

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXV Международного симпозиума

9–12 марта 2021 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4, 5

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
2021

УДК 538.9
ББК 22.37; 22.33
Н-25

Н-25 **Нанозифика и нанозлектроника. Труды XXV Международного симпозиума** (Нижний Новгород, 9–12 марта 2021 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. — 521 с.

Организаторы

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;
Отделение физических наук РАН;
Научный совет РАН по физике полупроводников;
Научный совет РАН по физике конденсированных сред;
Институт физики микроструктур РАН;
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
Благотворительный фонд «От сердца к сердцу».

Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН
З.Ф. Красильник, член-корр. РАН, ИФМ РАН

Учёный секретарь Симпозиума

В.В. Румянцев, к.ф.-м.н., ИФМ РАН

Программный комитет

А.Ю. Аладышкин, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Нижний Новгород
В.В. Бельков, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
И.С. Бурмистров, д.ф.-м.н.	ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н.	МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н.	NT-MDT Spectrum Instruments, Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.Б. Грановский, д.ф.-м.н.	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н.	ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Е.Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, академик	ИФТТ РАН, Черноголовка
А.В. Латышев, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черноголовка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черноголовка
Н.Н. Салащенко, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
В.Б. Тимофеев, академик	ИФТТ РАН, Черноголовка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик	ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н.	ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Н. Новгород

Организационный комитет

М.В. Зорина,	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников, к.ф.-м.н.,	МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
Д.А. Камелин,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев,	ИФМ РАН, Н. Новгород
С.В. Морозов, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.Н. Садова,	ИФМ РАН, Н. Новгород
П.М. Марычев, к.ф.-м.н.,	ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Копасов,	ИФМ РАН, Н. Новгород
Е.А. Архипова,	ИФМ РАН, Н. Новгород

ББК 22.37; 22.33

© Нижегородский госуниверситет
им. Н.И. Лобачевского, 2021
© Институт физики микроструктур
РАН, 2021

Перегрев джозефсоновских переходов на основе золотых нанопроводов, обусловленный геометрией образца

О.В. Скрыбина^{1,2,*}, С.В. Бакурский^{2,3,4}, А.Г. Шишкин^{2,3}, А.А. Клименко^{5,6},
К.С. Напольский⁵, Н.В. Кленов^{3,4}, И.И. Соловьев^{3,4}, В.В. Рязанов^{1,2}, А.А. Голубов^{2,8},
Д. Родичев⁹, М.Ю. Куприянов³, В.С. Столяров^{2,4}

¹ Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, 142432

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, 141700

³ НИИЯФ МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, 127055

⁵ МГУ имени М. В. Ломоносова, 119991 Москва

⁶ Институт микроэлектроники РАН, Москва, 119991

⁷ Faculty of Science and Technology and MESA+ Institute of Nanotechnology, 7500 AE Enschede, The Netherlands

⁸ Laboratoire de Physique et d'Etudes des Matériaux, LPEM, UMR-8213, ESPCI-Paris, PSL, CNRS, Sorbonne University, 75005 Paris, France

*oskrya@gmail.com

Было исследовано влияние перегрева электронной системы на критический ток нескольких джозефсоновских переходов, реализованных на единичном золотом нанопроводе. С помощью теории Узаделя и применения двухжидкостной модели для нормальной и сверхпроводящей составляющих протекающих токов объяснено взаимное влияние соседних переходов на их характеристики через процессы перегрева. Полученные результаты предоставляют дополнительные способы управления планарными сверхпроводящими устройствами.

Введение

Применение нанопроводов в электронных схемах – один из перспективных способов миниатюризации и повышения производительности [1]. Использование нанопроводов в качестве слабых связей в джозефсоновских переходах позволяет значительно уменьшить габариты устройства, а также деградацию структур. Джозефсоновские переходы на основе нанопроводов демонстрируют значительно отличающиеся режимы работы по сравнению с традиционными многослойными переходами [2, 3]. Небольшой объем нанопроводов и их слабая тепловая связь с подложкой способствуют возникновению неравновесных процессов, что дает возможность изучения их влияния на джозефсоновские свойства контактов.

Результаты

Мы демонстрируем результаты исследований джозефсоновских устройств, представляющих собой планарные структуры на основе золотых нанопроводов с ниобиевыми контактами. Нанопровода были получены с помощью электрохимического осаждения металла в поры анодного оксида алюминия. Формирование структур реализовано с помощью

технологического процесса, включающего в себя электронную литографию и магнетронное напыление. Устройства обладали стандартной многотерминальной конфигурацией [4, 5], которая позволила изучить влияние тока, вводимого через различные электроды, на свойства перехода. Принято считать, что традиционная четырехконтактная схема позволяет избежать влияния падений напряжения на границах раздела между материалами на транспортные характеристики [6]. В нашей работе мы показываем, насколько отличаются результаты, полученные при измерении электронно-транспортных характеристик по стандартной четырехточечной схеме (4PS), когда ток пропускается через весь образец с помощью внешних электродов, а напряжение измеряется на внутренних контактах и по инвертированной четырехточечной схеме (4PI), где потенциальными являются внешние контакты. Также сравним результаты с двухточечной (2P – или квази-четырёхточечная схема) схемой измерения.

Рассмотрим структуру, представленную на рис. 1, в частности переходы SJ-1 и SJ-2, имеющие разные длины слабой связи (645 нм и 360 нм соответственно). Результаты измерений для этих переходов

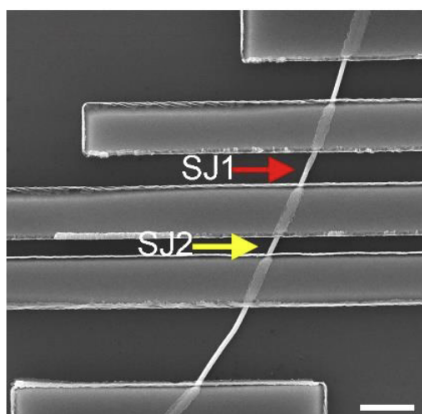


Рис. 1. СЭМ-изображение образца, красной стрелкой отмечена длинный джозефсоновский переход SJ1 ($L = 645$ нм), желтой – короткий SJ2 ($L = 360$ нм). Метка масштаба составляет 1 мкм

представлены на рис. 2 (а, б), где показаны температурные зависимости критических токов обоих переходов для 4PS и 4PI схем. Вплоть до температуры T_δ критический ток не зависит от способа измерения, ниже этой температуры наблюдается расхождение измеряемого критического тока для разных схем измерения образца, $T_\delta = 1,5$ К для длинного перехода SJ, и $T_\delta = 2,5$ К для короткого перехода SJ2. Т.е. $\delta I = (I_c^{PI} - I_c^{PS})/I_c^{PI}$ зависит от длины перехода и температуры. Полученные кривые были теоретически описаны с помощью уравнения Узаделя, согласованность теоретических и экспериментальных данных для 4PI схемы означает, что в инвертированной геометрии значение критического тока почти такое же, как и ожидалось для идеального джозефсоновского перехода в состоянии равновесия.

Разницу между результатами, полученными для разных схем измерения, мы интерпретируем в рамках двухжидкостной модели. Имеет значение, как вводимый в образец ток связан с нормальными и сверхпроводящими компонентами системы. В случае 4PS схемы ток вводится через весь нанопровод, т.е. в область слабой связи вводится нормальный ток, в то время как измерение $I_c(T)$ отражает сверхпроводящую компоненту, то есть разницу между химическими потенциалами куперовских пар. В инвертированной схеме, напротив, в провод подается сверхток и измеряется падение напряжения

квазичастичной компоненты. Наконец, в 2P режиме вводится сверхток и измеряется напряжение на сверхпроводящем конденсате. Действительно, в случае 4PI и 2P критический ток больше, нежели в случае зависимости для схемы измерения 4PS.

На рис. 2с показана зависимость $\delta(I_c)$ от длины перехода: понятно, что перегрев коллектива электронов коротких переходах значительно сильнее. На вставке к Рис. 2с показана эволюция $\delta(I_c)$, измеренная при $T = 1,5$ К, как функция обратного объема $1/U$ изучаемого сегмента нанопроволоки. Зависимость $\delta(I_c)$ от $1/U$ линейная, кроме случая для наиболее длинных изученных переходов с $L > 500$ нм. В них проявляется пространственный градиент перегрева, и электронная система в переходе больше не может считаться однородной.

Кроме того, нельзя недооценивать ближайшее окружение изучаемого перехода. Например, когда длинный переход SJ1 находится в резистивном состоянии, он представляет собой резервуар нормальных квазичастиц, которые соединяются с коротким переходом SJ2 и, таким образом, могут влиять на его поведение. Можно ожидать, что при достаточно высоких температурах критическим током перехода SJ1 можно пренебречь, и в переход SJ2 вводится чисто нормальный ток, что приводит к дополнительному нагреву его электронов.

Если же мы рассмотрим свойства перехода SJ1, то более короткий соседний переход SJ2 находится полностью в сверхпроводящем состоянии и является лишь частью эффективного сверхпроводящего электрода. Перегрев от более длинных боковых переходов остается существенным даже при низких температурах, когда они находятся в сверхпроводящем состоянии. Этот эффект представлен на Рис. 2d, где синими кружками отмечена критическая температура нескольких измеренных переходов T_c^{SNS} . Пунктирная черная линия – результат расчетов с использованием уравнений Узаделя. Красными треугольниками отмечена температура появления эффекта перегрева T_δ в переходах короткой стороны. Понятно, что длинные боковые переходы увеличивают температуру T , при которой явления перегрева становятся экспериментально наблюдаемыми.

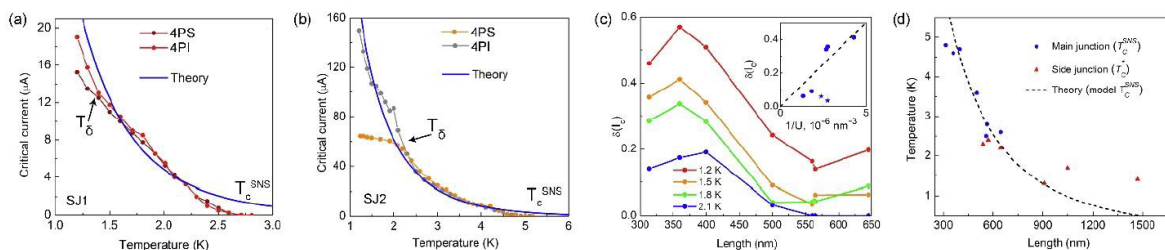


Рис. 2. а) и б) – зависимости $I_c(T)$ слабых связей SJ1 и SJ2 соответственно, измеренные с использованием различных схем. Синие линии – расчетные зависимости, T_δ – температура расхождения кривых $I_c(T)$, T_c^{SNS} – температура появления критического тока в образце. в) Относительная разница между критическим током, наблюдаемым с использованием тока между стандартной и инвертированной измерительной схемами, в зависимости от длины слабой связи при различных температурах. На вставке показана зависимость этой разницы от обратного объема перехода. Данные представлены для нанопроводов диаметром от 90 до 130 нм. д) Зависимость температуры возникновения критического тока переходов T_c^{SNS} Nb/Au-NW/Nb как функция длины слабой связи по экспериментальным данным (синие кружки) и теоретическая кривая (пунктирная черная линия). Красные треугольники – зависимость температуры перегрева T_δ от длины бокового перехода

Выводы

Были продемонстрированы неравновесные эффекты в джозефсоновских переходах на основе одиночных золотых нанопроводов, и прояснена их природа. В случае использования стандартной четырехконтактной схемы измерения основная причина выявленного в рамках двухжидкостной модели снижения критического тока была представлена как перегрев электронной системы из-за ввода нормального тока в образец. Также было обнаружено, что при последовательном включении нескольких переходов, перегрев в изучаемой слабой связи увеличивается с температурой быстрее, чем ожидалось бы. Причина заключается в проявлении джозефсоновской генерации в боковых переходах. Это наблюдение показывает, что отвод тепла от сверхпроводящей части электронной системы значительно менее эффективен, чем от нормальной части. Это также подтверждается гистерезисным поведением вольт-амперных характеристик, наблюдаемом в четырехконтактной инвертированной схеме измерения, а также в схеме с двумя зондами.

Исследования проводились при поддержке проекта РФФИ 19-02-00981, ОВС благодарит за поддержку Стипендию президента РФ СП-5135.2021.5.

Литература

1. Buzea C. and Pacheco I. Electrical properties of nanowires and nanofibers // Handbook of Nanofibers (SpringerNature Switzerland AG 2019), Vol. 1, p. 557-618.
2. Jabdaraghi R.N., Peltonen J.T., Saira O.-P., and Pekola J.P. // Appl. Phys. Lett. 108, 042604 (2016).
3. Pascual Garcia Cesar and Giazotto Francesco // Appl. Phys. Lett. 94, 132508 (2009).
4. Gu Wenhua, Choi Hyungsoo, and Kim Kyekyoon (Kevin) // Appl. Phys. Lett. 89, 253102 (2006).
5. Xu W.-H., Wang L., Guo Z., Chen X., Liu J., and Huang X.-J. // ACS Nano 9(1), 241 (2015).
6. Keithley J.F. Low Level Measurements // Handbook (Cleveland, Keithley Instruments Inc., 1996).