

02,01

## Влияние контактного сопротивления интерфейса YBCO|Au на транспортные и СВЧ-свойства массивов джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников

© 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>, С.К. Хоршев<sup>3</sup>, Н.В. Рогожкина<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> Нижегородское научно-производственное объединение им. М.В. Фрунзе,  
Нижний Новгород, Россия

E-mail: pestov@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Изучено влияние контактного сопротивления интерфейса структуры YBCO|Au на транспортные и СВЧ-свойства массивов бикристаллических джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников встроенных в копланарную линию передач. Исследованы ВАХ джозефсоновских структур, изготовленных с помощью различных технологий: *in situ* и *ex situ* с отжигом в атмосфере кислорода. Полученные результаты могут быть использованы для создания квантового генератора переменного напряжения на основе джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников.

**Ключевые слова:** высокотемпературные сверхпроводники, джозефсоновские контакты, СВЧ, контактное сопротивление.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52808.37NN

### 1. Введение

Самые точные и воспроизводимые эталоны постоянного напряжения основаны на сверхпроводящих джозефсоновских переходах [1,2]. Современные технологии изготовления джозефсоновских контактов из ниобия позволяют синхронизировать внешним сигналом цепочки из нескольких десятков тысяч контактов [2]. Для реализации эталона переменного напряжения Бендем и Гамильтоном в 1996 г. был предложен синтезатор сигналов произвольной формы на основе ниобиевых джозефсоновских контактов [3,4]. В синтезаторе цепочка джозефсоновских контактов управляется импульсами тока, которые позволяют генерировать переменный сигнал произвольной формы с квантовой точностью [5–7]. В настоящее время квантовые синтезаторы сигналов произвольной формы на основе низкотемпературных сверхпроводников используются в джонсовской термометрии, эталонах переменного напряжения, калибровке термопреобразователей и т. д. [6]. В то же время, массивы бикристаллических джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) привлекательны для построения квантового синтезатора сигнала [8,9]. Это связано с тем, что рабочие температуры для этих микросхем могут быть достигнуты с помощью компактных криокулеров малой мощности. Для уменьшения разброса

характерных напряжений бикристаллических джозефсоновских переходов в цепочке необходимо их шунтировать слоем нормального металла. Это позволяет синхронизировать внешним СВЧ-сигналом большее количество джозефсоновских контактов. Однако для создания микросхем на основе высокотемпературных сверхпроводников требуется низкое контактное сопротивление  $\rho_c \approx 10^{-6} - 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$  на интерфейсе между сверхпроводником и металлом [10–15]. Это необходимо как для малых СВЧ-потерь в линии передач, так и для создания высококачественных джозефсоновских контактов на основе высокотемпературных сверхпроводников.

В работе исследуется влияние контактного сопротивления интерфейса структуры YBCO (yttrium barium copper oxide)|Au на транспортные свойства массивов бикристаллических встроенных в копланарную линию передач. Для создания фотошаблона микросхемы было проведено численное моделирование. Далее исследовались ВАХ без облучения и в присутствии СВЧ-облучения джозефсоновских структур, изготовленных с помощью различных технологий. Разработанная микросхема может быть использована в дальнейшем для построения квантового синтезатора сигнала на основе джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников.

## 2. Численное моделирование

Было проведено численное моделирование микросхемы на основе массива бикристаллических джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников встроенных в копланарную линию передач (рис. 1). Расчеты выполнялись с помощью программы Sonnet. Частота облучения микросхемы варьировалась в диапазоне от 0 до 20 GHz. В качестве материала подложки выбран фиаанит (YSZ) с диэлектрической проницаемостью 26 и толщиной 500  $\mu\text{m}$ .

Цепочка джозефсоновских контактов моделировалась меандром, который пересекает бикристаллическую границу (рис. 1). Ширина меандра изменялась в диапазоне от 10 до 16  $\mu\text{m}$ . Размеры копланарной линии передач были выбраны так, чтобы ее волновое сопротивление было равно 50  $\Omega$ . Импеданс нагрузки копланарной линии передач также был равен 50  $\Omega$ . Для уменьшения проникновения СВЧ-мощности в измерительный тракт было предложено использовать фильтр в виде высокоомных электродов.

На рис. 2 показаны коэффициенты прохождения  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  и коэффициент отражения  $S_{11}$  от микросхемы в зависимости от частоты СВЧ-сигнала. Сопротивление фильтра изменялось в процессе моделирования от 6 до 1000  $\Omega$ . Было показано, что в случае использования фильтров с сопротивлением 1000  $\Omega$  наблюдается хорошее прохождение  $S_{12}$  через цепочку джозефсоновских контактов и малый коэффициент прохождения  $S_{13}$  в порт 3. В этом случае СВЧ-мощность в цепочке джозефсоновских контактов распределена равномерно, что позволяет синхронизировать большее число контактов и таким образом увеличить величину выходного напряжения.

На рис. 3 показано распределение тока в джозефсоновской структуре. Как видно из рисунка, ток сконцентрирован вблизи краев центрального и боковых электродов копланарной линии. Поэтому для увеличения

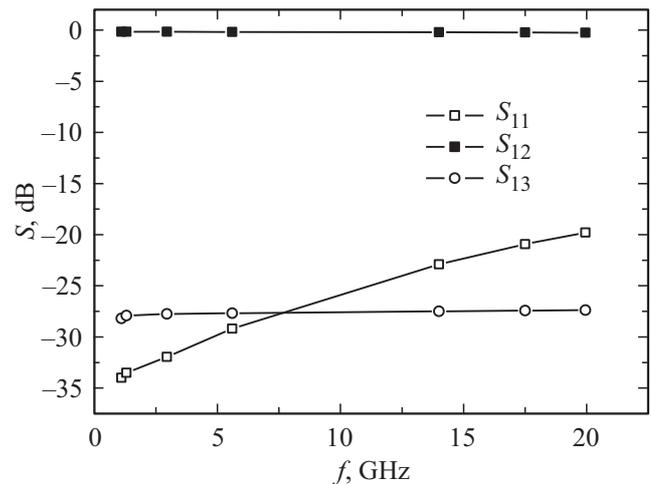


Рис. 2. Зависимость коэффициентов прохождения  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  и коэффициента отражения  $S_{11}$  от частоты облучения микросхемы  $f$ . Сопротивление электрода 1000  $\Omega$ .



Рис. 3. Распределение тока в джозефсоновских контактах, встроенных в копланарную линию передач.

тока в месте формирования джозефсоновских контактов ширина полоски центрального электрода копланарной линии была уменьшена до 20  $\mu\text{m}$ .

## 3. Образцы

На основе проведенных расчетов были изготовлены фотошаблоны микросхемы из 10 джозефсоновских контактов с шириной меандра 10  $\mu\text{m}$  (рис. 1). Для изготовления микросхем были выращены с-ориентированные пленки ВТСП YBCO толщиной 250–300 nm, которые затем покрывались тонким слоем золота толщиной 30 nm. Первая двухслойная структура была изготовлена на подложке  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с подслоем эпитаксиального оксида церия в ИФМ РАН *ex situ* с последующим отжигом при температуре 500  $^\circ\text{C}$  в атмосфере кислорода. Вторая структура на бикристаллической подложке YSZ была выращена в фирме Theva (Германия). Пленка золота в этом случае наносилась *in situ* при температуре 100  $^\circ\text{C}$  в одном вакуумном цикле с пленкой YBCO. Создание массивов джозефсоновских контактов из двухслойных

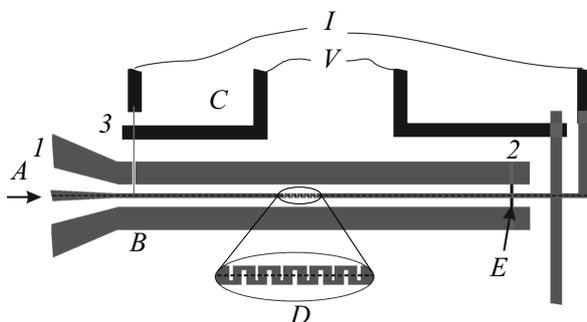


Рис. 1. Фотошаблон для массива джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников встроенных в копланарную линию передач (A — СВЧ-мощность; B — копланарная линия передач из YBCO/Au, C — электроды из NbN для пропускания тока и измерения напряжения; D — меандр, E — нагрузка). Пунктиром показана бикристаллическая граница. Цифрами указаны номера портов при моделировании.

структур YBCO|Au было выполнено с помощью стандартной фотолитографии и травления ионами аргона. Затем с помощью взрывной литографии были изготовлены высокоомные электроды и нагрузка из нитрида ниобия NbN толщиной 350 nm.

#### 4. СВЧ-зонд для облучения бикристаллических контактов

Для облучения бикристаллических контактов используется СВЧ-зонд. Герметичный корпус из нержавеющей стали зонда имеет СВЧ-вход, на который подается сигнал с генератора Agilent 8257D в диапазоне частот 9–20 GHz. Далее СВЧ-сигнал распространяется внутри зонда по коаксиальному кабелю и поступает через коаксиально-копланарный переход на копланарные линии держателя и микросхемы. Электрический контакт между этими линиями осуществлялся с помощью ультразвуковой сварки. Плата держателя изготовлена из фольгированного материала Arlon с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 10$ . Волновое сопротивление копланарной линии держателя рассчитано на 50  $\Omega$ . Для подачи токов смещения и измерения ВАХ микросхемы имеется несколько пар медных проводов на держателе микросхемы. Измерения проходят в сосуде Дьюара в диапазоне температур от 65 до 90 K. Снаружи зонд закрывается экраном из пермаллоя для защиты микросхемы от внешних магнитных полей. Перед измерениями внутрь корпуса напускается гелий, который обеспечивает эффективное охлаждение микросхемы при погружении зонда в жидкий азот, а также защищает образец от воздействия влаги при отогреве.

#### 5. Обсуждение экспериментальных результатов

Сначала были изучены транспортные свойства при температуре  $T = 77$  K микросхемы, изготовленной *ex situ*. Ток подавался на внешние электроды, а напряжение снималось с внутренних электродов (рис. 1). В этом случае в области малых токов наблюдается линейный участок ВАХ с сопротивлением порядка 50  $\mu\Omega$ , которое связано, по нашему мнению, с растеканием тока в слое золота в узком ВТСП-электроде шириной 4  $\mu\text{m}$ . Контакт между золотом и сверхпроводником в этом случае происходит в направлении оси  $c$ , поскольку для изготовления сверхпроводящей структуры были использованы  $c$ -ориентированные пленки YBCO. Используя формулу для сопротивления растекания  $R_s$  [12,15]:

$$R_s(d) = \frac{1}{w_0} \sqrt{\frac{\rho_c \rho_m}{d_m}} \exp\left(-\frac{d}{\sqrt{\rho_c d_m / \rho_m}}\right), \quad (1)$$

где  $w_0$  — ширина ВТСП-полоски,  $\rho_m$  — удельное сопротивление золота,  $d_m$  — толщина золота,  $d$  — расстояние между электродами тока и напряжения,

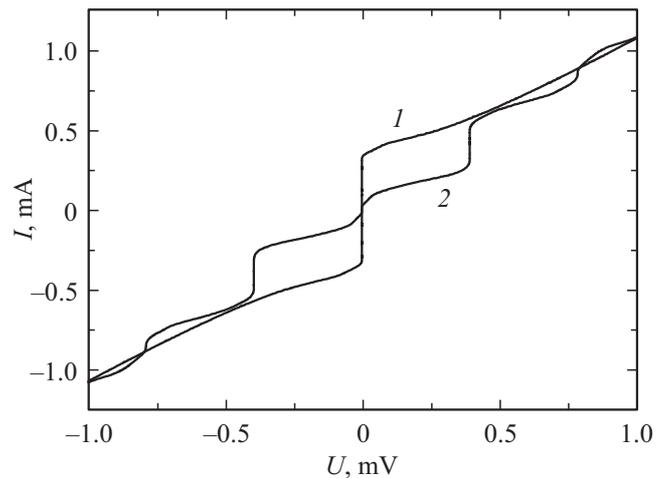


Рис. 4. ВАХ цепочки из 10 джозефсоновских контактов, изготовленных на бикристаллической подложке YSZ без облучения (кривая 1) и при облучении (кривая 2) сигналом на частоте  $f = 19.091$  GHz при температуре 81 K.

и считая, что  $\rho_m \approx 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ , можно оценить величину контактного сопротивления  $\rho_c \approx 1.4 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$  при температуре 77 K в случае образцов *ex situ*. Это значение  $\rho_c$  хорошо согласуется с данными по контактному сопротивлению интерфейса Au|YBCO, полученными в работе [16]. Величина длины растекания тока  $L = (\rho_c d_m / \rho_m)^{1/2}$  в этом случае равна примерно 7  $\mu\text{m}$ . Таким образом, для образца изготовленного *ex situ*, отсутствует участок на ВАХ со сверхпроводящим током из-за растекания тока в узком ВТСП-электроде.

Затем были изучены транспортные свойства микросхемы, изготовленной *in situ* на бикристаллической подложке при температуре  $T = 81$  K без облучения и при облучении СВЧ-сигналом. На рис. 4 показана ВАХ цепочки 10 джозефсоновских контактов, изготовленных на бикристаллической подложке без облучения СВЧ-сигналом при температуре 81 K. В этом случае на ВАХ наблюдается участок со сверхпроводящим током. Величина критического тока джозефсоновского контакта равна  $I_c = 0.4$  mA, а величина нормального сопротивления одного контакта равна  $R_n = 0.1 \Omega$ . Поскольку величина нормального сопротивления определяется в основном сопротивлением шунта, используя формулу для  $R_n$  [12]:

$$R_n = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{\rho_c \rho_m}{d_m}}, \quad (2)$$

где  $w$  — ширина меандра, можно определить величину контактного сопротивления. Считая, что ширина контакта  $w = 10 \mu\text{m}$ , получаем, что для этой структуры  $\rho_c \approx 3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$  при температуре 81 K. Величина длины растекания тока в этом случае равна 3  $\mu\text{m}$ .

На рис. 4 показана ВАХ цепочки 10 джозефсоновских контактов, изготовленных на бикристаллической подложке при облучении сигналом на частоте  $f = 19.091$  GHz при температуре 81 K. Из рисунка

видно, что при воздействии излучения на ВАХ наблюдается первая ступенька Шапиро при напряжении  $394.7 \pm 0.1 \mu\text{V}$  (рис. 4). Величина этого напряжения соответствует синхронизации цепочки из 10 джозефсоновских контактов внешним СВЧ-сигналом. Ширина участка по току первой ступени Шапиро, на котором напряжение постоянно  $394.7 \pm 0.1 \mu\text{V}$ , равна  $\Delta I_1 = 0.19 \text{ mA}$  ( $\Delta I_1/I_c \approx 0.5$ ).

Таким образом, из экспериментальных данных видно, что при величине контактного сопротивления  $\rho_c \approx 3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , во-первых, ВАХ имеет сверхпроводящий участок с высоким критическим током, а во-вторых, при облучении СВЧ-сигналом на ВАХ появляются ступени Шапиро. Что свидетельствует о высоком качестве полученных джозефсоновских переходов.

В дальнейшем планируется синхронизация большего количества контактов для увеличения выходного напряжения. Кроме этого, для работы при температурах жидкого азота необходимо уменьшение характерного напряжения джозефсоновских контактов за счет уменьшения сопротивления шунта. Также следует отметить, что, несмотря на высокое значение контактного сопротивления структур *ex situ*, этот метод остается также привлекательным с точки зрения более широких технологических возможностей. Поэтому в дальнейшем планируется получение структур *ex situ* с более низким контактным сопротивлением.

## 6. Заключение

Проведено численное моделирование и разработан дизайн микросхемы для массивов бикристаллических джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников, встроенных в копланарную линию передач. Показано, что структура, изготовленная *in situ*, имеет низкое значение контактного сопротивления, что позволяет получать шунтированные высококачественные джозефсоновские переходы из высокотемпературных сверхпроводников. Для структуры, изготовленной *in situ*, получена синхронизация цепочки из 10 джозефсоновских контактов внешним СВЧ-сигналом. Полученные результаты могут быть использованы для создания квантового генератора переменного напряжения на основе джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках госзадания ИФМ РАН 0030-2021-0020. В работе использовано оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“.

## 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, Y.M. Gryaznov, M.Y. Levichev, E.E. Pestov, M.A. Galin, V.Y. Maksimov. IEEE Trans. Instrum. Meas. **68**, 6, 2113 (2019).
- [2] F. Mueller, R. Behr, T. Weimann, L. Palafox, D. Olaya, P.D. Dresselhaus, S.P. Benz. IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 3, 981 (2009).
- [3] S.P. Benz, C.A. Hamilton. Appl. Phys. Lett. **68**, 22, 3171 (1996).
- [4] R. Monaco. J. Appl. Phys. **68**, 2, 679 (1990).
- [5] O.F. Keiler, J.K. Kohlmann, F. Muller. Supercond. Sci. Technol. **20**, 11, S318 (2007).
- [6] R. Behr, O. Kieler, J. Kohlmann, F. Muller, L. Palafox. Meas. Sci. Technol. **23**, 12, 124002 (2012).
- [7] O. Kieler, R. Wendisch, R.-W. Gerdau, T. Weimann, J. Kohlmann, R. Behr. IEEE Trans. Appl. Supercond. **31**, 5, 1100705 (2021).
- [8] A.C. Weis, N.E. Flowers-Jacobs, S. Berkowitz, H. Rogalla, S.P. Benz. IEEE Trans. Appl. Supercond. **30**, 7, 1400305 (2020).
- [9] A.M. Klushin, K.S. P'in, M. Siegel, M. Schubert, G. Wende, H.-G. Mayer. IEEE Trans. Appl. Supercond. **13**, 2, 606 (2003).
- [10] А.А. Голубов, М.Ю. Куприянов. ЖЭТФ **105**, 5, 1442 (1994).
- [11] R. Hahn, J. Klockau, G. Fotheringham. Supercond. Sci. Technol. **7**, 5, 290 (1994).
- [12] A. Klushin, A. Golubov, W. Prusseit, H. Kohlstedt. J. Low Temper. Phys. **106**, 3–4, 265 (1997).
- [13] Ф.В. Комиссинский, Г.А. Овсянников, З.Г. Иванов. ФТТ **43**, 5, 769 (2001).
- [14] S.C. Sanders, S.E. Russek, C.C. Clickner, J.W. Ekin. Appl. Phys. Lett. **65**, 17, 2232 (1994).
- [15] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин. ФТТ **59**, 11, 2113 (2017).
- [16] Е.А. Архипова, А.И. Елькина, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин. Материалы XXVI Междунар. симп. „Нанозеллектроника“ (14–17 марта, 2022 г.) **1**, 12 (2022).

Редактор Е.В. Толстякова