

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Российско-Украинского семинара

«Физика сверхпроводниковых гетероструктур»

Nb/Al-AlO_x-Nb гетероструктуры – новый тип джозефсоновских переходов с внутренним шунтированием

М.А. Белоголовский

Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина
Национальной академии наук Украины, bel@fti.dn.ua

Основные требования, предъявляемые к джозефсоновским переходам, используемым в метрологических приложениях, заключаются в следующем: рабочий диапазон температур - 4.2 К и выше, высокая температурная стабильность, однозначная зависимость тока от напряжения, отсутствие субгармонических ступенек Шапиро, подавление неравновесных эффектов, возникающих под действием внешнего высокочастотного поля, хорошая воспроизводимость образцов, возможность создания интегральных схем с высокой степенью интеграции. В данном докладе показано, что все эти условия могут быть реализованы в четырехслойных гетероструктурах Nb/Al-AlO_x-Nb, которые изготавливаются по стандартной ниобиевой технологии с двумя основными отличиями – толщина алюминиевого слоя, используемого для создания оксидного барьера, составляет $d_{Al} = 50-100$ нм и существенно превышает типичное значение в несколько нанометров, в то время как время экспозиции, произведение давления кислорода на время окисления, снижается от значений порядка 1000 Па·с и выше до 150-500 Па·с. Толщина ниобиевых слоев в наших гетероструктурах составляла 270 нм, а площадь контактов – 25 мкм².

Из-за того, что толщины Nb и Al пленок были сравнимыми по величине, в Nb/Al бислое возникала наведенная щель со сравнительно пологой температурной зависимостью выше 4.2 К. Оптимальные значения d_{Al} были порядка 80-100 нм. Относительно малая толщина оксидного слоя и большая площадь контакта способствовали реализации в нем универсального распределения прозрачностей Шепера-Бауэра с хорошо воспроизводимым значением подщелевого сопротивления $R_{sg}(1.7K) \approx 1.2R_N$ для указанных выше d_{Al} . С ростом температуры отношение $R_{sg}(T)/R_N$ падало и при 4.2 К было ≈ 1 , вследствие чего параметр Маккамбера-Стюарта был меньше единицы при температурах выше гелиевых, и гистерезисные эффекты в вольт-амперных характеристиках исчезали. Выше 4.2 К не наблюдались дробные ступеньки Шапиро, а стандартные особенности в ВАХ при внешнем СВЧ воздействии частотой порядка 70 ГГц регистрировались вплоть до температур 8.3 К. Были реализованы массивы из 8192 Nb/Al-AlO_x-Nb гетероструктур с типичными характеристическими напряжениями 0.3-0.5 мВ, которые демонстрировали отчетливые ступеньки Шапиро вплоть до $n = 4$.

Полученные результаты анализируются в рамках общепринятой теории джозефсоновских характеристик сверхпроводящих гетероструктур с двумя потенциальными барьерами и сравниваются с данными других авторов для туннельных контактов с Nb/Al бислоями. Обсуждается природа универсального распределения прозрачностей в наноразмерных оксидных слоях, которая связывается с локальными флуктуациями потенциального барьера, обусловленными кислородными вакансиями, возникающими в слоях AlO_x, полученных термическим окислением. Приводятся качественные соображения, поясняющие преимущества SNIS переходов для метрологических целей.

Данная работа была выполнена совместно с экспериментальной группой Национального института метрологических исследований в г. Турине - V. Lacquaniti, N. De Leo, M. Fretto, A. Sosso (INRiM, Electromagnetism Division, 10135 Torino, Italy).

Джозефсоновская магнитная память на основе SFS переходов.

В.В. Больгинов, В.С. Столяров, Д.С. Собанин, В.В. Рязанов.

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, 142432, Россия, bolg@issp.ac.ru

Сверхпроводимость (S) и ферромагнетизм (F) являются антагонистическими явлениями с точки зрения спинового упорядочения. Одним из наиболее интересных эффектов их взаимодействия являются осцилляции сверхпроводящего параметра порядка в окрестности SF-границы, наведенного в ферромагнетике за счет эффекта близости. Наиболее важным следствием является возникновение пи-состояния джозефсоновских переходов с ферромагнитной прослойкой [1]. В работе [2] этот эффект был наглядно проиллюстрирован при изучении джозефсоновских переходов с ферромагнитной прослойкой из сплава $\text{Cu}_{0.47}\text{Ni}_{0.53}$. В данной работе на примере SFS-контактов $\text{Nb-Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb}$ демонстрируются другие необычные явления, которым ранее не уделялось достаточно внимания. Так экспериментально продемонстрировано, что магнитная неоднородность F-слоя, связанная с наличием доменной структуры сильно искажает зависимость критического тока SFS-контакта от внешнего магнитного поля $I_c(H)$. Кроме того, была впервые экспериментально продемонстрирована гистерезисная зависимость $I_c(H)$, связанная с зависимостью намагниченности прослойки от магнитной предыстории. Такая зависимость позволяет реализовать на основе таких контактов джозефсоновский магнитный переключатель, который затем может быть использован в схемах быстрой одноквантовой логики (БОК) в качестве ячейки постоянной памяти. Преимуществами таких переключателей является полная технологическая совместимость со стандартной ниобий-алюминиевой технологией изготовления БОК-структур, низкое энергопотребление, высокое быстродействие, высокая стабильность цифровых состояний. Демонстрируется работа джозефсоновского вентиля на основе SFS-контакта Nb-PdFe-Nb с характерным временем срабатывания 10^{-7} - 10^{-6} сек. Показано, что добавление в состав прослойки дополнительного туннельного слоя из оксида алюминия (SIFS-переходы $\text{Nb-Al/AlO}_x\text{-PdFe-Nb}$) позволяет уменьшить время срабатывания на 3 порядка (10^{-10} - 10^{-9} сек), что делает возможным включение таких контактов в архитектуру схем БОК-логики.

[1] Булаевский Л.Н., Кузий В.В., Собанин А.А. Письма в ЖЭТФ, т. 25, 314 (1977).

[2] V.A. Oboznov, V.V. Bol'ginov, A.K. Feofanov, V.V. Ryazanov, A.I. Buzdin. Phys. Rev. Lett., v. 96, 197003 (2006).

Замороженные локальные магнитные поля в структурах, содержащих джозефсоновские контакты.

С.И. Бондаренко

**Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины,
проспект Ленина 47, Харьков 61103, bondarenko@ilt.kharkov.ua**

Экспериментально исследованы особенности распределения транспортного тока и замораживания магнитного поля в двухсвязных и многосвязных сверхпроводящих структурах с контактами Джозефсона.

Установлены статические и динамические свойства создаваемого в Джозефсоновской многосвязной среде керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ локального замороженного магнитного поля. При этом характерный размер области с замороженным полем составлял около 500 микрон, а размер элементарных двухсвязных контуров в керамике – от 1 до 10 микрон. Измерены локальные значения критического магнитного поля начала замораживания поля в керамике, первого и второго критических полей, а также силы пиннинга и вязкости течения замороженного магнитного потока под действием силы Лоренца, возникающей в результате взаимодействия локального замороженного потока с транспортным током, пропускаемым через образец керамики. Обнаруженные свойства многосвязной структуры могут быть использованы для “точечной” диагностики пространственной однородности электромагнитных параметров высокотемпературных сверхпроводников.

Установлены закономерности распределения транспортного тока в сверхпроводящих танталовых или ниобиевых кольцах с макроскопическими размерами (более сантиметра в диаметре) при достижении критического состояния одной из их ветвей, содержащей участок с пониженным критическим током. Если участок имеет длину, превышающую длину когерентности сверхпроводника, то при достижении транспортным током критического состояния участка в ветвях кольца возникают низкочастотные автоколебания (АК) тока. Если участок выполнен в виде точечного прижимного контакта Джозефсона, то после достижения его критического состояния АК не возникают, транспортный ток в ветвях квантуется и может быть заморожен в кольце после его выключения. Обнаруженные свойства макроскопической двухсвязной структуры в виде кольца с транспортным током могут способствовать выяснению электромагнитных свойств многосвязных структур с микроскопическими контурами - кольцами.

Внешнее магнитное поле возбуждает в макроскопическом кольце с точечным контактом Джозефсона диамагнитный ток, величина которого периодически модулируется полем, начиная с его значения, соответствующего критическому току контакта. Глубина модуляции равна порциям парамагнитного тока, скачкообразно периодически поступающего в кольцо и замораживаемого в нем.

Обсуждаются физические механизмы наблюдаемых явлений.

Отрицательное магнетосопротивление сверхпроводящих нанопроволок вследствие нелокальности неравновесного отклика.

Д.Ю. Водолазов¹, F.M. Peeters²

¹ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия, vodolazov@ipm.sci-nnov.ru

²Departement Fysica, Universiteit Antwerpen, Belgium

В нашей работе теоретически исследовано влияние величины сверхпроводящего параметра порядка Δ_{lead} в сверхпроводящих берегах на процесс проскальзывания фазы и вольт-амперные характеристики квазиодномерных сверхпроводящих мостиков. Мы обнаружили, что небольшое уменьшение Δ_{lead} может приводить к уменьшению сопротивления микромостика в резистивном состоянии и увеличению тока перехода в сверхпроводящее состояние. Обнаруженный эффект объясняется увеличением каналов диффузии неравновесных ‘горячих’ квазичастиц из микромостика (где они индуцированы осцилляциями $|\Delta|$ в центре проскальзывания фазы, который находится на расстоянии от сверхпроводящих берегов) при уменьшении Δ_{lead} . Эффект отсутствует, если не принимать во внимание эффективное ‘охлаждение’ квазичастиц, возникающее вследствие наличия члена пропорционального скалярному произведению векторов сверхскорости и электрического поля в кинетических уравнениях для неравновесной функции распределения квазичастиц. Эффект также отсутствует в коротких мостиках (с длиной меньше длины когерентности) и слабо выражен в длинных мостиках (с длиной много большей неупругой длины релаксации неравновесной функции распределения). Обнаруженный эффект может быть использован для объяснения отрицательного магнетосопротивления, обнаруженного в ряде недавних экспериментов на достаточно коротких и узких сверхпроводящих нанопроволоках/микромостиках.

Андреевское отражение и кондактанс точечных FS контактов

Б.П. Водопьянов.

Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского РАН,
420029 Казань, Россия, vodopyanov@kfti.knc.ru

Построена последовательная квазиклассическая теория Андреевского отражения для гетерогенных структур, содержащих интерфейс ферромагнетик-сверхпроводник (F/S).

Получено аналитическое выражение для Андреевского кондактанса точечного контакта ферромагнетик — s-волновой сверхпроводник, позволяющее получать корректные оценки контактной поляризации использованных в экспериментах ферромагнитных материалов.

Найдено аналитическое выражение для ширины уровня локализованного андреевского состояния, проявляющегося в кондактансе точечных контактов ферромагнетик — d-волновой сверхпроводник. Установлено, что наличие спин-зависящего потенциального барьера не может привести к расщеплению андреевского локализованного состояния без учета влияния индуцированной намагниченности на энергетический спектр высокотемпературного сверхпроводника.

Изучено влияние спин-зависящих фазовых сдвигов (SDPS), связанных с амплитудами прохождения и отражения, приобретаемых электроном проводимости при прохождении слоистой структуры ферромагнетик/изолятор/сверхпроводник (FIS) на андреевское отражение и кондактанс FIS контакта [1]. Найдено, что наличие SDPS приводит к формированию спин-зависящих Андреевских связанных состояний внутри сверхпроводящей щели. Для сильных ферромагнетиков и ультратонкого диэлектрического слоя это может привести к появлению конечно-потенциальных пиков в зарядовом кондактансе FIS контакта для {110} ориентированного сверхпроводника. Наоборот для {100} ориентированного сверхпроводника наличие SDPS может привести к восстановлению ноль-потенциального пика. Найдены спин-зависящие амплитуда вероятности андреевского отражения и уровни энергии связанных состояний.

[1] В.Р. Vodopyanov, J. Phys.: Condens. Matter, **22**, 185703 (2010)

**Новые интерференционные эффекты в спиновом клапане
сверхпроводник/ферромагнетик**

И. А. Гарифуллин

Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского

Казанского научного центра РАН, 420029 Казань, Россия, ilgiz_garifullin@yahoo.com

Теории спинового клапана для сверхпроводящего тока, основанные на эффекте близости сверхпроводник/ферромагнетик, предсказывают, что температура сверхпроводящего перехода T_c трехслойных систем Ф1/Ф2/С и Ф1/С/Ф2 для параллельной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев Ф1 и Ф2 (T_c^P) меньше, чем для антипараллельной ориентации их намагниченностей (T_c^{AP}). В данной работе представлены данные для мультислойной системы $CO_x/Fe1/Cu/Fe2/In$ с изменяющейся толщиной слоя Fe2 d_{Fe2} , свидетельствующие о знакопеременном осцилляционном поведении эффекта спинового клапана $\Delta T_c = T_c^{AP} - T_c^P$ [1,2]. Наши измерения показывают, что полный прямой эффект спинового клапана с $T_c^{AP} > T_c^P$ наблюдается при $d_{Fe2} < 1$ нм и полный обратный эффект с $T_c^{AP} < T_c^P$ - при $d_{Fe2} > 1$ нм. Проводится сравнение этих результатов с недавней теорией Фоминова и др. [3], разработанной для исследованной нами конструкции и учитывающей возможность возникновения триплетной сверхпроводимости и эффекты интерференции парной волновой функции. На наш взгляд, интерференция парной волновой функции, отраженной от обеих поверхностей слоя Fe2, является наиболее вероятной причиной наблюдаемого поведения ΔT_c .

- [1] P. V. Leksin, N. N. Garifyanov, I. A. Garifullin, J. Schumann, H. Vinzelberg, V. Kataev, R. Klingeler, O. G. Schmidt, and B. Büchner, Appl. Phys. Lett. **97**, 102505 (2010).
[2] P. V. Leksin, N. N. Garifyanov, I. A. Garifullin, J. Schumann, V. Kataev, O. G. Schmidt, B. Büchner, Phys. Rev. Lett. **106**, 067005 (2011).
[3] Ya. V. Fominov, A. A. Golubov, T. Yu. Karminskaya, M. Yu. Kupriyanov, R. G. Deminov, L. R. Tagirov, JETP Letters. **91**, 308 (2010).

Когерентный транспорт и многократное андреевское отражение в планарных субмикронных контактах Al-Cu-Al и Al-Cu/Fe-Al.

Т. Е. Голикова¹, И.Е. Батов¹, F. Hübler², M. Wolf², D. Beckmann², В.В. Рязанов¹

¹Институт физики твердого тела, РАН, Черноголовка, 142432, snowtigerrr@gmail.com

²Institute of Nanotechnology, Reaserch Centre Karlsruhe, 76021 Karlsruhe, Germany

Изготовлены и исследованы планарные джозефсоновские субмикронные S-N-S и S-N/F-S структуры Al-Cu-Al и Al-Cu/Fe-Al, соответственно. Показано, что при понижении температуры джозефсоновские вольтамперные характеристики мостиков Al-Cu-Al становятся гистерезисными, несмотря на высокую прозрачность SN-границ. В резистивной части ВАХ S-N-S перехода наблюдаются особенности, связанные с эффектом многократного андреевского отражения и эффектом близости, была исследована подщелевая структура в зависимости от длины мостика. В S-N/F-S переходах впервые был обнаружен джозефсоновский сверхпроводящий ток и исследована его зависимость от температуры и геометрических параметров мостиков. В дифференциальном сопротивлении как функции напряжения смещения S-N/F-S мостиков были обнаружены особенности в виде раздвоенного пика при напряжениях, соответствующих минищели, которые объясняются наведенной спиновой поляризацией в слое нормального металла из-за близости с ферромагнетиком.

Свойства джозефсоновских гетероструктур Nb/ α -Si/Nb и Nb/ α -Si/Nb/ α -Si/Nb с различной степенью легирования α -Si прослойки.

А.Л. Гудков¹, М.Ю. Куприянов²

¹ЗАО "Компэлст", 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 6,
ФГУП "НИИФП им. Ф.В. Лукина", Россия, super.gal50@yandex.ru

²НИИЯФ им. Д.В. Скобельцина, 119992, г. Москва, Ленинские горы,
МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия.

Проведено исследование свойств планарных джозефсоновских гетероструктур Nb/ α -Si/Nb и Nb/ α -Si/Nb/ α -Si/Nb с различной степенью легирования прослойки из аморфного кремния с целью определения механизма транспорта тока в переходах данного типа. В качестве легирующей примеси использован вольфрам. Описан процесс изготовления планарных переходов и показана их структура. Представлены результаты измерений зависимостей критического тока переходов от температуры и их сравнение с теоретическими моделями джозефсоновских переходов различных типов (SIS, SINIS, SNS). Представлены ВАХ Nb/ α -Si/Nb переходов с различной концентрацией W в α -Si прослойке и их вид под воздействием внешней частоты до 75 ГГц. Проведено сравнение резистивных участков ВАХ с теорией для случая транспорта тока с участием процессов упругого и неупругого резонансного туннелирования через примесные центры. Дано объяснение в изменении формы ВАХ от избытка нормального тока к недостатку тока при уменьшении концентрации W в α -Si прослойке.

В результате проведенных исследований установлено, что с увеличением концентрации W в α -Si происходит переход от структур с туннельным типом проводимости к переходам с внутренним шунтированием, возникающим благодаря образованию каналов неупругого резонансного туннелирования для нормальных электронов. Одновременно в прослойке образуются и дополнительные к туннельным пути прохождения сверхпроводящего тока по квазиодномерным каналам с металлической проводимостью. При этом рост концентрации W сопровождается увеличением числа таких каналов, а не увеличением проводимости отдельно взятого канала.

Учитывая ряд уникальных свойств исследованных джозефсоновских переходов, в том числе связанных с большой длиной волны де Бройля электронов в α -Si прослойке, и занимающих промежуточное положение между переходами SNS типа и SIS типа, а также учитывая тот факт, что транспорт тока осуществляется исключительно за счет примесей в полупроводниковой прослойке данный тип переходов по аналогии с переходами SNS типа обозначен джозефсоновскими переходами **SDS** (superconductor – doped or degenerate semiconductor – superconductor) типа.

Показано, что разработанные джозефсоновские переходы Nb/ α -Si/Nb выгодно отличаются от других типов джозефсоновских переходов, как по своим свойствам, так и технологически. Меняя концентрацию примеси в α -Si прослойке в пределах от 6 % до 11 % и варьируя площадь перехода можно получить планарные джозефсоновские переходы с требуемыми характеристиками для любых практических применений. На основе гетероструктуры Nb/ α -Si/Nb/ α -Si/Nb сформированы и исследованы стеки джозефсоновских переходов. Показано влияние толщины промежуточного Nb электрода на характеристики стеков.

Электронные свойства сверхпроводников с межзонно-внутризонным типом спаривания.

А.В. Бурмистрова, С.В. Бакурский, И. А. Девятков

НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына,
МГУ имени М.В.Ломоносова, Российская Федерация, igor-devyatov@yandex.ru

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в железосодержащих пниктидах [1] возобновило интерес к исследованию необычных видов сверхпроводящего спаривания. Численные расчеты, учитывающие симметрию кристаллической решетки пниктидов [2, 3], показали, что данные материалы являются многозонными металлами с межорбитальными сверхпроводящими корреляциями и межорбитальной гибридизацией, приводящей как внутризонному, так и с межзонному спаривания. Предлагаемая в работах [2, 3] теоретическая модель межзонно-внутризонного сверхпроводящего спаривания не противоречит популярной $s\pm$ модели симметрии параметра порядка [4], а является ее обобщением, учитывающим межорбитальную гибридизацию.

В данной работе теоретически рассмотрены электронные свойства сверхпроводников с учетом как внутризонного, так и межзонного спаривания. Рассчитана температурная зависимость параметра порядка пространственно - однородного сверхпроводника с межзонно - внутризонным типом спаривания. Теоретически рассмотрен электронный транспорт через границу нормального металла и двухзонного сверхпроводника с межзонно - внутризонным типом спаривания.

1. Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, J. Am. Chem. Soc. 130, 3296 (2008).
2. A. Moreo, M. Daghofer, A. Nicholson, and E. Dagotto, Phys. Rev. B 80, 104507 (2009).
3. A. Moreo, M. Daghofer, J.A. Riera, and E. Dagotto, Phys. Rev. B 80, 104507 (2009).
4. I. I. Mazin, D. J. Singh, M. D. Johannes, and M. H. Du, Phys. Rev. Lett. 101, 057003 (2008).

Триpletная сверхпроводимость MgB_2 - $(\text{La,Sr})\text{MnO}_3$ нанокompозита

В.Н. Криворучко, В.Ю. Таренков

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины,
ул. Р. Люксембург 72, 83114 Донецк, Украина, krivoruc@gmail.com

Исследованы сверхпроводящие свойства нанокompозитов, полученных смешиванием наноразмерных ($\sim 20\text{nm}$) частиц ферромагнитного манганита $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ (LSMO) и низкотемпературного сверхпроводника MgB_2 . Для систем с разным весовым соотношением MgB_2 :LSMO (1:1, 3:1 и 4:1) обнаружено несколько принципиальных особенностей в магнитных и транспортных свойствах. При температуре сверхпроводящего перехода MgB_2 $T_c = 39\text{K}$ наблюдается резкое падение сопротивления объемных образцов всех составов. Композиты состава 3:1 и 4:1 переходят в сверхпроводящее состояние с $T_c = 20\text{K}$. Композит состава 1:1 остается в резистивном состоянии во всем исследованном интервале температур.

Методами точечной Андреевской спектроскопии исследованы энергия сверхпроводящего спаривания и плотность одночастичных состояний вблизи поверхности Ферми композитов состава 3:1 и 4:1. При малых напряжениях в ВАХ контактов наблюдается избыточный ток и удвоение проводимости контактов. Для всех исследованных контактов, пики в проводимости соответствуют сверхпроводящему состоянию с тремя энергиями спаривания. Две из трех энергий связи идентифицированы как усиленные эффектом близости Δ_π и Δ_σ энергии спаривания MgB_2 . Третья энергия связи, Δ_{tr} , более чем в три раза превышает наибольшую щель, Δ_σ , MgB_2 и ее происхождение не удается объяснить в рамках традиционных моделей сверхпроводящего эффекта близости.

Полученные результаты указывают на новый характер эффекта близости в гетероструктурах ферромагнитный манганит – сверхпроводник s -типа. Предполагается, что в рассматриваемых системах установление сверхпроводящего состояния в результате эффекта близости идет по сценарию восстановления фазовой когерентности газа электронных пар. Т.е., предполагается, что, при достаточно низких температурах, спин-триpletные сверхпроводящие флуктуации (пары) с энергией связи Δ_{tr} исходно существуют в LSMO. Однако, из-за отсутствия фазовой когерентности конденсата, манганит не проявляет макроскопических сверхпроводящих свойств. Благодаря эффекту близости с MgB_2 фазовая когерентность электронных пар в LSMO восстанавливается, что в свою очередь («обратный» эффект близости) приводит к усилению сверхпроводящего состояния MgB_2 .

Эффект близости в SFF и SNF структурах
Т. Ю.Карминская¹, М.Ю.Куприянов¹, А.А.Голубов².

¹ **НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, МГУ имени М.В.Ломоносова, Российская Федерация**

² **Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute of Nanotechnology, University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands**

В настоящее время имеется значительный интерес к структурам, состоящим из сверхпроводящего (S) и ферромагнитного (F) слоев. Возможность π -состояний в SFS джозефсоновских переходах из-за осцилляционного характера сверхпроводящих корреляций индуцированных в ферромагнетик была предсказана теоретически, и их существование было убедительно продемонстрировано экспериментально [1] - [3]. Помимо этого, было предсказано, что в джозефсоновских структурах с несколькими ферромагнитными слоями можно реализовать π -состояния даже в случае, когда F-слои настолько тонки, что пространственные осцилляции параметра порядка не могут быть реализованы. Этот эффект обязан своим существованием проскальзованию фазы на SF границах с конечной прозрачностью. Он был предсказан в [4] для SFIS переходов, в которых два SF-бислоя отделены друг от друга от изолирующим барьером «I». В этом случае фазовые сдвиги $\delta\phi$ имеют место на каждом из SF интерфейсов, причем $\delta\phi$ стремится к $\pi/2$ с увеличением обменного поля. В результате, общий сдвиг фаз на переходе оказывается равным π .

В последнее время большое внимание привлекли структуры, в которых со сверхпроводником связаны два F-слоя (FSF или SFF). Такие объекты могут служить в качестве сверхпроводящих спиновых вентилях, в которых температура перехода контролируется углом α между направлениями намагниченности F-слоев [5]. SFF структуры с полностью прозрачными интерфейсами изучались теоретически в [6], где было показано, что критическая температура в таких трехслойках может быть немонотонной функцией угла α .

Целью данной работы является исследование влияния прозрачности интерфейсов и триплетных корреляций на эффект близости в SFF и SNF структурах. Нами будет показано, что проскальзование фазы на интерфейсах приводит к ряду новых своеобразных явлений, в том числе к аномальной зависимости от α амплитуды медленно спадающей в пространстве триплетной компоненты. В отличие представлений, основанных на анализе симметричных FSF или SFFS структур, амплитуда этой триплетной компоненты достигает максимума не в непосредственной близости от $\alpha = \pi/2$ и может быть даже нулевой для этой конфигурации векторов намагниченности. Мы покажем, как эти новые эффекты проявляются в реализации 0- π перехода в туннельных SFFIS структурах.

Отдельное внимание будет уделено последним результатам, полученным в SNF-NF-FNS структурах: эволюции плотности состояний, влиянию на критический эффект, обусловленных двумерным характером распределения в них плотности сверхтока.

Работа велась при финансовой поддержке гранта РФФИ 11-02-12065-офи-м.

- [1] A.A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, and E. Il'ichev, *Rev. Mod. Phys.*, **76** (2004) 411.
- [2] A.I. Buzdin, *Rev. Mod. Phys.*, **77**, (2005) 935.
- [3] F.S. Bergeret, A. F. Volkov, K. B. Efetov, *Rev. Mod. Phys.*, **77** (2005) 1321.
- [4] A.A. Golubov, M.Yu.Kupriyanov and Ya.V. Fominov, *JETP Letters*, **75** (2002) 190.
- [5] P.V. Leksin, N.N. Garif'yanov, I.A. Garifullin, , *et al. Phys. Rev. Lett.*, **106** (2011) 067005.
- [5] Ya.V. Fominov, A.A. Golubov, T.Yu. Karminskaya, *et al.*, *Pis'ma v ZhETF* **91**, (2010) 329.

Взаимодействие джозефсоновских вихрей и мод Легетта в многозонных сверхпроводниках

В.В. Курин

ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия, kurin@ipm.sci-nnov.ru

Исследовано возбуждение мод Легетта вихрями, движущимися в распределенном джозефсоновском переходе между многозонными сверхпроводниками, такими как MgB_2 и сверхпроводниками на основе FeAs. В рамках гидродинамического описания получено модифицированное уравнение синус Гордона, описывающее джозефсоновские вихри и линейные волны. На основании полученного уравнения проанализированы дисперсионные свойства поверхностных Легеттовских мод, структура вихрей и процессы излучения волн движущимися вихрями.

Некоторые экспериментальные проблемы физических измерений при низких температурах

A.Lukashenko, J.Lisenfeld, G.J.Grabovskij and A.V.Ustinov

Karlsruhe Institute of Technology, D-76128 Karlsruhe, Germany, oleksandr.lukashenko@kit.edu

Сверхпроводящий кубит является одной из наиболее перспективных систем для реализации квантового компьютера. Основное внимание экспериментаторов в настоящее время уделяется увеличению времени когерентности кубитов, которое ограничивается слабой, но не пренебрежимо малой связью с окружением.

Поэтому, наряду с улучшением технологии изготовления сверхпроводящих кубитов (материал и качество сверхпроводящей пленки, подложки, диэлектрического барьера джозефсоновского контакта, и т.д.), для увеличения времени когерентности кубитов необходимо тщательно экранировать образцы и фильтровать измерительную схему.

В работе кратко представлены последние результаты группы по исследованию сверхпроводящих кубитов.

Основное внимание уделено организации схемы измерений, а также применяемым в эксперименте аттенюаторам, токовым делителям и фильтрам нижних частот. Подробно описана методика изготовления гибридных порошковых фильтров и представлены их электрические характеристики. Показано, что такие фильтры не меняют своих характеристик при многократном термоциклировании от 300К до 20mK и герметичны при низких температурах.

Сверхпроводимость в 2D электронных системах, индуцированная за счет эффекта близости.

А.С.Мельников¹ и Н.Б.Копнин²

¹Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, melnikov@ipm.sci-nnov.ru

Развита теоретическое описание сверхпроводимости, наведенной в низкоразмерных системах (2D электронный газ, слои графена, тонкие пленки или проволоки нормального металла) за счет эффекта близости с массивным сверхпроводящим электродом. Использованный подход основан на модели Фано-Андерсона, описывающей распад локализованного состояния за счет взаимодействия с некоторым резервуаром. В качестве простейших задач, иллюстрирующих эффективность развиваемого нами подхода, нами выбраны следующие: (1) сопротивление границы нормальный 2D газ - 2D газ с индуцированной сверхпроводимостью; (2) джозефсоновский транспорт между двумя областями 2D газа с наведенной сверхпроводимостью. Показано, что наведенная щель в спектре возбуждений 2D системы существенно определяется вероятностью туннелирования между сверхпроводящим электродом и 2D системой. Вычислены различные транспортные характеристики таких систем с наведенной сверхпроводимостью, проанализированы особенности джозефсоновского транспорта и вольт-амперных характеристик. Обнаружены два типа щелевых особенностей на ВАХ и нетривиальное поведение ток-фазовых характеристик.

Спин-поляризованный транспорт зарядов в гетероструктурах ферромагнетик-сверхпроводник.

Э. М. Руденко

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

[*Max@imp.kiev.ua](mailto:Max@imp.kiev.ua), rudenko@imp.kiev.ua

Изучение особенностей зарядового и спинового транспорта в планарных многослойных структурах, образованных ферромагнетиками (F) и сверхпроводниками (S), представляет существенный интерес для спинтроники. Нами экспериментально исследованы особенности поведения сверхпроводника под действием туннельного спин-поляризованного тока инжекции. С этой целью мы изучали вольтамперные характеристики (ВАХ) $I(V)$ двойных туннельных контактов двух типов: $F-I-S-I-S$ и $S-I-S-I-S$, где I - тонкий слой изолятора. В качестве F мы использовали ферромагнитные плёнки полуметалла Co_2CrAl , сверхпроводника - плёнки Pb .

Двойные контакты $F-I-S-I-S$ изготавливались последовательным напылением плёнки Co_2CrAl и Pb . Ферромагнитные плёнки Co_2CrAl толщиной около 100 нм напылялись на сапфировую подложку методом вспышки. Естественный оксид на поверхности плёнки Co_2CrAl , который использовался в качестве туннельного барьера, формировался посредством окисления пленки Co_2CrAl около одного часа в лабораторных условиях. Верхняя плёнка Pb толщиной около 60 нм наносилась путем термического напыления. Далее этим же методом наносилось олово (Sn), которое в последующем окислялось на протяжении полутора часа и формировало второй изоляционный барьер. Последней наносилась верхняя пленка Pb толщиной около 100 нм. Выбирая время окисления, мы получали низкоомный контакт генератора $F-I-S$ типа и высокоомный детектора $S-I-S$ типа. Для сравнения исследовался также двойной контакт $S-I-S-I-S$ типа, в которых генератором и детектором служили $S-I-S$ переходы. При изменении напряжения смещения на генераторе до значения $\approx 0,4\text{ мВ}$ на ВАХ детектора наблюдалось незначительное изменение энергетической щели свинца Δ_{Pb} . При напряжении смещения $\approx 0,6\text{ мВ}$ на ВАХ генератора $F-I-S$ появлялся участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, а на ВАХ детектора наблюдалось существенное изменение Δ_{Pb} . Когда спин-поляризованный ток инжекции (СПТИ) достигал некоторого критического значения, на ВАХ генератора происходило резкое увеличение напряжения, а на плёнке Pb возникало резистивное состояние. На ВАХ детектора мы продолжали фиксировать сверхпроводящую энергетическую щель. Таким образом, под действием СПТИ в сверхпроводнике может возникать спин-поляризованное неоднородное состояние, имеющее сверхпроводящие и резистивные области. При увеличении СПТИ величина энергетической щели в этих сверхпроводящих областях уменьшается, стремясь к нулю. Такое поведение щели не соответствует выводам теории [1] для обычной, не спин-поляризованной токовой инжекции, в соответствии с которой величина Δ сверхпроводящей области в неоднородном состоянии должна сохраняться.

Исследования наших контактов $F-I-S-I-S$ типа показали, что для получения изменения Δ сверхпроводника Pb , аналогичные изменению в $S-I-S-I-S$ контакте требуется на два порядка меньшая сила туннельного источника спин-поляризованного тока.

Величина тока, при котором в контакте $F-I-S-I-S$ возникает резистивное состояние, значительно меньше, чем в случае обычной (не спин-поляризованной) туннельной токовой инжекции.

Таким образом, в настоящей работе получены новые экспериментальные данные об особенностях поведения сверхпроводника под воздействием спин-поляризованной туннельной токовой инжекции.

1. В. Ф. Елесин, В. Э. Кондратов, А. С. Сухих, ФТТ, **21**, 03226(1979)

Свойства джозефсоновских переходов в неоднородном поле ферромагнитных частиц

А. В. Самохвалов

Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, samokh@ipm.sci-nnov.ru

В докладе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований гибридных структур ферромагнетик-сверхпроводник, состоящих из короткого джозефсоновского перехода, помещенного в неоднородное поле ферромагнитных частиц. Обнаруженная в такой гибридной системе сильная зависимость критического тока контакта от намагниченности частиц однозначно свидетельствуют о формировании в переходе неоднородного распределения джозефсоновской разности фаз. Исследованы эффекты соизмеримости, возникающие при совпадении периодов модуляции джозефсоновского тока полем магнитных частиц и характерным масштабом изменения разности фаз внешним магнитным полем. Предложена модель, объясняющая сильное влияние частиц на критический ток контакта образованием в сверхпроводящем электроде пар вихрей Абрикосова противоположного направления, индуцированных магнитным полем частиц, и выполнены расчеты соответствующего распределения разности фаз в переходе. Изучено влияние такой контролируемой мелкомасштабной фазовой модуляции на критический ток контакта и на соотношение между плотностью джозефсоновского тока и разностью фаз на переходе. Показано, что равновесное значение разности фаз φ_0 , которое устанавливается в контакте при отсутствии внешнего тока через переход и соответствует минимуму энергии Джозефсона, зависит от положения вихрей в электродах контакта, т.е. от намагниченности частицы. Сильная зависимость тока через переход от магнитного состояния частицы означает возможность эффективного управления параметрами джозефсоновского контакта магнитным полем частиц в такой гибридной системе.

Особенности линий проскальзывания фазы в ультратонких плёнках NbN

Сиваков А. Г., Михайлов М. Ю., Похила А. С., Глухов А. М.

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины,
г. Харьков, Украина, sivakov@ilt.kharkov.ua

Гольцман Г. Н.

Московский педагогический государственный университет, г. Москва, Россия

Исследованы вольтамперные характеристики ультратонких ($d = 4$ nm) плёнок NbN в широком диапазоне температур (до $0,3T_c$) и токов, до выхода образцов в нормальное состояние. Показано, что при больших плотностях транспортного тока вблизи T_c механизм резистивности связан с образованием линий проскальзывания фазы (ЛПФ), которые с понижением температуры из-за увеличения плотности тока и развития тепловой неустойчивости переходят в нормальные тепловые домены. Процесс фазового «расслоения» транспортного тока на нормальную и сверхпроводящую компоненты с образованием ЛПФ, возникновение отдельных ЛПФ и нормальных доменов и их динамика при увеличении тока провизуализированы с помощью низкотемпературного сканирующего лазерного микроскопа. Выявлены особенности поведения ЛПФ в ультратонких пленках, связанные с большими значениями R_{\square} , малыми длинами когерентности и характерными тепловыми временами и длинами. В частности, обнаружено, что при падении напряжения на ЛПФ, превышающем характерное напряжение сверхпроводящей щели, могут образовываться «многоквантовые» ЛПФ, в которых в неравновесной области, связанной с диффузией квазичастиц, существует несколько динамических областей с осцилляциями параметра порядка. Обсуждаются некоторые прикладные аспекты использования свойств ЛПФ в сверхпроводниковой электронике.

Параметр разрушения куперовских пар в гетероструктурах $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$

Д. А. Соломаха, Э. М. Руденко, А. А. Краковный, М. В. Дякин

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульвар. акад. Вернадского, 36, 03680, Киев-142, Украина
dasolomakha@gmail.com

Одним из актуальных направлений исследований является изучения эффекта близости на границе нормальный металл - сверхпроводник (NS) – эффект подавления энергетической щели в сверхпроводнике и её наведения в нормальном металле. Также в физике за последние десятилетия большой интерес представляет изучение комбинации явлений ферромагнетизма и сверхпроводимости ввиду наличия множества уникальных эффектов. Поэтому важно исследовать применение ферромагнитных материалов в туннельных контактах.

Настоящая работа посвящена изучению влиянию ферромагнетика на сверхпроводник в туннельных контактах ферромагнетик-изолятор-сверхпроводник $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$ (FIS).

Было обнаружено, что при использовании ферромагнетика Co_2CrAl (F) в качестве источника практически 100% спин-поляризованного тока наблюдается ряд явлений, таких как неравновесная сверхпроводимость, блокировка тока, эффект близост. Причем все эффекты проявлялись в гораздо большей мере и порой иным образом, чем в обычных NIS контактах. Для понимания физики явлений было решено разделить эти эффекты и исследовать их по отдельности

Туннельный контакт $\text{Co}_2\text{CrAl-I-Pb}$ создавался следующим образом. На сапфировую подложку напылялась плёнка Co_2CrAl . Это ферромагнитный сплав полуметалла Гейслера с почти 100% спиновой поляризацией на уровне ферми. После окисления в качестве сверхпроводника напылялась плёнка свинца. Изучались вольтамперные характеристики (ВАХ) туннельных контактов при температуре 4.2К.

Исследовались туннельные контакты с удельным сопротивлением барьера $\sim 10^{-4}$ Ом·см². При таком сопротивлении плотность тока через контакт составляла $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ А/см² и не вызывала неравновесных эффектов. В тоже время, несмотря на наличие туннельного барьера наблюдается эффект близости в отличии от контактов типа (NIS), где наличие небольшого барьера практически уничтожает этот эффект.

Для описания наблюдаемых в контактах явлений была использована модель Фулде [1,2] бесщелевой сверхпроводимости с параметром разрушения Z куперовских пар. Были рассчитаны плотности состояний на границе сверхпроводника с барьером в зависимости от Z (которые отличались от плотности состояний по теории БКШ) и по ним рассчитаны ВАХ, которые хорошо описывали полученные экспериментально ВАХ. Следует отметить, что в наших экспериментах определяется плотность состояний квазичастиц непосредственно на границе F/S. В экспериментах [1] использовался контакт-детектор, который давал информацию с внешней стороны сверхпроводящего электрода.

Можно добавить, что контакты такого типа могут в перспективе быть использованы в сверхпроводниковой спинтронике, в качестве чувствительных детекторов полей и излучений и т. д.

1. Туннельные явления в твердых телах / Ред. Э. Бурштейн, С. Лундквист. — М.: Мир, 1973. — 387 с.
2. Fulde, Phys. Rev. 137, A783 (1965).

**Аномальный поверхностный импеданс в случае сверхпроводимости,
нечётной по частоте**

Y. Asano¹, A.A. Golubov², Я.В. Фоминов³, Y. Tanaka⁴

¹Department of Applied Physics and Center for Topological Science & Technology, Hokkaido University, Japan

²Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute of Nanotechnology, University of Twente, Enschede, The Netherlands

³Институт теоретической физики им. Л.Д.Ландау РАН, Черногловка, Россия,
fominov@landau.ac.ru

⁴Department of Applied Physics, Nagoya University, Nagoya, Japan

Рассмотрен динамический отклик нечётных по частоте куперовских пар на электромагнитное поле. Вычислен поверхностный импеданс ($Z = R - iX$) тонкой плёнки из нормального металла, покрывающей триплетный сверхпроводник. В противоположность обычному соотношению $R \ll X$, поверхностный импеданс в спин-триплетных системах с эффектом близости демонстрирует аномальное поведение (т.е. $R > X$) при низких температурах. Это необычное соотношение является результатом проникновения в нормальный металл нечётных по частоте сверхпроводящих корреляций и отражает отрицательную плотность куперовских пар (т.е. противоположный обычному знак связи между сверхтоком и векторным потенциалом).

Джозефсоновские одно- и двухбарьерные гетероструктуры с разными функциями распределения прозрачностей.

В. Е. Шатерник

Институт металлофизики НАН Украины г. Киев, shaternik@mail.ru

Обсуждаются два универсальных эффекта в туннельных характеристиках слоистых структур металл – изолятор – металл, в которых диэлектрический барьер сформирован наноразмерной разупорядоченной пленкой оксида: (1) универсальное распределение прозрачностей такого слоя, не зависящее от конкретных микроскопических характеристик, и (2) изменение дифференциальной проводимости таких гетероструктур с напряжением по степенному закону с показателем степени, близким к 1.33.

Приводятся экспериментальные результаты для сверхпроводящих гетероструктур с неоднородными туннельными барьерами, подтверждающие существование универсального распределения их прозрачностей, и его простая теоретическая интерпретация, основанная на гипотезе о равномерном произведении высоты барьера на путь, который электрон проходит внутри него. Показано, что с ростом толщины дефектного слоя изолятора доминирующим механизмом проводимости становится неупругое туннелирование с испусканием бозонных возбуждений, в результате чего зависимость дифференциальной проводимости от напряжения приобретает степенной характер с показателем степени, который характеризует число локализованных внутри барьера состояний, вовлеченных в процесс переноса заряда сквозь него. Показано, что для материалов с фоновой плотностью состояний, которая слабо зависит от энергии, показатель степени 1.33 соответствует прыжковой туннельной проводимости с участием двух дефектных состояний.

КУБИТЫ, КУТРИТЫ, КАУПЛЕРЫ И КВАНТОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАТИКИ

В. И. Шнырков

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины,
г. Харьков, Украина, shnyrkov@ilt.kharkov.ua

Рассмотрены модифицированные потоковые кубиты, с большим ($\Delta E / k_B = \hbar\Omega / k_B \approx 2K$) расщеплением между суперпозиционными уровнями энергии при достаточно высоком $\Delta U \approx 2K$ потенциальном барьере. Это практически полностью защищает динамику кубита от ошибок связанных с тепловым распадом ($\sim \exp(-\Delta U / k_B T)$) при обычных температурах ($T \approx 10mK$). Показано, что такое увеличение скорости туннельного обмена энергией (по сравнению с потоковыми кубитами с SIS контактами) между отдельными состояниями в основном связано с формой (квантовым действием) потенциального барьера в сверхпроводящем контуре, замкнутом ScS контактом.

При создании 3-х ямного потенциала большие скорости обмена энергией в кольце, замкнутом ScS контактом приводят к суперпозиции 3-х состояний т. е. кутрита, — элемента с тремя суперпозиционными уровнями энергии. Найдено, что зависимость квантовой индуктивности основного (нижнего) уровня энергии суперпозиционного состояния кутрита от внешнего магнитного потока Φ_e является осциллирующей знакопеременной функцией Φ_e . Предлагается использовать это свойство основного суперпозиционного уровня кутрита для создания управляемой знакопеременной магнитной связи между двумя удаленными друг от друга кубитами в небольшом ($N < 10$) квантовом регистре.

Экспериментально показано, что большие расщепления уровней в кубитах/кутритах с ScS контактами ($\Omega / 2\pi \approx 35 - 40$ ГГц) позволяют выполнить жесткие адиабатические условия $\hbar\omega \ll \hbar\Omega \ll \Delta_{Nb}(0)$ на скорость изменения потенциальной энергии в электромагнитном поле с частотами $\omega / 2\pi = 1 - 2$ ГГц и создать новый сверхпроводящий кубит детектор (СКУБИД). С точки зрения квантовой информатики обсуждаются ВЧ ВАХ, сигнальные и шумовые характеристики СКУБИДов и вопросы построения квантовых измерений с практически идеальным (без квазичастичного тока) параметрическим детектором. Кроме того, рассмотрены НЕМТ усилители ($K = 10dB, f_{max} \approx 0.5$ ГГц, $\Delta f = 10\% f_{max}$) с субмикроваттной потребляемой мощностью предназначенные для работы с ВЧ СКУБИДами в области 30—40 мК стандартного рефрижератора растворения с $T = 10$ мК.