

05

## Характеристики джозефсоновских контактов, полученных методом фокусированного ионного пучка в структурах YBCO/CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

© Е.Е. Пестов<sup>1,2</sup>, М.Ю. Левичев<sup>1</sup>, Д.В. Мастеров<sup>1</sup>, С.А. Павлов<sup>1</sup>, А.Е. Парафин<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>3</sup><sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: masterov@ipmras.ru, pestov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 12 июля 2024 г.

В окончательной редакции 15 августа 2024 г.

Принято к публикации 22 августа 2024 г.

На сапфировой подложке с подслоем эпитаксиального оксида церия методом фокусированного пучка ионов гелия изготовлены ВТСП джозефсоновские контакты. Изучены транспортные и СВЧ-свойства контактов, полученных при различных дозах облучения мостиков YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub>. При воздействии на исследуемые джозефсоновские переходы излучения с частотой около 79 GHz на их вольт-амперных характеристиках наблюдаются ступени Шапиро.

**Ключевые слова:** подложки с подслоем эпитаксиального оксида церия, пленки YBCO, джозефсоновские контакты, фокусированный ионный пучок.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.01.59519.20056

Джозефсоновские переходы (ДП) являются одним из ключевых элементов в устройствах слаботочной сверхпроводниковой микроэлектроники. Для низкотемпературных сверхпроводников технология формирования таких контактов хорошо освоена и обладает высокой воспроизводимостью.

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) на основе ВТСП ДП были разработаны такие востребованные приборы, как стандарты напряжения [1], генераторы THz-сигналов [2], детекторы [3], малощумящие усилители и смесители [4]. Несмотря на привлекательность использования таких переходов вследствие более высоких рабочих температур, их широкое применение сдерживается значительными технологическими трудностями изготовления, связанными с малой длиной когерентности в YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> (YBCO). Поэтому поиски новых методов изготовления ВТСП ДП продолжаются. В настоящее время активно ведутся работы по применению гелиевого ионного микроскопа, позволяющего модифицировать параметры пленки в очень узких (единицы нанометров) областях и таким образом формировать ВТСП ДП [5] в любом месте подложки.

Для изготовления YBCO-пленок и структур используются подложки из различных материалов: титаната стронция, алюмината лантана, галлата неодима и др. В настоящей работе были изготовлены и исследованы ДП, сформированные фокусированным пучком ионов гелия (FIB) в пленке YBCO, нанесенной на сапфировую подложку (*r*-срез) с подслоем оксида церия. Выбор подложки определялся несколькими причинами. Во-первых, низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь в сапфире делают подложки из этого материала в

целом привлекательными для изготовления на их основе электронных схем. Во-вторых, этот тип подложки предоставляет новые технологические возможности, связанные с тем, что на сапфире с ультратонкими (вплоть до единиц нанометров) слоями оксида церия можно вырастить высококачественную пленку YBCO [6], в то время как пленка YBCO, осажденная в том же процессе на участки подложки без подслоя оксида церия, не является сверхпроводящей. Здесь важно, что при формировании YBCO-мостиков субмикронной ширины вместо травления пленки сверхпроводника может быть использовано травление ультратонкого подслоя оксида церия (так называемое формирование „островков“ оксида церия на сапфире), которое затем будет определять топологию структуры непосредственно в процессе осаждения YBCO. В-третьих, существенным достоинством сапфировых подложек является их коммерческая доступность в сочетании с высоким качеством, обусловленным их широким использованием в различных областях приборостроения, в том числе в производстве полупроводниковых приборов.

Исследуемые ДП были изготовлены на мостиках шириной 5 μm и длиной 5 квадратов. Последовательность операций и параметры технологических процессов, используемых в настоящей работе для формирования YBCO-мостиков и исключаящих процесс травления пленки сверхпроводника, подробно описаны в нашей работе [7]. Толщина подслоя CeO<sub>2</sub> составила 50 nm, толщина пленки YBCO — 65 nm. Исходные параметры *c*-ориентированной пленки YBCO были следующими: критическая температура 85 K, плотность критического тока 2 MA/cm<sup>2</sup> при температуре 77 K. ДП формировался пучком ионов гелия He<sup>+</sup> с помощью ионного микро-

скопа Carl Zeiss Orion, оборудованного литографической системой NanoMaker, при энергии ионов 35 keV и токе пучка 3 pA. Доза облучения ионами гелия  $D$  изменялась в диапазоне от 200 до 500 ions/nm.

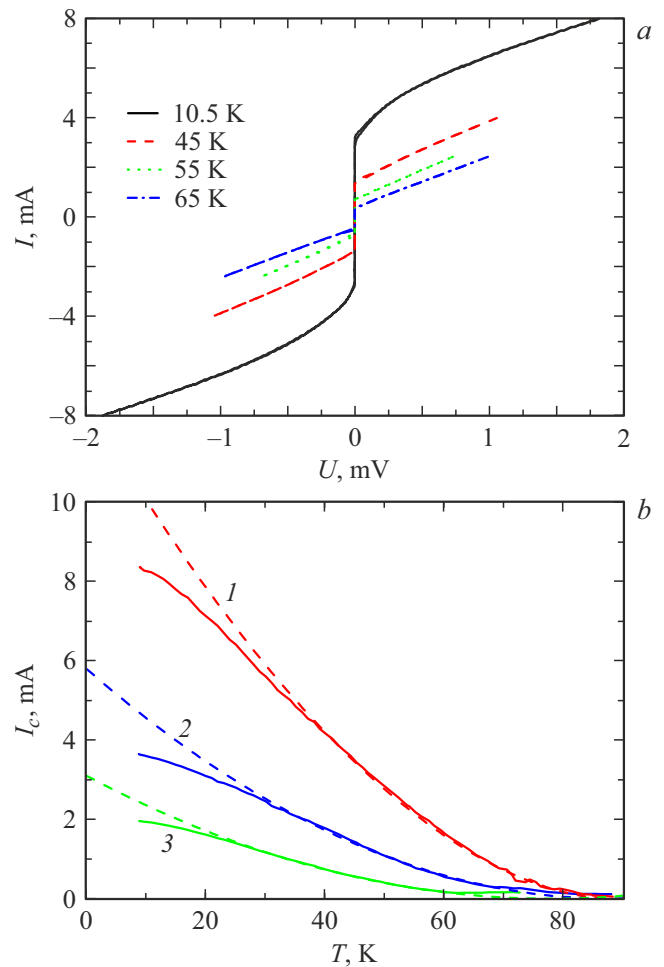
Сверхпроводящие свойства ДП в температурном диапазоне 10–100 K были изучены с помощью измерительного СВЧ-зонда [8], который помещался в гелиевый криостат. Основу СВЧ-зонда составляет сверхразмерный круглый волновод. Круглый рупор подсоединен к концу волновода, который расположен в криостате. После рупора размещаются образец с ДП и металлическое зеркало. СВЧ-сигнал в диапазоне частот от 72 до 79 GHz подается на противоположный конец волновода. Этот сигнал создается синтезатором СВЧ-частот и твердотельным умножителем. Измерения транспортных характеристик ДП были выполнены с помощью стандартной четырехзондовой схемы измерений.

На рис. 1 представлены основные электрофизические характеристики полученных ДП. На рис. 1, *a* показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта шириной  $5 \mu\text{m}$  при различных температурах. ВАХ этого контакта демонстрирует участок со сверхпроводящим током. Величина критического тока контакта при температуре 45 K составляет  $I_c = 1.5 \text{ mA}$ , а величина нормального сопротивления этого перехода равна  $R_n = 0.5 \Omega$ . Соответственно величина характерного напряжения  $I_c R_n = 0.75 \text{ mV}$ . Рис. 1, *b* демонстрирует температурные зависимости критического тока  $I_c(T)$  ДП шириной  $5 \mu\text{m}$  при различных дозах облучения. Эти контакты имеют довольно высокое качество. В частности, при дозе облучения 300 ions/nm температура перехода в сверхпроводящее состояние таких контактов составляет 80 K, а величина критического тока  $I_c$  равна 4 mA при температуре 10 K. Эти зависимости при температурах, близких к  $T_c$ , могут быть аппроксимированы степенным законом

$$I_c(T) = I_c(0)(1 - T/T_c)^n. \quad (1)$$

Лучшее совпадение теоретических кривых с экспериментальными данными наблюдается при показателе степени  $n$ , равном 1.8–2. Как известно, квадратичная температурная зависимость соответствует случаю ДП сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник (SNS) [9]. Следует также отметить, что критический ток контакта значительно подавляется при увеличении дозы облучения ионами.

На рис. 2 показаны температурные зависимости сопротивления  $\rho(T)$  джозефсоновского контакта шириной  $5 \mu\text{m}$  при различных дозах облучения. Как видно, после сверхпроводящего перехода температурная зависимость  $\rho(T)$  демонстрирует широкое плато, которое обусловлено наличием ДП. Это плато на кривых  $\rho(T)$  в облученных высокотемпературных переходах обусловлено термическим эффектом активированного проскальзывания фазы (TAPS), который может быть описан моделью Амбегаокара–Гальперина [10]. Согласно этой теории,



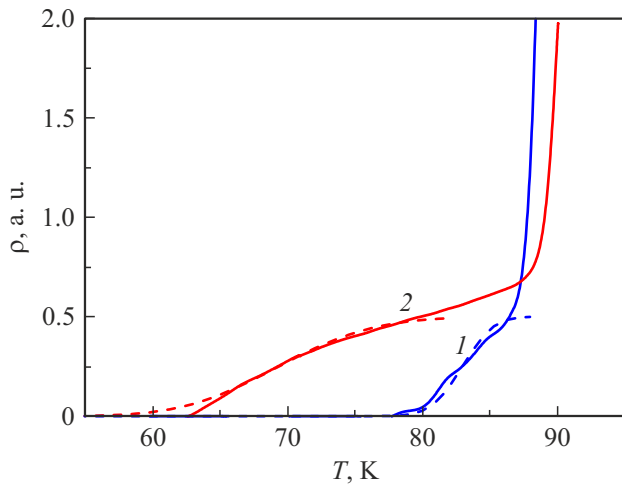
**Рис. 1.** *a* — вольт-амперные характеристики ДП шириной  $5 \mu\text{m}$  при различных температурах. Доза облучения контакта  $D = 300 \text{ ions/nm}$ . *b* — температурные зависимости критического тока ДП шириной  $5 \mu\text{m}$  при дозах облучения  $D = 200$  (1), 300 (2) и 500 ions/nm (3). Штриховыми линиями показаны аппроксимации кривых степенным законом.

такая зависимость  $\rho(T)$  появляется, когда тепловая энергия  $k_B T$  становится сравнимой с энергией джозефсоновской связи при температурах вблизи сверхпроводящего перехода. На рис. 2 показаны полученные с помощью этой теории аппроксимирующие кривые  $\rho(T)$

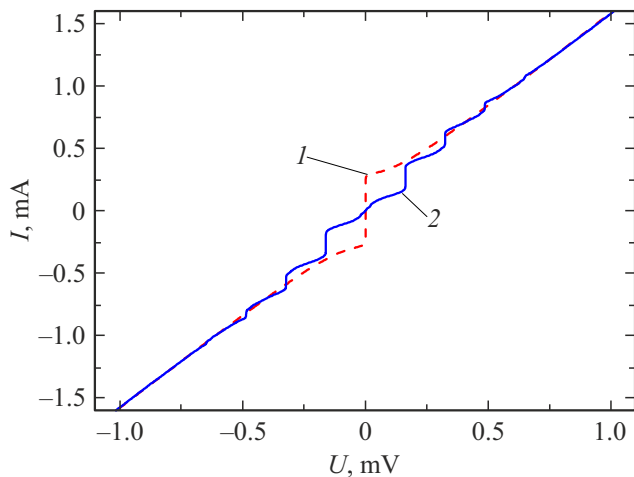
$$\rho(T) = \rho_p \left[ I_0 \left( \frac{\hbar I_c(T)}{2ek_B T} \right) \right]^{-2}, \quad (2)$$

где  $I_0$  — модифицированная функция Бесселя,  $I_c(T)$  — критический ток ДП. Максимальное совпадение теоретических кривых (2) с экспериментальными наблюдается при показателе степени  $n = 2$ . Также следует отметить, что при увеличении дозы облучения ширина этого плато увеличивается. Это соответствует уменьшению критического тока ДП.

На рис. 3 показана ВАХ джозефсоновского контакта без облучения и при облучении сигналом на частоте  $f = 78.83 \text{ GHz}$  при температуре 45 K. Из рисунка



**Рис. 2.** Температурные зависимости удельного сопротивления ДП шириной  $5\ \mu\text{m}$  при дозах облучения  $D = 200$  (1) и  $300\ \text{ions/nm}$  (2). Штриховыми линиями показана аппроксимация моделью Амбегаокара–Гальперина [10].



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики ДП шириной  $5\ \mu\text{m}$  без облучения (1) и при облучении (2) СВЧ-сигналом на частоте  $f = 78.83\ \text{GHz}$  при температуре  $45\ \text{K}$ . Доза облучения контакта  $D = 500\ \text{ions/nm}$ .

видно, что при воздействии излучения на ВАХ наблюдается первая ступенька Шапиро с размахом по току  $\Delta I_1 = 150\ \mu\text{A}$  ( $\Delta I_1/I_c \cong 0.6$ ) при напряжении  $\sim 163\ \mu\text{V}$  и температуре образца  $45\ \text{K}$ . Характерное напряжение контакта при этой температуре составляет величину порядка  $V_c \cong 180\ \mu\text{V}$ . Следует отметить, что, поскольку полость умножителя, круглый волновод и металлическое зеркало образуют СВЧ-резонатор [8], ширина первой ступени Шапиро зависит от частоты СВЧ-сигнала. Поэтому на рис. 3 приведена ВАХ при частоте, которая соответствует максимальной ширине участка по току первой ступени Шапиро.

Таким образом, нами на сапфировой подложке ( $r$ -срез) с подслоем эпитаксиального оксида церия ме-

тодом FIB при различных дозах облучения изготовлены ВТСП ДП, демонстрирующие достаточно высокие электрофизические характеристики. Установлено, что изготовленные сверхпроводящие структуры являются переходами типа SNS. При воздействии на полученный ДП излучения с частотой  $f = 78.83\ \text{GHz}$  на ВАХ контакта наблюдается первая ступенька Шапиро с напряжением  $\sim 163\ \mu\text{V}$ . Полученные результаты показывают, что совершенствование технологии изготовления ДП фокусированным пучком ионов гелия на сапфировых подложках с подслоем эпитаксиального оксида церия является перспективной задачей. Ее решение позволит получать массивы однородных ДП с хорошо воспроизводимыми электрофизическими параметрами, что является необходимым условием их использования в различных приложениях.

### Благодарности

Авторы благодарны А.М. Клушину, инициировавшему настоящую работу.

В работе использовано оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-29-00824.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.K. Khorshev, A.I. Pashkovsky, A.N. Subbotin, N.V. Rogozhkina, Yu.M. Gryaznov, M.Yu. Levichev, E.E. Pestov, M.A. Galin, V.Yu. Maksimov, D.A. Zhezlov, A.S. Katkov, A.M. Klushin, IEEE Trans. Instrum. Meas., **68** (6), 2113 (2019). DOI: 10.1109/TIM.2019.2896011
- [2] L.S. Revin, D.V. Masterov, A.E. Parafin, S.A. Pavlov, D.A. Pimanov, A.V. Chiginev, A.V. Blagodatkin, I.V. Rakut', E.V. Skorokhodov, A.V. Gordeeva, A.L. Pankratov, Appl. Sci., **12** (23), 11960 (2022). DOI: 10.3390/app122311960
- [3] V.V. Pavlovskiy, I.I. Gundareva, O.Y. Volkov, Y.Y. Divin, Appl. Phys. Lett., **116** (8), 082601 (2020). DOI: 10.1063/1.5142400
- [4] T. Zhang, J. Du, Y.J. Guo, IEEE J. Microwaves, **2** (3), 374 (2022). DOI: 10.1109/JMW.2022.3171675
- [5] Z. Chen, Y. Li, R. Zhu, J. Xu, T. Xu, D. Yin, X. Cai, Y. Wang, J. Lu, Y. Zhang, P. Ma, Chin. Phys. Lett., **39** (7), 077402 (2022). DOI: 10.1088/0256-307X/39/7/077402
- [6] А.В. Боряков, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин, ФТТ, **66** (6), 848 (2024). DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58235.20NH [A.V. Boryakov, D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A.E. Parafin, P.A. Yunin, Phys. Solid State, **66** (6), 818 (2024). DOI: 10.61011/PSS.2024.06.58691.20NH].

- [7] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, ФТТ, **64** (9), 1169 (2022). DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52801.07HH [D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A.E. Parafin, Phys. Solid State, **64** (9), 1172 (2022). DOI: 10.21883/PSS.2022.09.54146.07HH].
- [8] А.М. Клушин, Е.Е. Пестов, М.А. Галин, М.Ю. Левичев, ФТТ, **58** (11), 2121 (2016). DOI: 10.21883/ftt.2016.11.43723.12k [A.M. Klushin, E.E. Pestov, M.A. Galin, M.Yu. Levichev, Phys. Solid State, **58** (11), 2196 (2016). DOI: 10.1134/S1063783416110184].
- [9] P.G. de Gennes, Rev. Mod. Phys., **36** (1), 225 (1964). DOI: 10.1103/RevModPhys.36.225
- [10] V. Ambegaokar, B.I. Halperin, Phys. Rev. Lett., **22** (25), 1364 (1969). DOI: 10.1103/PhysRevLett.22.1364