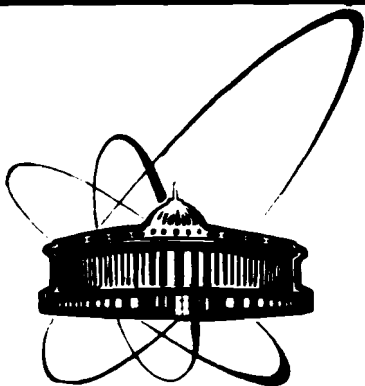


89-587



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

8 197

D13-89-587

Б.В.Васильев, В.Н.Полушкин, С.В.Учайкин,
С.П.Штанько

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ КОНТАКТОВ
ИЗ $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

Направлено в журнал "Superconductor Science
and Technology"

1989

Введение

Высокотемпературная сверхпроводимость открывает исключительно широкие возможности для развития сверхпроводниковой электроники. Это связано прежде всего с тем, что вместо дорогостоящего жидкого гелия используется доступный и не создающий больших неудобств в работе жидкий азот. Центральным элементом сверхпроводниковых электронных устройств является джозефсоновский переход. На основе джозефсоновских переходов могут быть построены высокочувствительные датчики магнитного поля - сквиды, стандарты напряжения, стробоскопические преобразователи, детекторы слабого электромагнитного излучения, быстродействующие аналого-цифровые преобразователи и т. д. В частности, в нашей лаборатории были созданы сверхпроводящие квантовые интерферометры с разрешением по энергии $\sim 5 \cdot 10^{-28}$ Дж/Гц при $T=78\text{K}$ [1], которое практически не уступает энергетическому разрешению низкотемпературных коммерческих интерферометров, работающих при $T=4,2\text{K}$. Для того, чтобы оценить перспективы дальнейшего совершенствования названных устройств, важно внимательно изучить характеристики и динамику поведения автономных джозефсоновских контактов. Причём контакты должны иметь конфигурацию и основные параметры, близкие к тем, которые необходимы для практических устройств: например, значение критического тока единицы - десятки микроампер, т. к., учитывая гранулированную природу высокотемпературных сверхпроводников, поведение контактов с малым и большим I_c должно значительно отличаться. Интересной задачей является исследование переходов на границе именно двух зёрен. В настоящей работе мы предприняли попытку комплексного подхода к данным задачам: подробно изложили технологию приготовления высококачественной керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, способ формирования джозефсоновских переходов,

применяемую нами технику при измерении основных характеристик, полученные характеристики и их анализ.

Технология приготовления керамики

Металлооксидная керамика, предназначенная для изготовления практических сверхпроводящих квантовых интерферометров, должна удовлетворять ряду жёстких требований:

-долговременной стабильностью основных параметров при многократных термоциклированиях от температуры жидкого азота до комнатной температуры и обратно;

-устойчивостью к воздействию окружающей среды;

-высокой плотностью критического тока ($>150 \text{ А/см}^2$);

-критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние, существенно превышающей температуру жидкого азота.

Все указанные свойства сверхпроводника определяются его фазовым и зерновым составом, кристаллической структурой и суммарной площадью прочных контактов между отдельными сверхпроводящими зёрнами. Для изготовления интерферометров и одиночных джозефсоновских контактов использовали керамику на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, которую получали путём двукратного обжига стехиометрической смеси оксидов иттрия и меди и пероксида бария. Предварительный обжиг смешанных и измельчённых исходных веществ проводили при 1223К в течение трёх часов. Полученное соединение измельчали и прессовали в прямоугольные брикеты размером $27 \times 6 \times 2 \text{ мм}$. Спекание брикетов осуществляли при температуре 1233К в течение 18 часов, затем печь медленно охлаждали до 723К. При этой температуре брикеты в течение 15 час отжигали в токе кислорода, после чего печь охлаждали до комнатной температуры. Спечённую керамику хранили в защитной атмосфере.

Плотность керамики измеряли гидростатическим взвешиванием. Фазовый состав полученных образцов контролировали рентгенофазовым анализом на дифрактометре ДРОН-3М (CuK_α -излучение).

Основные характеристики ВТСП оксидной

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ керамики

Поверхность излома полученных керамических образцов анализировали с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840. На рис.1 представлена фотография микроструктуры скола образца ВТСП. Видно, что керамика представляет собой крупные кристаллиты ($10 \div 40 \mu\text{м}$) с ярко выраженной огранкой. Следует отметить, что большая часть пор заключена в основном внутри больших зёрен. Для керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, имеющей подобную структуру, характерны высокие значения критической температуры T_c с узким резистивным переходом.

Плотность этих образцов составила 97% от рентгеновской. Неоптимальный режим окислительного спекания приводит к образованию слоистой пористой структуры с небольшой плотностью. Начальное удельное сопротивление (рис.2) подобных образцов имеет более высокое значение, хотя критическая температура и ширина резистивного перехода практически не изменяются.

Методика приготовления стабильных джозефсоновских контактов

Реально размер джозефсоновских контактов составляет единицы мкм. Сам контакт образуется в месте соприкосновения двух зёрен. В связи с этим ясно, что такой контакт не может нести никаких механических нагрузок. Наклеивание контактов на диэлектрические подложки не дало положительных результатов. При охлаждении от комнатной температуры до температуры жидкого азота параметры таких контактов либо резко изменялись, либо они чаще всего разрушались совсем. В таком случае не удаётся получить повторяемости результатов.

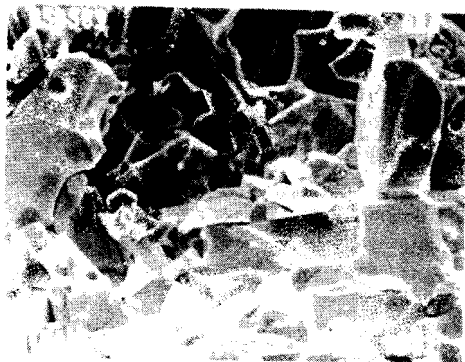


Рис. 1. Фотография микроструктуры скола образца ВТСП.

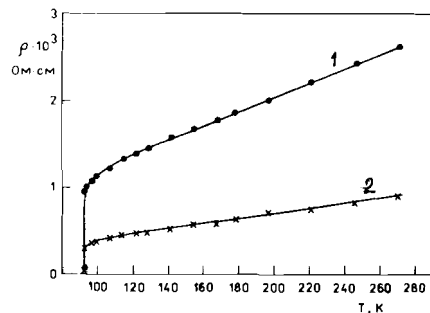


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления массивного образца керамики от температуры.

Кривая 1 соответствует керамике с плотностью $d=6,03 \text{ г/см}^3$
 Кривая 2 соответствует керамике с плотностью $d=5,3 \text{ г/см}^3$.

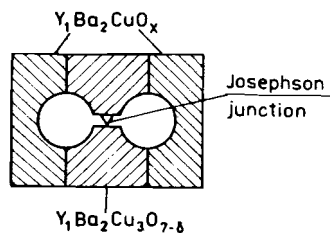


Рис. 3. Конфигурация стабильного джозефсоновского контакта.

Были изготовлены стабильные джозефсоновские контакты, конфигурация которых показана на рис. 3. Для этого была приготовлена трёхслойная таблетка диэлектрик-сверхпроводник-диэлектрик. При этом диэлектрик изготовлен из тех же компонент, что и сверхпроводник, только в другом стехиометрическом составе - Y_2BaCuO_x . Эта диэлектрическая фаза спекается при тех же условиях, что и сверхпроводящая. Коэффициенты линейного расширения обеих фаз одинаковы. Измерения показали, что такие характеристики, как, например, зависимость критического тока от температуры, остаются неизменными при многократном термоциклировании от комнатной температуры до температуры жидкого гелия и обратно.

Методика измерения. Техника эксперимента

Наиболее интересны исследования джозефсоновских контактов с такими значениями основных параметров, которые необходимо обеспечить в реальных измерительных устройствах. Как правило, эти значения невелики. Так, например, в ВТСП-сквидах критический ток составляет единицы-десятки микроампер, нормальное сопротивление единицы Ом и характерное напряжение единицы микровольт. Для детального исследования таких джозефсоновских контактов требуется установка, обладающая высокой чувствительностью, стабильностью, помехоустойчивостью.

Измерение основных электрических параметров осуществлялось стандартным четырехточечным методом. При этом контактные площадки формировались тщательным втиранием индия. Контактное сопротивление в диапазоне температур от 4,2 до 300К не превышало 0,1 Ом. Для уменьшения влияния токоотводов токовые площадки были нанесены на торцах образца, а потенциальные площадки - в непосредственной близости от джозефсоновского перехода.

Изготовленная установка позволяла измерять следующие электрические параметры

- вольт-амперную характеристику (ВАХ),

- зависимости критического тока и нормального сопротивления от температуры в диапазоне от 4,2К до 300К,
- дифференциальное сопротивление от тока и напряжения.

Конструктивно образец с джозефсоновским переходом размещался в экранированной измерительной головке, закрепленной на конце штанги с размерами, позволявшими вести исследования в стандартных транспортных азотных и гелиевых дьюарах. В непосредственной близости от контакта находился датчик температуры (резистор ТВО). Тонкая подстройка температуры осуществлялась нагревателем из бифилярно намотанной на медный стержень марганциновой проволоки. Образец, термометр и нагреватель находились внутри соленоида, способного создавать однородное магнитное поле (0-100) эрстед для исследования осцилляций критического тока.

Функциональная электрическая схема токозадающей части установки приведена на рис. 4, измерительной части - на рис. 5.

С целью уменьшения влияния низкочастотных флуктуаций схемы и повышения помехоустойчивости использовался принцип преобразования типа модулятор-демодулятор. Для этого в задающей части предусмотрен переключатель тестирующего тока на транзисторе VT1 (модулятор). Г1-генератор пилообразного напряжения для визуального наблюдения ВАХ на экране осциллографа, Г2-генератор импульсов, управляющий VT1, блок Uo-источник опорного напряжения. Показанные ключи предназначены для выбора режимов работы и диапазонов измерения. Для обеспечения высокой чувствительности и глубокого подавления синфазной составляющей входного сигнала, большого входного сопротивления и температурной стабильности были использованы высококачественные микросхемы типа ОР-07 в дифференциальном включении. И-инвертор, СД-синхронный детектор, ФНЧ - фильтр нижних частот.

Основные рабочие характеристики установки:

- чувствительность усилителя 0,2мкВ,
- диапазон тестируемых токов 0-4 мА,
- коэффициент ослабления синфазного сигнала 100дБ,
- температурный дрейф напряжения смещения усилителя

0.5 мкВ/К.

- входной ток усилителя 2нА,
- частота модуляции 20Гц,
- полоса пропускания фильтра 2Гц.

Результаты эксперимента. Обсуждение результатов

Нами было исследовано более 20 одиночных контактов. Пример ВАХ и первой производной ВАХ показаны на рис. 6, 7 соответственно. Характерные изломы кривых и осцилляции критического тока от внешнего поля показали, что все обладали джозефсоновскими свойствами.

В таблице приведены параметры для трех групп контактов: с малым критическим током $I_c < 10$ мкА, средним критическим током $I_c \approx 50$ мкА, большим критическим током $I_c > 500$ мкА. Из таблицы видно, что контакты отличаются по всем параметрам: нормальному сопротивлению R_n , критическим токам I_c , размерами, различными исходными удельными сопротивлениями ρ и плотностью d материалов, за исключением критического значения напряжения V_c (19-20) мкВ. Если значение энергетической щели Δ , как показано в большинстве работ, например, [2,3], составляет единицы милливольт, то данные джозефсоновские контакты, образованные естественными межзеренными границами, представляют собой S-N-S контакты с высокопроводящим сильношунтирующим N-слоем.

Таблица

№	Параметры контакта				Параметры керамики			
	R_n, Ω	$I_c, \mu A$ $T=77K$	$V_c, \mu V$	размеры контакта	ρ рис. 2	d г/см ³	T_c К	ΔT_c К
1	2.1	10	21	10*5	кр.1	5.3	91.6	1.3
2	0.55	40	21	10*5	кр.1	5.3	91.6	1.3
3	0.035	560	19.5	15*15	кр.2	6.03	91.5	0.9

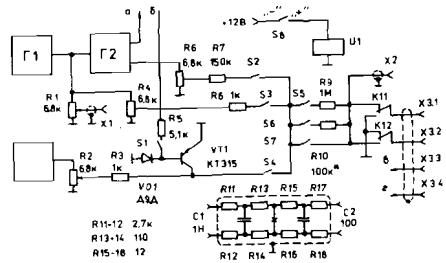


Рис. 4. Функциональная электрическая схема токозадающей части установки, для определения параметров джозефсоновских контактов.

- Г1-генератор пилообразного напряжения;
- Г2-генератор импульсов;
- U_0 -источник опорного напряжения;
- R11-R18, C1, C2-фильтры в измерительной головке, в которой расположен джозефсоновский контакт.

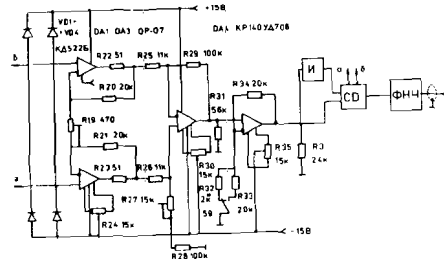


Рис. 5. Функциональная электрическая схема измерительной части установки для определения параметров джозефсоновских контактов.

- И -инвертор;
- СД -синхронный детектор;
- ФНЧ-фильтр нижних частот.

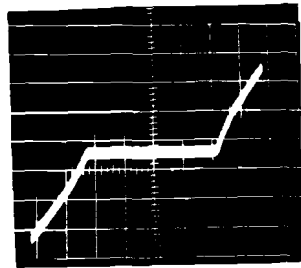


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика джозефсоновского контакта при $T=77\text{ K}$. $I_c(77\text{ K})=560\text{ }\mu\text{A}$.

Этот вывод подтверждает и металлический ход зависимости $\rho(T)$ рис. 2, и график зависимости критического тока от температуры, представленный на рис. 8. Кривая 1 построена по экспериментальным данным, кривая 2 - теоретическая $-I_c - (1-T/T_c)^{3/2}$, характерная для мостиков типа S-N-S. При $T \sim T_c$ наблюдается хорошее совпадение кривых. При $T < T_c$ критический ток контакта заметно превышает I_c , предлагаемый теоретической моделью, что, очевидно, вызвано наличием дополнительных межзеренных контактов, которые давали незначительный вклад в общее значение I_c при $T \geq 78\text{ K}$, а при $T \leq 78\text{ K}$ создают избыточную сверхпроводящую компоненту тока, которая поднимает $I_c(T)$.

Многие исследователи отмечают, что высокотемпературной сверхпроводящей керамике присущ избыточный низкочастотный магнитный шум, который явно проявляется в сверхпроводящих квантовых интерферометрах [4,5]. Естественно предположить, что этот шум связан с неравновесными процессами в гранулированной среде. Нам удалось в явном виде обнаружить эти процессы в джозефсоновском контакте.

На рис. 9 показан пример вольт-амперной характеристики джозефсоновского контакта без воздействия на него СВЧ-излучения.

Видно, что при увеличении тока через переход напряжение на нём увеличивается ступенями, при этом растёт крутизна характеристики, т.е. увеличивается нормальное сопротивление контакта. Это похоже на явление проскальзывания фазы [6,7].

Формирование локальных центров проскальзывания фазы может вести к появлению токовых флуктуаций в керамике, как за счёт ΔV , так и за счёт термоэлектрического эффекта от разогрева локальных объёмов вокруг центров проскальзывания фазы. Возможно, что именно они являются одним из источников избыточного $1/f$ шума в сверхпроводящих квантовых интерферометрах.

Первая производная вольт-амперных характеристик таких контактов может иметь особенности, похожие на те, которые создаются энергетической щелью. Возможно, что именно этим

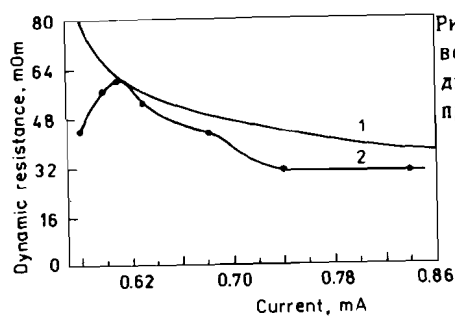


Рис. 7. Первая производная вольт-амперной характеристики джозефсоновского контакта при $T=77\text{K}$. $I_C(77\text{K})=560\mu\text{A}$.

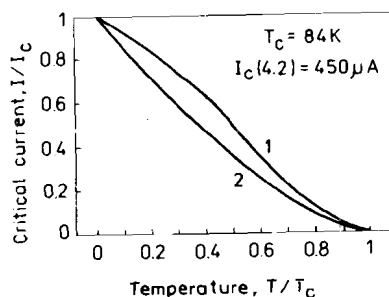


Рис. 8. Зависимость критического тока от температуры: кривая 1 построена по экспериментальным данным; кривая 2 соответствует теоретической модели $I_C \sim (1-T/T_C)^{3/2}$.

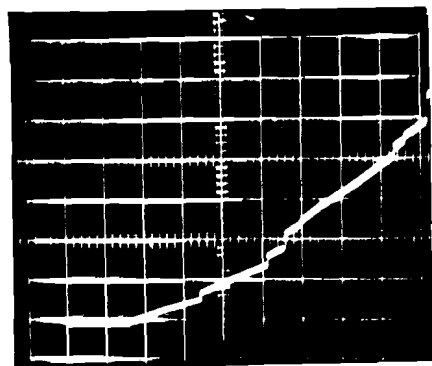


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика джозефсоновского контакта без воздействия на него СВЧ-излучения при $T=4.2\text{K}$. $I_C(77\text{K})=10\mu\text{A}$.

можно объяснить разброс значений для Δ , даваемый разными авторами.

Зная R_N джозефсоновского контакта, можно отыскать такую важную оценку, как предельная чувствительность практических сквидов из массивной керамики. Постоянная времени интерферометра $\tau \approx L_S/R_N$, где L_S - индуктивность контура квантования. При $L_S=10^{-10}\text{Гн}$, $R_N \approx 2\text{ Ом}$ $\tau \approx 0,5 \cdot 10^{-10}\text{сек}$. Частота внешней накачки не может превышать скорости протекающих процессов в сквиде. Тогда можно записать

$$\omega_H < 1/\tau < 2 \cdot 10^{10}\text{Гц}$$

Поскольку сквид является параметрическим элементом, то для него также является справедливым общее выражение для энергетического разрешения

$$\epsilon = k_B T / 2\omega_H = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 78 / (2 \cdot 2 \cdot 10^{10} \cdot 2\pi) \approx 8,6 \cdot 10^{-32}\text{Дж/Гц} = 120\text{h},$$

где h - постоянная Планка ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}\text{Дж/Гц}$).

Для сравнения: энергетическое разрешение коммерческих ниобиевых ВЧ-сквидов при $T=4,2\text{K}$ - $\epsilon = 10^{-28}\text{Дж/Гц}$, а достигнутое в настоящее время ϵ для керамических сквидов при $T=77\text{K}$ $\approx 2 \cdot 10^{-28}\text{Дж/Гц}$ [8].

Таким образом, высокотемпературные сквиды смогут выполнить большинство функций, возложенных на традиционные низкотемпературные сквиды, и в направлении достижения предельного разрешения имеется широкое поле деятельности для исследователей.

Заключение

Мы подробно исследовали характеристики слабых связей, образуемых на межзеренных границах в сверхпроводнике. Видно, что единственным практическим применением гранулированных сверхпроводников с именно таким типом слабой связи является радиочастотный сквид в виду его не критичности к невысоким значениям нормального и динамического сопротивлений $-R_N, R_d$ и характерного напряжения $V_C = I_C R_N$. Все другие применения, такие, как сквиды постоянного тока, детекторы, цифровые устройства требуют значительного увеличения этих параметров.

Таким образом, дальнейший прогресс приборов на основе ВТСП опирается в технологические проблемы синтеза джозефсоновских контактов с заданными характеристиками. Развитие технологии, очевидно, может пойти тремя путями:

формирование контактов через искусственно созданный изоляционный туннельный барьер;

создание мостиков Андерсона-Дайема с характерными размерами порядка длины когерентности;

синтез поликристаллической керамики с повышенным нормальным сопротивлением межзеренных границ.

Опыт низкотемпературной сверхпроводимости показывает, что первый путь является наиболее предпочтительным.

Литература

1. V.N.Polushkin, B.V.Vasiliev. Investigations of RF-SQUID at liquid nitrogen temperature. JINR Rapid Communications, 1989, №1 [34], p.55.
2. A.Inoue, K.Takeuchi et al. Y-Ba-Cu-O/Nb Tunnel type Josephson junctions. Japan J. Appl. Phys., 1987, v.26, p.1443-1444.
3. К.К. Лихарев и др. Новые возможности сверхпроводников. М., МГУ, 1988.
4. J.Clarke. The Impact of high-Temperature superconductivity on SQUID Magnetometers. Science, 1988, v.242, p.217-223.
5. В.Н. Глянец и др. Низкочастотный шум в ВТСП. 1 Всесоюзное совещание по высокотемпературной сверхпроводимости. 1988, Харьков, ФТИНТ АН УССР, т.3, с.25.
6. F.Komori et al. J. of the Physical Society of Japan, 1989, v.58, №3, p.797-800.
7. W.J.Skopol et al. Journ. of Low Temp. Phys., v.16, p.145.
8. В.И. Шнырков и др. ВЧ-сквид с чувствительностью 10^{-28} Дж/Гц при азотной температуре. Физика низких температур, 1988, т.14, №7, с.9.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 августа 1989 года

Васильев Б.В. и др.

Д13-89-587

Исследование джозефсоновских контактов
из $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

Изложены результаты исследования джозефсоновских контактов из $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, нашедших применение в практических устройствах. Приведены технология приготовления керамики, методика приготовления стабильных джозефсоновских контактов с малыми критическими токами, методика и техника эксперимента, основные параметры. Дана оценка предельного энергетического разрешения сверхпроводящего квантового интерферометра на основе рассмотренного типа контактов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Vasiliev B.V. et al.

D13-89-587

Investigation of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Josephson Contacts

The results of investigation of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Josephson contacts applied in practical devices are reported. The ceramics preparation technology, the method of fabrication of stable Josephson contacts with low critical currents, experimental method and techniques, the main parameters are described. The estimate of limiting energy resolution of the superconducting quantum interferometer based on described contacts is given below.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989