



*Российская Академия Наук*

# НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Труды XXVIII  
Международного симпозиума

*11–15 марта 2024 года*

## Том 1

Нижний Новгород  
2024

# **НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

**Труды XXVIII Международного симпозиума**

*11–15 марта 2024 г., Нижний Новгород*

## ***Том 1***

*Секция 1*

Сверхпроводящие наносистемы

*Секция 2*

Магнитные наноструктуры

*Секция 5*

Многослойная и кристаллическая рентгеновская оптика

УДК 538.9(063)  
ББК 22.37я431  
32.844.2я431  
Н-25

Н-25 **Нанозифика и нанозлектроника. Труды XXVIII Международного симпозиума (Нижний Новгород, 11–15 марта 2024 г.).**  
В 2 томах. Том 1-й. — Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2024. — 560 с.  
ISBN 978-5-8048-0123-7

#### 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»

#### Программный комитет

А. В. Акимов, к.ф.-м.н.	РКЦ, ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН, Москва
А. Ю. Аладышкин, д.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 им. М. В. Ломоносова, 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, Нижний Новгород
С. В. Гапонов, академик РАН	ИФМ РАН, Нижний 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. Зайцев-Зотов, д.ф.-м.н.	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
С. В. Иванов, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Е. Л. Ивченко, чл.-корр. РАН	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В. В. Кведер, академик РАН	ИФТТ РАН, Черноголовка
З. Ф. Красильник, чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
И. В. Кукушкин, академик РАН	ИФТТ РАН, Черноголовка
В. Д. Кулаковский, академик РАН	ИФТТ РАН, Черноголовка
А. В. Латышев, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
А. С. Мельников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. А. Мильяев, д.ф.-м.н.	ИФМ УрО РАН им. М. Н. Михеева, Екатеринбург
В. Л. Миронов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Морозов, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. А. Никитов, чл.-корр. РАН	ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
А. В. Новиков, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. В. Рощупкин, д.ф.-м.н.	ИПТМ РАН, Черноголовка
В. В. Рязанов, д.ф.-м.н.	ИФТТ РАН, Черноголовка
А. В. Садовников, к.ф.-м.н.	СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Саратов
<u>Н. Н. Салашенко</u> , чл.-корр. РАН	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Сапожников, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. А. Саранин, чл.-корр. РАН	ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
Д. А. Татарский, к.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород, учёный секретарь
Ю. А. Филимонов, д.ф.-м.н.	Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А. А. Фраерман, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Д. Р. Хохлов, чл.-корр. РАН	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
А. В. Чаплик, академик РАН	ИФП СО РАН им. А. В. Ржанова, Новосибирск
Н. И. Чхало, д.ф.-м.н.	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Т. В. Шубина, д.ф.-м.н.	ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

#### Организационный комитет

А. В. Новиков	ИФМ РАН, Нижний Новгород, председатель
В. Г. Беллюстина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. В. Зорина	ИФМ РАН, Нижний Новгород
А. В. Иконников	МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
Д. А. Камелин	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Р. С. Малофеев	ИФМ РАН, Нижний Новгород
М. С. Михайленко	ИФМ РАН, Нижний Новгород
С. В. Морозов	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Н. Садова	ИФМ РАН, Нижний Новгород
Е. Е. Пестов	ИФМ РАН, Нижний Новгород

ISBN 978-5-8048-0123-7

ББК 22.37я431

32.844.2я431

© ИПФ РАН, 2024

© ИФМ РАН, 2024

# Исследование СВЧ-свойств высокотемпературных джозефсоновских контактов на основе YBCO, изготовленных методом фокусированного ионного пучка

Е. Е. Пестов<sup>1,2,\*</sup>, М. Ю. Левичев<sup>1</sup>, Д. В. Мастеров<sup>1</sup>, А. Е. Парафин<sup>1</sup>, С. А. Павлов<sup>1</sup>, Ю. В. Петров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034

\*pestov@ipmras.ru

В работе изготовлены ВТСП джозефсоновские переходы с помощью метода фокусированного ионного пучка при различных дозах облучения. Изучены сверхпроводящие свойства таких контактов. При воздействии излучения на частоте порядка 79 ГГц наблюдаются ступени Шапиро на вольт-амперных характеристиках джозефсоновских переходов.

## Введение

Из-за хорошей воспроизводимости и высокого качества низкотемпературные джозефсоновские контакты являются основными элементами в сверхпроводящей электронике, такими как быстрый квант одиночного потока, квантовые биты и сверхпроводящие квантовые интерференционные магнитометры (СКВИД). Такие устройства с высокой плотностью переходов хорошо зарекомендовали себя в области низкотемпературной сверхпроводящей электроники. В то же время использование гелиевых криостатов снижает мобильность этих систем и ограничивает их практическое применение. Поэтому с момента открытия высокотемпературной сверхпроводимости значительные усилия были направлены на создание устройств на основе высокотемпературных джозефсоновских переходов. Однако, несмотря на привлекательность использования таких переходов из-за более высоких рабочих температур, их применение вызывает значительные технологические трудности.

Широкое применение в сверхпроводящих устройствах получили высокотемпературные бикристаллические переходы. В то же время их воспроизводимость во многом зависит от качества границы бикристалла. Поэтому любое микроскопическое несовершенство границы или дефект могут приводить к неоднородности распределения параметров этих контактов. Кроме этого, при изготовлении многослойных сэндвич-переходов возникают сложности при создании наноразмерного промежуточного слоя. Переходы, изготовленные с помощью ионной имплантации, свободны от упомянутых выше проблем. Для формирования ВТСП-структур из джозефсоновских переходов ранее использовалось высокоэнергетическое ионное облучение. Первые СКВИДы на основе высокотемпературных сверхпроводников были созданы с помощью ионной имплантации. Фактический латеральный размер перехода, выполненного с помощью имплантации кислорода и галлия, колеблется примерно до 100 нм из-за частых событий рассеяния на большие углы столкновений. В этом случае объем взаимодействия имплантированных тяжелых ионов с материалом имеет радиальное распределение. Это приводит к менее однородному интерфейсу по сравнению с более легкими ионами. При этом характерное напряжение джозефсоновского контакта  $I_c R_n$

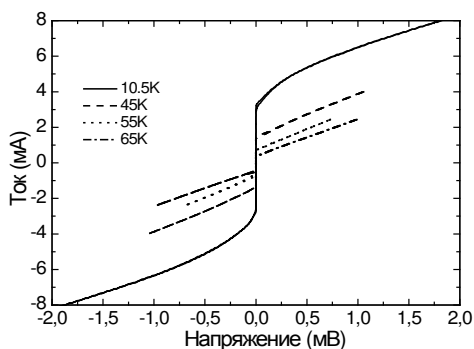
сильно подавляется. Другим недостатком является неизбежное химическое взаимодействие галлия с ВТСП-материалом. Появление и развитие коммерческого гелиевого ионного микроскопа (НИМ) [1, 2] с более легкими ионами гелия позволило изготовить переходы со сверхузкими боковыми границами. Контролируемое атомное разрешение в этом случае обусловлено малой расходимостью пучка в пределах объема взаимодействия ионов гелия.

## Результаты

В работе исследованы транспортные и СВЧ-свойства джозефсоновских контактов на основе YBCO, изготовленных методом фокусированного ионного пучка. Для изготовления сверхпроводящих мостиков шириной 5, 7, и 10 мкм был использован метод, основанный на предварительной модификации сапфировой подложки [3]. В данном методе поверхность подложки, пригодной для эпитаксиального роста пленок YBCO, модифицируется путем формирования на ней специальной задающей маски, которая определяет топологию создаваемой структуры непосредственно в процессе роста пленки YBCO. Пленки YBCO толщиной 60 нм осаждались методом магнетронного напыления в стандартных условиях для эпитаксиального роста YBCO. Джозефсоновский переход формировался сфокусированным пучком ионов гелия He<sup>+</sup> с помощью гелиевого ионного микроскопа Carl Zeiss Orion, оборудованного литографической системой Nanomaker, при энергии ионов 35 кэВ и токе пучка около 3 пА. Сверхпроводящие свойства джозефсоновских контактов в температурном диапазоне от 10 до 100 К были изучены с помощью измерительного зонда, который помещался в гелиевый криостат. Для защиты образца от воздействия влаги зонд герметично закрывался металлическим корпусом. Для экранирования микросхемы от внешних магнитных полей применялся пермаллоевый экран. Перед измерениями внутрь корпуса зонда напускался гелий, который обеспечивал эффективное охлаждение микросхемы.

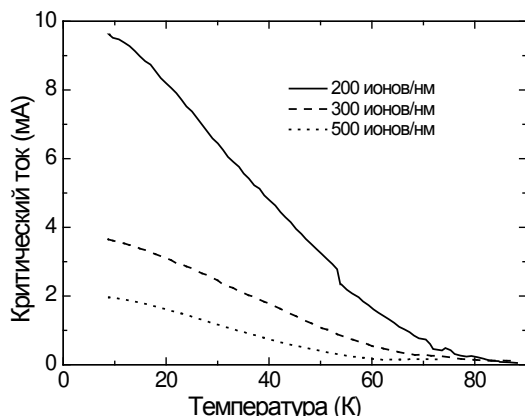
На рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) джозефсоновского контакта шириной 5 мкм при различных температурах. На ВАХ наблюдается участок со сверхпроводящим током. Величина критического тока контакта при температуре 45 К

равна  $I_c = 1,5$  мА, а величина нормального сопротивления этого перехода равна  $R_n = 0,5 \Omega$ .



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики джозефсоновского контакта шириной 5 мкм при различных температурах. Доза облучения контакта  $D = 300$  ионов/нм

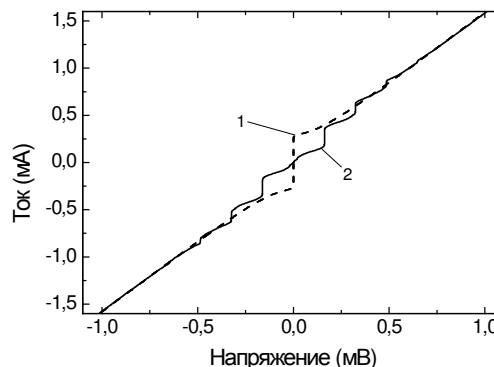
На рис. 2 показаны температурные зависимости критического тока джозефсоновского контакта  $I_c(T)$  шириной 5 мкм при различных дозах облучения. Как видно из рис. 2, критический ток контакта значительно подавляется при увеличении дозы облучения ионами. Также следует отметить, что полученные джозефсоновские контакты имеют довольно высокое качество. В частности, температура перехода в сверхпроводящее состояние таких контактов 80 К, а величина критического тока  $I_c$  равна 4 мА при температуре 10 К при дозе облучения 300 ионов/нм.



**Рис. 2.** Температурные зависимости критического тока джозефсоновского контакта шириной 5 мкм при различных дозах облучения

На рис. 3 показаны ВАХ джозефсоновского контакта шириной 5 мкм без облучения и при облучении сигналом на частоте  $f = 78,83$  ГГц при температуре

45 К. Из рисунка видно, что при воздействии излучения на ВАХ наблюдается первая ступенька Шапиро с размахом по току  $\Delta I_1 = 150$  мкА ( $\Delta I_1/I_c \cong 0,6$ ) при напряжении порядка 163 мкВ и температуре образца 45 К (см. рис. 3). Характерное напряжение контакта при этой температуре составляет величину порядка  $V_c \cong 180$  мкВ.



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики джозефсоновского контакта шириной 5 мкм без облучения (1) и при облучении (2) сигналом на частоте  $f = 78,83$  ГГц при температуре 45 К. Доза облучения контакта  $D = 500$  ионов/нм

Таким образом, в работе изготовлены высококачественные джозефсоновские переходы из высокотемпературных сверхпроводников YBCO методом фокусированного ионного пучка. Полученные результаты могут быть использованы для создания различных сверхпроводящих устройств на основе джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников.

Авторы благодарны А. М. Клушину за полезные обсуждения.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН (тема № FFUF-2024-0023). В работе использовано оборудование ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур».

### Литература

1. Z. Chen, Y. Li, R. Zhu, J. Xu, T. Xu, D. Yin, X. Cai, Y. Wang, J. Lu, Y. Zhang, and P. Ma // Chin. Phys. Lett. 2022. V. 39. P. 077402.
2. E. Y. Cho, Y. W. Zhou, J. Y. Cho, and S. A. Cybart // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. P. 022604.
3. Д. В. Мастеров, С. А. Павлов, А. Е. Парафин, П. А. Юнин // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. С. 82.