. 14674–14679.

- 7 Van Bael M. J. *Local observation of field polarity dependent flux pinning by magnetic dipoles* / M. J. Van Bael, J. Bekaert, K. Temst *et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86. – P. 155–158.
- 8 Yang Z. *Domain-wall superconductivity in superconductor–ferromagnet hybrids* / Z. Yang, M. Lange, A. Volodin, R. Szymczak, V. V. Moshchalkov // Nature Mater. – 2004. – Vol. 3. – P. 793–798.
- 9 Buzdin, A. I. *Existence of superconducting domain walls in ferromagnets* / A. I. Buzdin, L. N. Bulaevskii, S. V. Panyukov // JETP. – 1984. – Vol. 60. – P. 174–179.
- 10 Buzdin A. I. *Domain wall superconductivity in ferromagnetic superconductors* / A. I. Buzdin, A. S. Mel'nikov // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 67. – N. 020503.
- 11 Buck D. A. *The Cryotron – A Superconductive Computer Component* / D. A. Buck // Proc. IRE. – 1956. – Vol. 44. – P. 482–493.
- 12 Clinton T. W. *Nonvolatile switchable Josephson junctions* / T. W. Clinton, M. Johnson // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 85. – P. 1637–1643.
- 13 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.
- 14 Salikhov R. I. *Experimental observation of the spin screening effect in superconductor/ferromagnet thin film heterostructures* / R. I. Salikhov, I. A. Garifullin, N. N. Garif'yanov *et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 102. – N. 087003.
- 15 Ryazanov V. V. *Coupling of two superconductors through a ferromagnet: evidence for a  $\pi$ -junction* / V. V. Ryazanov, V. A. Oboznov, A. Y. Rusanov *et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86. – P. 2427–2430.
- 16 Leksin P. V. *Evidence for triplet superconductivity in a superconductor-ferromagnet spin valve* / P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, I. A. Garifullin *et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2012. – Vol. 109. – N. 057005.
- 17 Mironov S. *Vanishing Meissner effect as a hallmark of in-plane Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov instability in superconductor–ferromagnet layered systems* / S. Mironov, A. Mel'nikov, A. Buzdin // Phys. Rev. Lett. – 2012. – Vol. 109. – N. 237002.
- 18 Aoki D. *Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in URhGe* / D. Aoki, A. Huxley, E. Ressouche *et al.* // Nature. – 2001. – Vol. 413. – P. 613–616.
- 19 Stolyarov V. S. *Domain Meissner state and spontaneous vortex-antivortex generation in the ferromagnetic superconductor  $\text{EuFe}_2(\text{As}_{0.79}\text{P}_{0.21})_2$*  / V. S. Stolyarov, I. S. Veshchunov, S. Yu. Grebenchuk *et al.* // Science Advances. – 2018. – Vol. 4. – eaat1061.
- 20 Lange, M. *Nanoengineered magnetic-field-induced superconductivity* / M. Lange, M. J. Van Bael, Y. Bruynseraede, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90. – N. 197006.
- 21 Gillijns W. *Tunable field-induced superconductivity* / W. Gillijns, A. V. Silhanek, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 74. – N. 220509(R).
- 22 Lange M. *Phase diagram of a superconductor–ferromagnet bilayer* / M. Lange, M. J. Van Bael, V. V. Moshchalkov // Phys. Rev. – 2003. – Vol. 68. – N. 174522.

- 23 Lange M. *Magnetic-domain-controlled vortex pinning in a superconductor/ferromagnet bilayer* / M. Lange, M. J. Van Bael, V. V. Moshchalkov, Y. Bruynseraede // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 81. – P. 322–324.
- 24 Genenko Yu. A. *Large predicted self-field critical current enhancements in superconducting strips using magnetic screens* / Yu. A. Genenko, A. Usoskin, H. C. Freyhardt // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 83. – P. 3045-3048.
- 25 Morelle M. *Enhanced critical currents through field compensation with magnetic strips* / M. Morelle, V. V. Moshchalkov // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 88. – N. 172507.
- 26 Vodolazov D. Y. *Considerable enhancement of the critical current in a superconducting film by a magnetized magnetic strip* / D. Y. Vodolazov, B. A. Gribkov, S. A. Gusev *et al.* // *Phys. Rev. B.* – 2005. – Vol. 72. – N. 064509.
- 27 Belkin A. *Tunable transport in magnetically coupled MoGe/Permalloy hybrids* / A. Belkin, V. Novosad *et al.* // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 93. – N. 072510.
- 28 Belkin A. *Superconductor/ferromagnet bilayers: influence of magnetic domain structure on vortex dynamics* / A. Belkin, V. Novosad *et al.* // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77. – N. 180506.
- 29 Vlasko-Vlasov V. K. *Soft magnetic lithography and giant magnetoresistance in superconducting/ferromagnetic hybrids* / V. K. Vlasko-Vlasov, U. Welp *et al.* // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 78. – N. 214511.
- 30 Vlasko-Vlasov V. *Guiding superconducting vortices with magnetic domain walls* / V. Vlasko-Vlasov, U. Welp *et al.* // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77. – N. 134518.
- 31 Fritzsche J. *Highly transparent superconducting-normal junctions induced by local fields of magnetic domains in a homogeneous superconductor* / J. Fritzsche, R. B. G. Kramer, V. V. Moshchalkov // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 80. – N. 094514.
- 32 Iavarone M. *Visualizing domain wall and reverse domain superconductivity* / M. Iavarone, S. A. Moorei *et al.* // *Nature Commun.* – 2014. – Vol. 5. – N. 4766.
- 33 Saint-James D. *Onset of superconductivity in decreasing fields* / D. Saint-James, P. G. de Gennes // *Phys. Lett.* – 1963. – Vol. 7. – P. 306–308.
- 34 Ning Y. X. *Observation of surface superconductivity and direct vortex imaging of a Pb thin island with a scanning tunneling microscope* / Y. X. Ning, C. L. Song, Z. L. Guan *et al.* // *Europhys. Lett.* – 2009. – Vol. 85. – N. 27004.
- 35 Cren T. *Vortex fusion and giant vortex states in confined superconducting condensates* / T. Cren, L. Serrier-Garcia, F. Debontridder, D. Roditchev // *Phys. Rev. Lett.* – 2011. – Vol. 107. – N. 097202.
- 36 Little W. A. *Observation of quantum periodicity in the transition temperature of a superconducting cylinder* / W. A. Little, R. D. Parks // *Phys. Rev. Lett.* – 1962. – Vol. 9. – P. 9–12.
- 37 Carballeira C. *Multiquanta vortex entry and vortex-antivortex pattern expansion in a superconducting microsquare with a magnetic dot* / C. Carballeira, V. V. Moshchalkov, L. F. Chibotaru, A. Ceulemans // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 95. – N. 237003.

- 38 de Souza Silva C. C. *Controlled multiple reversals of a ratchet effect* / C. C. de Souza Silva, J. Van de Vondel, M. Morelle *et al.* // Nature. – 2006. – Vol. 440. – P. 651.
- 39 Pannetier B. *Nucleation of superconductivity in a thin film in a spatially modulated magnetic field* / B. Pannetier, S. Rodts, J. L. Genicon, Y. Otani, J. P. Nozières // chapter in Macroscopic Quantum Phenomena and Coherence in Superconducting Networks. Singapore: World Scientific. – 1995. – P. 17–24.
- 40 Zhang T. *Superconductivity in one-atomic-layer metal films grown on Si(111)* / T. Zhang, P. Cheng, W.-J. Li *et al.* // Nature Phys. – 2010. – Vol. 6. – P. 104–108.
- 41 Brun C. *Remarkable effects of disorder on superconductivity of single atomic layers of lead on silicon* / C. Brun, T. Cren, V. Cherkez *et al.* // Nature Phys. – 2014. – Vol. 10. – P. 444–450.
- 42 Yaji K. *Large Rashba spin splitting of a metallic surface-state band on a semiconductor surface* / K. Yaji, Y. Ohtsubo *et al.* // Nature Commun. – 2010. – Vol. 1. – N. 17.
- 43 Calleja F. *Spatial variation of a giant spin-orbit effect induces electron confinement in graphene on Pb islands* / F. Calleja, H. Ochoa, M. Garnica *et al.* // Nature Phys. – 2015. – Vol. 11. – P. 43–47.
- 44 Altfeder I. B. *Electron fringes on a quantum wedge* / I. B. Altfeder, K. A. Matveev, D. M. Chen // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 78. – P. 2815–2818.
- 45 Su W. B. *Correlation between quantized electronic states and oscillatory thickness relaxations of 2D Pb islands on Si(111)-(7 × 7) surfaces* / W. B. Su, S. H. Chang, W. B. Jian *et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86. – P. 5116–5119.
- 46 Hong I.-P. *Decay mechanisms of excited electrons in quantum-well states of ultrathin Pb islands grown on Si(111): Scanning tunneling spectroscopy and theory* / I-Po Hong, C. Brun, F. Patthey *et al.* // Phys. Rev. B. – 2009. – Vol. 80. – N. 081409.
- 47 Garcia N. *Image states: Binding energies, effective masses, and surface corrugation* / N. Garcia, B. Reihl, K. H. Frank, A. R. Williams // Phys. Rev. Lett. – 1985. – Vol. 54. – P. 591–594.
- 48 Gundlach K. H. *Zur berechnung des tunnelstroms durch eine trapezförmige potentialstufe* / K. H. Gundlach // Solid-State Electr. – 1966. – Vol. 9. – P. 949–957.
- 49 Kolesnychenko O. Yu. *Field-emission resonance measurements with mechanically controlled break junctions* / O. Yu. Kolesnychenko, Yu. A. Kolesnichenko, O. I. Shklyarevskii, H. van Kempen // Physica B. – 2000. – Vol. 291. – P. 246–255.
- 50 Lin C. L. *Manifestation of work function difference in high order Gundlach oscillation* / C. L. Lin, S. M. Lu *et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2007. – Vol. 99. – N. 216103.
- 51 Ploigt H.-C. *Local work function changes determined by field emission resonances: NaCl/Ag(100)* / H.-C. Ploigt, C. Brun, M. Pivetta *et al.* // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 76. – N. 195404.
- 52 Lang N. D. *Theory of metal surfaces: work function* / N. D. Lang, W. Kohn // Phys. Rev. B. – 1971. – Vol. 3. – P. 1215–1223.

**Аладышкин Алексей Юрьевич**

**Эффекты размерного квантования и  
локализованной сверхпроводимости  
в гибридных металлических наноструктурах**

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико–математических наук

Подписано к печати 5 ноября 2020 г.  
Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН,  
603950, Нижний Новгород, ГСП–105