



Утверждаю

Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Ален-корреспондент РАН

С.А. Никитов

12 ноября 2018

## ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, на диссертационную работу Куликова Кирилла Вячеславовича «Особенности динамики и вольт-амперных характеристик джозефсоновских наноструктур, обусловленные резонансными, топологическими и неравновесными явлениями», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

Временные процессы в джозефсоновских переходах обладают интересной и очень богатой электродинамикой. Интерес к этим системам возрос в последнее время из-за появления высокотемпературных сверхпроводников, обладающих нетривиальной формой параметра порядка, и возможности существования майорановских фермионов, частиц, которые являются своей собственной античастицей и описываются реальными волновыми функциями. Майорановские фермионы могут быть реализованы как локализованные состояния внутри щели сверхпроводника с триплетным спариванием. Основной целью данной диссертации является исследование фазовой динамики одиночных переходов, включенных в резонатор и связанных джозефсоновских переходов с учетом неравновесных и топологических свойств.

Диссертация состоит из введения, 3 глав основного текста, Заключения и списка использованной литературы из 105 наименований.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации рассматривается система связанных джозефсоновских переходов, включенная в резонансный контур. Дано описание модели для системы связанных джозефсоновских переходов, шунтированной LC-элементами, описание методов расчета вольт-амперных характеристик и фазовой динамики. В данной главе представлены результаты исследования резонансных свойств одиночного джозефсоновского перехода и проведен анализ

его реакции на внешнее периодическое воздействие. Определена также зависимость ширины ступеньки Шапиро от амплитуды внешнего излучения. Наличие в цепочке джозефсоновских переходов нескомпенсированного электрического заряда приводит к связи переходов в цепочке, которая может быть учтена аналитически. Полученные аналитические выражения удается решить численно и получить как ВАХ переходов, т.е. зависимость среднего напряжения от тока, так и временные зависимости возникающих напряжений. Необычным является полученная зависимость амплитуды ступенек Шапиро от внешнего СВЧ поля.

Во **второй главе** приведены результаты исследования джозефсоновских переходов с топологически нетривиальными барьерами, демонстрирующие  $4\pi$ -периодический джозефсоновский ток. Дано описание RCSJ-модели для такого перехода, где джозефсоновский ток описывается  $4\pi$ -периодичной зависимостью, а также учитывается влияние емкости перехода. Проведено сравнение результатов с полученными ранее в рамках более простой, но более распространенной модели RSJ, где отсутствует емкость. Показана возможность возникновения нечетных ступенек Шапиро, имеющих субгармоническую природу и свойства, качественно отличающиеся от ступенек в обычных переходах. Обнаружена также дополнительная последовательность субгармоник в лестничной структуре на вольт-амперных характеристиках, которые можно использовать для анализа  $4\pi$ -периодичности сверхпроводящего тока. В последней части второй главы рассмотрен ДП с двумя компонентами сверхпроводящего тока. Такой переход в области малых напряжений демонстрирует  $4\pi$ -периодичность разности фаз даже при амплитуде  $4\pi$ -периодической компоненты тока, много меньшей амплитуды джозефсоновской компоненты, что позволяет наблюдать осцилляции сверхпроводящего тока с дробным периодом при малой диссипации в области гистерезиса. Определен интервал амплитуд внешнего электромагнитного излучения, в котором наиболее существенно проявление на вольт-амперной характеристике дробных ступенек Шапиро.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию неравновесных эффектов, создаваемых инжекцией тока в цепочку внутренних джозефсоновских переходов в высокотемпературных сверхпроводниках. В главе дано описание модели системы связанных джозефсоновских переходов с учетом зарядового разбаланса ветвей спектра элементарных возбуждений. В данной главе приведены результаты исследования влияния неравновесных условий на ступеньки Шапиро, возникающие под действием внешнего электромагнитного излучения. Показано, что зарядовый разбаланс может приводить к наклону ступенек Шапиро на вольт-амперных характеристиках и обсуждается сдвиг ступеньки Шапиро от своего канонического значения под воздействием неперидических граничных условий.

Выводы, приведенные автором в **заключении** диссертации, кратко излагают основные результаты, полученные автором в диссертационной работе. Заключение завершается списком опубликованных работ.

К недостаткам работы можно отнести следующее:

1. В главе 1 обсуждается метод экспериментального обнаружения заряда на сверхпроводящих слоях, основанный на измерении амплитуды осцилляций напряжения в цепочке или на шунтирующем конденсаторе. Вряд ли предлагаемый метод может быть использован в эксперименте из-за очень высоких (сотни гигагерц) частот колебаний в системе и трудности измерения заряда на этих частотах.
2. Топологичность барьера в джозефсоновском переходе типа сэндвич учитывается введением локализованных внутри щелевых состояний. Предполагается относительно большая емкость перехода, а сравнение с экспериментальными данными проводится на переходах типа мостик, где емкость мала и реализуется одномерный случай с малой емкостью.
3. Предлагаемая регистрация  $4\pi$ -периодичности путем анализа лестничной структуры ВАХ основана на расчетах не учитывающих шум перехода. При наличии шумов ситуация может существенно измениться. Это не учтено в работе. К тому же при предполагаемой прозрачности границы  $D=0.6-0.9$  величина емкости перехода (параметр МсКамбера) слабо влияет на свойства переходов.
4. К недостаткам по оформлению автореферата следует отнести большой список публикаций, который занимает более 7 страниц.

Приведённые замечания не умаляют научной ценности диссертации, которая по актуальности, объёму выполненных исследований и оригинальности удовлетворяет требованиям Положения ВАК РФ «О порядке присуждения учёных степеней». Материалы диссертации опубликованы в ведущих научных изданиях.

Автореферат улучшает понимание использованных и развитых в диссертации методов и полученных теоретических и численных результатов и проясняет вопросы, которые следует изучить в возможных дальнейших исследованиях с использованием рассмотренных в диссертации моделей.

Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях входящих в список ВАК, а также в 12 статьях в журналах, не входящих в список ВАК, и трудах конференций. В рамках диссертации было опубликовано учебное пособие для студентов старших курсов. Результаты работы представлены на 24 международных и всероссийских конференциях, а также более 5 семинаров в России и за рубежом.

Таким образом, считаем, что диссертационная работа ««Особенности динамики и вольт-амперных характеристик джозефсоновских наноструктур, обусловленные резонансными, топологическими и неравновесными явлениями» представляет цельный научный труд, соответствует требованиям п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Куликов Кирилл Вячеславович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика».

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании семинара по направлениям «Сверхпроводниковая электроника» и «Физика низкоразмерных структур, микро- и наноэлектроника» ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН 6 ноября 2018 г.

Отзыв составил

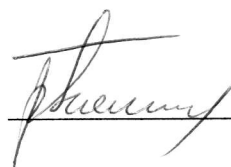
доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

лаборатории физических основ

функциональной тонкопленочной оксидной электроники

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,



Г.А. Овсянников

9 ноября 2018 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук,  
125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7,  
Тел.: +7-4956297431, E-mail: gena@hitech.cplire.ru