

02,13

## Влияние отжига на критический ток сверхпроводящих YBCO-мостиков, пересекающих бикристаллическую границу

© Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, Л.С. Ревин

Институт физики микроструктур РАН, ФИЦ „Институт прикладной физики Российской академии наук“, Нижний Новгород, Россия

E-mail: parafin@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Представлены результаты исследования влияния отжига на критический ток YBCO джозефсоновских переходов, полученных методом задающей маски на бикристаллической фанитовой подложке. Зафиксировано сильное, вплоть до пятикратного значения, увеличение критического тока джозефсоновских переходов в результате кратковременного отжига при температуре 500°C и давлении кислорода 27 Pa. Такие отжижки позволяют варьировать содержание кислорода в пленке YBCO в области слабой связи. Это открывает возможности по подбору необходимых параметров джозефсоновских переходов для конкретных прикладных задач.

**Ключевые слова:** джозефсоновские переходы, отжиг, YBCO.

DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53074.02NN

### 1. Введение

Нестационарный эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках нашел своё практическое применение в детектировании терагерцового (THz) излучения [1]; спектральном анализе поглощения и отражения различных веществ и электромагнитных структур [2,3]. Если джозефсоновский переход имеет высокие электрофизические характеристики и хорошо описывается моделью резистивно-шунтированного перехода, процедура восстановления спектра прохождения или отражения THz излучения может быть простой и однозначной. Кроме того, для достижения высокой чувствительности широкополосных детекторов в заданном диапазоне частот необходимо подбирать оптимальные параметры плотности критического тока ( $J_c$ ) и нормального сопротивления ( $R_n$ ) джозефсоновских переходов [4,5].

Для джозефсоновских YBCO-переходов на [100]-tilt бикристаллической подложке было показано, что низкотемпературный отжиг в атомарном кислороде воспроизводимо увеличивает критический ток и уменьшает отклонения ВАХ от модельных предсказаний [6]. В случае джозефсоновских переходов с разориентацией в плоскости [001] из-за неоднородного барьера имеющиеся данные не были столь воспроизводимыми и стабильными. В работе [7] было показано, что при отжиге бикристаллических переходов значения характеристического напряжения остаются прежними. С другой стороны, в работе [8] снижение характеристического напряжения на 30% и трехкратное уменьшение сопротивления в нормальном состоянии после отжига было обнаружено для аналогичных переходов.

В настоящей работе исследовалась возможность управления величиной  $J_c$  джозефсоновских переходов, изготовленных на бикристаллических подложках  $Zr_{1-x}Y_xO_2$  (YSZ — фанит) с симметричной границей и углом разориентации 24° в плоскости [001].

### 2. Особенности изготовления структуры и методика измерений

Исследуемые YBCO-мостики изготавливались следующим образом. Первоначально на исходную бикристаллическую подложку YSZ методом лазерного напыления наносился подслоу эпитаксиального диоксида церия ( $e\text{r}\text{iCeO}_2$ ). Затем на подложке методом задающей маски (ЗМ), который подробно описан в наших предыдущих работах (см., например, [9]), формировалось три ряда мостиков. Ширина мостиков: 5; 7; 10 и 50  $\mu\text{m}$ . Первый и третий ряды были расположены на монокристаллических частях подложки („берегах“). Мостики среднего (второго) ряда пересекали бикристаллическую границу и, таким образом, включали область слабой связи, с пониженными величинами  $J_c$  и критической температуры ( $T_c$ ). Напыление пленки YBCO осуществлялось методом магнетронного распыления стехиометрической мишени [10] и проходило в два этапа. После первого напыления толщина пленки составила 100 nm, после второго — 200 nm. Здесь следует особо отметить, что используемый нами метод ЗМ позволяет, как и в данном случае, изучать зависимость электрофизических параметров мостиков с фиксированными латеральными размерами от толщины пленки YBCO, так как топологический рисунок структуры определяется при формировании ЗМ перед первым напылением YBCO и при

последующих циклах напыления не изменяется [11]. Серебряные омические контакты к мостикам напылялись через маску методом термического испарения.

После каждого напыления YBCO проводились отжиги полученной структуры при температуре  $T = 500^\circ\text{C}$  и давлении кислорода 27 Па в течение 5 min. После чего в камеру отжига напускался кислород до атмосферного давления, и структура остывала до комнатной температуры.

Измерения величины  $J_c$  мостиков при температуре  $T = 77\text{ K}$  проводились как непосредственно после напыления YBCO, так и после отжигов. В этой части эксперимента промежуток времени между измерениями составлял не более двух суток. Поскольку важной характеристикой YBCO-структур является временная стабильность их электрофизических параметров, то заключительные измерения были проведены после хранения исследуемого образца в течение 200 дней в чашке Петри („старение“).

Тестирование мостиков проводилось в измерительной вставке, помещенной в транспортный сосуд Дьюара с жидким азотом. Так как вставка не экранировалась от магнитного поля, измеряемый критический ток мостика, пересекающего бикристаллическую границу, сильно менялся в зависимости от его ориентации относительно магнитного поля Земли. При перемещении вставки в сосуде Дьюара получалось семейство ВАХ с различными значениями критического тока. За величину критического тока мостика было принято его максимальное, для каждого семейства ВАХ, значение.

Кроме того, для более полной характеристики полученного образца было проведено исследование его поверхностной морфологии методом сканирующей электронной микроскопии. Использовался электронный микроскоп CarlZeiss EVO 10.

### 3. Обсуждение полученных результатов

На рисунке представлено изображение во вторичных электронах одного из мостиков исследуемой структуры. Пленка YBCO имеет развитый рельеф поверхности, в ней присутствуют преципитаты  $\text{CuO}$  — светлые частицы неправильной формы с размерами  $\sim 0.5\ \mu\text{m}$  на поверхности пленки, и  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , которые образуются на поверхности подложки и на фото видны как поры, так как пленка YBCO не растет поверх таких выделений [12]. Как давно и хорошо известно, наличие таких преципитатов характерно для пленок YBCO с высокими электрофизическими характеристиками [13]. Действительно, полученный образец имеет весьма высокие значения  $T_c$  и  $J_c$  (см. ниже). В частности, критическая температура пленки YBCO на „берегах“ после обоих циклов напыления  $T_c \sim 88.5\text{ K}$ . После отжигов она повышалась до  $T_c \sim 89.5\text{ K}$ . При этом отношение сопротивления

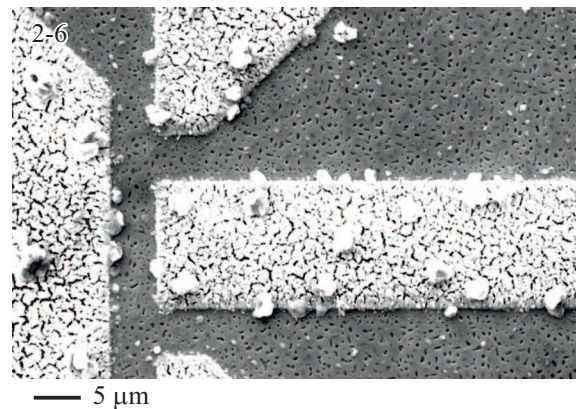


Фото YBCO-мостика шириной  $5\ \mu\text{m}$  после второго цикла напыления (толщина пленки  $200\ \text{nm}$ ), полученного методом ЗМ. Пленка сверхпроводника растет на подложке  $\text{epiCeO}_2/\text{YSZ}$  в окнах задающей маски — темная область. Светлые области — изолятор, сформировавшийся при осаждении YBCO на маску из аморфного диоксида церия [9]. Увеличение 15 500. Серебряные контакты находятся за пределами области сканирования.

мостиков при температуре  $300\text{ K}$  к сопротивлению при температуре  $100\text{ K}$  параметр  $\gamma \sim 3$ .

В табл. 1 представлены характерные величины критического тока и плотности критического тока для трех мостиков разной ширины, пересекающих бикристаллическую границу. Видно, что повышение критического тока при используемых режимах отжига очень существенно — может быть пятикратным и более для мостиков  $7$  и  $10\ \mu\text{m}$  после первого напыления YBCO и составляет минимум 25% для мостика  $50\ \mu\text{m}$  после второго напыления. Далее, как видно из табл. 1, для мостика  $50\ \mu\text{m}$  влияние отжига в целом менее значительно, чем для более узких мостиков. Отметим при этом, что полученные величины критического тока  $1.25 \cdot 10^5\ \text{A/cm}^2$  для мостиков шириной  $7$  и  $10\ \mu\text{m}$  сопоставимы с лучшими мировыми результатами для джозефсоновских переходов на бикристаллических подложках с такой разориентацией [14]. Деграция критического тока мостиков в результате „старения“ — длительного „отжига“ при комнатной температуре также наиболее заметна у мостиков меньшей ширины: уменьшение в 3.6 раза у мостика  $7\ \mu\text{m}$ , в 4 раза у мостика  $10\ \mu\text{m}$ , и в 2.1 раза у мостика  $50\ \mu\text{m}$ .

В табл. 2 для сравнения представлены величины критического тока двух контрольных мостиков, расположенных вне бикристаллической границы. Видно, что влияние отжигов на эти мостики существенно меньше — максимум 16% для мостика шириной  $7\ \mu\text{m}$  после первого напыления YBCO. Кроме того, видно, что пленка вне слабой связи достаточно стабильна — падение плотности критического тока мостика шириной  $7\ \mu\text{m}$  за время хранения составило  $\sim 6\%$ .

Максимальные значения плотности критического тока для мостиков, пересекающих границу, были получены после второго отжига (толщина пленки YBCO  $200\ \text{nm}$ ),

**Таблица 1.** Характеристики мостиков, пересекающих бикристаллическую границу

Последовательность операций	Критический ток, mA / Плотность критического тока, $10^5$ A/cm <sup>2</sup>		
	Мостик 7 $\mu$ m	Мостик 10 $\mu$ m	Мостик 50 $\mu$ m
1. Напыление YBCO (Толщина 100 nm)	0.15/0.21	0.18/0.18	2.25/0.43
2. Отжиг	0.75/1.07	1.0/1.0	3.0/0.59
3. Напыление YBCO (Толщина 200 nm)	1.0/0.71	1.5/0.75	5.3/0.51
4. Отжиг	1.75/1.25	2.5/1.25	7.3/0.7
5. „Старение“	0.49/0.35	1.0/0.45	3.5/0.34

**Таблица 2.** Характеристики мостиков вне бикристаллической границы

Последовательность операций	Критический ток, mA / Плотность критического тока, $10^6$ A/cm <sup>2</sup>	
	Мостик 5 $\mu$ m	Мостик 7 $\mu$ m
1. Напыление YBCO (Толщина 100 nm)	24/4.8	34/4.9
2. Отжиг	27/5.4	40/5.7
3. Напыление YBCO (Толщина 200 nm)	47/4.7	66/4.7
4. Отжиг	48/4.8	69/4.9
5. „Старение“	–	65/4.6

а для мостиков, расположенных на берегах, — после первого отжига (толщина пленки YBCO 100 nm). Отметим также, что абсолютные значения плотности критического тока мостиков на „берегах“ —  $\sim 5 \cdot 10^6$  A/cm<sup>2</sup> при  $T = 77$  K высоки, т.е. исследуемая структура была получена в технологическом режиме, обеспечивающем оптимальные электрофизические характеристики пленки YBCO вне области слабой связи.

Таким образом, из приведенных в табл. 1 и 2 результатов можно заключить, что динамика изменения плотности критического тока в результате отжига  $T = 500^\circ\text{C}$  и при хранении радикально отличается для мостиков, пересекающих бикристаллическую границу, и для мостиков, расположенных на „берегах“ — вне бикристаллической границы. Можно предположить, что наблюдаемая динамика определяется высокой подвижностью кислорода в пленке YBCO вблизи бикристаллической границы, т.е. в области с нарушенной кристаллической структурой. Причем наблюдаемая зависимость степени влияния отжига от ширины мостика свидетельствует, что диффузия кислорода происходит как перпендикулярно поверхности пленки, так и вдоль границы. Кристаллическая структура приграничной области, по видимому, совершенствуется при увеличении толщины пленки от 100 до 200 nm. С этим может быть связано

заметное уменьшение после второго цикла осаждения YBCO степени влияния отжига на критический ток мостиков, пересекающих бикристаллическую границу, а также максимальные при этом значения плотности критического тока у этих мостиков.

#### 4. Заключение

Обнаружено сильное влияние кратковременного (5 min) отжига при температуре  $T = 500^\circ\text{C}$  и давлении кислорода 27 Pa (с последующим повышением до атмосферного давления) на параметры YBCO мостиков, пересекающих бикристаллическую границу. Критический ток такого джозефсоновского перехода в результате отжига может возрастать в несколько раз. Для более узких (7 и 10  $\mu$ m) мостиков влияние такого отжига более значительно, чем для широких (50  $\mu$ m). Отжиг в описанном режиме сопровождается интенсивной диффузией кислорода вдоль слабой связи сверхпроводящих „берегов“ и изменяет область границы, не оказывая существенного влияния на сами „берега“, которые сохраняют высокие сверхпроводящие характеристики. Поэтому такой отжиг приводит к значительному увеличению критического тока джозефсоновских переходов,

что может быть использовано для управляемого подбора параметров джозефсоновских переходов.

Вместе с тем, высокая подвижность кислорода в области слабой связи приводит и к более быстрой деградации критического тока мостиков, пересекающих бикристаллическую границу, по сравнению с мостиками вне границы. При увеличении толщины YBCO пленки чувствительность критического тока к отжигу снижается как для мостиков на „берегах“, так и, особенно, для мостиков со слабой связью. По-видимому, это связано с уменьшением по мере роста пленки ширины области с нарушенной кристаллической структурой вблизи бикристаллической границы.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-79-10384. В работе использовалось оборудование ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] O. Volkov, V. Pavlovskiy, I. Gundareva, R. Khabibullin, Y. Divin. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. **11**, 330, (2021).
- [2] Y.Y. Divin, U. Poppe, I.M. Kotelyanskii, V.N. Gubankov, K. Urban. J. Comm. Techn. Electron. **53**, 1137, (2008).
- [3] O.Y. Volkov, Y.Y. Divin, V.N. Gubankov, I.I. Gundareva, V.V. Pavlovskiy. J. Comm. Techn. Electron. **54**, 1310, (2009).
- [4] V.V. Pavlovskiy, I.I. Gundareva, O.Y. Volkov, Y.Y. Divin. Appl. Phys. Lett. **116**, 082601, (2020).
- [5] В.В. Широков, Ю.Я. Дивин. ПЖТФ **12**, 79, (2004).
- [6] Y.Y. Divin, M.V. Lyatti. J. Phys. Conf. Ser. **97**, 012223, (2008).
- [7] M. Kawasaki, P. Chaudhari, A. Gupta. Phys. Rev. Lett. **68**, 1065, (1992).
- [8] J.P. Sydow, M. Berninger, R.A. Buhrman, B. H. Moeckly, Supercond. Sci. Technol. **12**, 723, (1999).
- [9] D.V. Masterov, A.E. Parafin, L.S. Revin, A.V. Chiginev, E.V. Skorokhodov, P.A. Yunin, A.L. Pankratov. SUST **30**, 2, 025007, (2017).
- [10] Ю.Н. Дроздов, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин. ЖТФ **85**, 109, (2015).
- [11] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин. ЖТФ **90**, 10, 1677, (2020).
- [12] Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников /Под ред. А. Гояла. ЛКИ, М. (2009). С. 142.
- [13] E. Waffenschmidt, K.H. Waffenschmidt, F. Arndt, E. Boeke, J. Musolf, X. He, M. Neuken, K. Heime. J. Appl. Phys. **75**, 8, 4092, (1994).
- [14] H. Hilgenkamp, J. Mannhart. Rev. Mod. Phys. **74**, 2, 485, (2002).

Редактор Д.В. Жуманов