

05.4

Новый тип металлоксидных бикристаллических джозефсоновских переходов с высокими критическими параметрами

© И.М. Котелянский, И.В. Борисенко, А.В. Шадрин,
Г.А. Овсянников, В.А. Лузанов, Ф.В. Комиссинский

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
E-mail: imk216@ire216.msk.su
Чалмерский технологический университет, S 41296, Гетеборг, Швеция

Поступило в Редакцию 28 сентября 2004 г.

Предложен и исследован новый тип пленочных бикристаллических джозефсоновских переходов из металлоксидного высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, у которого в отличие от переходов известных типов рабочие поверхности, расположенные по разные стороны бикристаллической границы, различаются кристаллографической ориентацией. Одна из них — (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, а другая — разориентирована относительно нее на асимметричный бикристаллический угол вокруг направления, лежащего в плоскости подложки. Представлены результаты исследований основных электрофизических и динамических (СВЧ) параметров переходов такого типа, изготовленных на соответствующих бикристаллических подложках NdGaO_3 с углами разориентации от 13 до 28°. Получены высокие значения критических параметров при $T = 77\text{ K}$: плотности критического тока $I_C = (2 \div 5) \cdot 10^5\text{ A/cm}^2$ и характерного напряжения $V_C = I_C R_N = 0.6 \div 0.9\text{ mV}$. Отмечаются преимущества предлагаемого типа бикристаллических джозефсоновских переходов перед известными.

Согласно современным моделям джозефсоновского бикристаллического перехода [1–3], относительно большие значения сверхпроводящего параметра порядка металлоксидных сверхпроводников (МОСП) создают предпосылки для создания переходов с высоким, до нескольких милливольт при температуре жидкого азота, характерным напряжением V_C . А это напряжение, как известно, определяет сигнальные и шумовые параметры джозефсоновских устройств. Однако в уже хорошо изученном и до недавнего времени единственном используемом типе

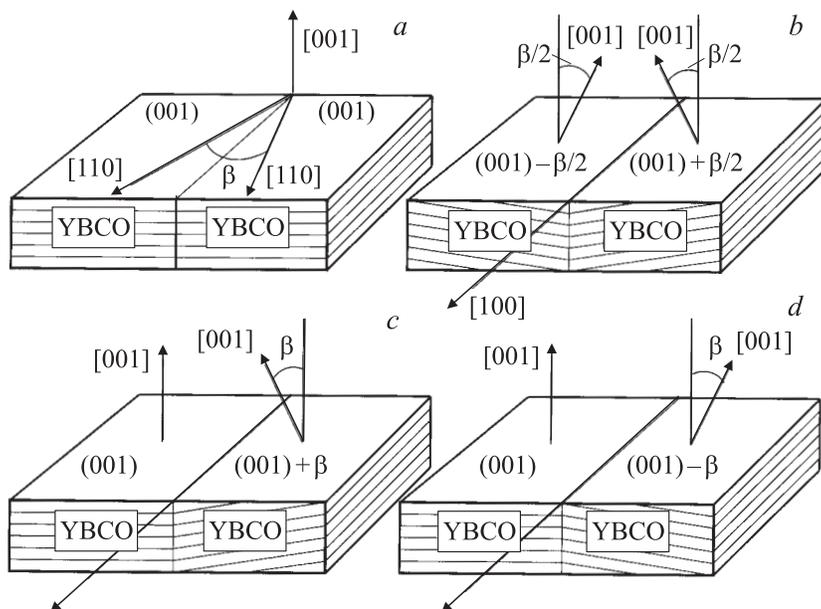


Рис. 1. Типы бикристаллических переходов: *a* — плоскостной бикристаллический переход (ПБП); *b* — наклоненный переход с симметричным бикристаллическим углом (НБП); *c* — наклоненный переход с асимметричным бикристаллическим углом ($+\beta$) (НАБП); *d* — наклоненный переход с асимметричным бикристаллическим углом ($-\beta$) (НАБП).

металлоксидных бикристаллических переходов реально получаемые значения V_C при $T = 77\text{ K}$ не превышают $300\ \mu\text{V}$ [4]. У переходов этого типа рабочие поверхности, расположенные по разные стороны бикристаллической границы, имеющие одинаковую ориентацию (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и разориентированы на симметричный бикристаллический угол вокруг направления [001] $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (рис. 1, *a*). Характерная особенность такого типа переходов — разориентированные (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ лежат в одной плоскости, т.е. это плоскостной бикристаллический переход (ПБП). Недавно в [5,6] экспериментально показано, что в бикристаллических джозефсоновских переходах, у которых (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ также разориентированы на симметричный

бикристаллический угол, но вокруг направления $[100]$ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, лежащего в плоскости подложки (рис. 1, *b*), величина V_C может достигать 1.2 мВ при $T = 77$ К. Ориентация рабочих поверхностей переходов такого типа тоже одинаковая, но, естественно, отличается от (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Так как у этого типа переходов плоскости (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ наклонены друг к другу на бикристаллический угол, то его называют [5] наклоненный бикристаллический переход (НБП). К сожалению, указанный тип переходов обладает существенным недостатком, обусловленным анизотропностью электрофизических свойств его рабочих поверхностей. Это создает известные сложности при формировании заданной топологии электрической цепи из сверхпроводящих электродов и джозефсоновских микромостиков (например, контуров квантования СКВИДа).

В данной работе предложен новый тип пленочных бикристаллических джозефсоновских переходов из металлооксидного высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ и исследованы его основные параметры.

В отличие от известных, описанных выше типов переходов, у предлагаемого рабочие поверхности различаются кристаллографической ориентацией. Одна из них имеет ориентацию $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ — (001) , а другая разориентирована относительно (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ на асимметричный бикристаллический угол вокруг направления, лежащего в плоскости подложки (рис. 1, *c, d*). По аналогии с [5] назовем предлагаемый тип перехода: наклоненный асимметричный бикристаллический переход (НАБП).

Для определения перспективности наклоненных асимметричных бикристаллических переходов проведены исследования их электрофизических и динамических (СВЧ) параметров для нескольких значений бикристаллического угла. С целью получения объективной оценки наряду с наклоненными асимметричными бикристаллическими переходами изготавливались и исследовались параметры уже известных типов переходов с симметричными углами разориентации: плоскостных и наклоненных. Все три типа переходов изготавливались по единой технологии из гетероэпитаксиальных пленок (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, выращенных на соответствующих каждому типу переходов бикристаллических подложках из NdGaO_3 с углами разориентации $\beta = 13 \div 28^\circ$. Подложки для всех типов переходов также изготавливались нами по одной технологии [7] и имели бикристаллические границы практически

одного качества. Оба типа наклоненных переходов разориентированы вокруг $[100]$ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Пленки МОСП толщиной 150 nm осаждались методом вакуумного катодного распыления мишени $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ стехиометрического состава на постоянном токе в кислороде при давлении 300–400 Pa и температуре подложки 780–800°C. Затем они охлаждались в течение 1.5 h в атмосфере кислорода. Гетероэпитаксиальные пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ имели критические температуры $T_C = 87\text{--}89$ K. Пересекающие бикристаллическую границу джозефсоновские мостики шириной $4\ \mu\text{m}$ и длиной $10\ \mu\text{m}$ формировались в сверхпроводящих пленках высокочастотным плазменным травлением в аргоне, с последующим химическим травлением в 0.5%-ном растворе брома в этиловом спирте [8].

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись в диапазоне температур от 4.2 до 77 K и при воздействии магнитного поля напряженностью до 100 Oe, а также электромагнитного монохроматического излучения частотой от 30 до 100 GHz. Для уменьшения влияния внешних электромагнитных полей использовались экранированная комната и фильтрация сигналов по всем проводам, присоединенным к исследуемому образцу.

Результаты проведенных измерений электрофизических параметров для трех типов джозефсоновских бикристаллических переходов приведены в таблице. Как видно из этой таблицы, при практически равных площадях поперечного сечения наклоненные типы переходов как с симметричными, так и предлагаемые нами с асимметричными бикристаллическими углами обладают при $T = 77$ K значительно (на порядок) более высокими критическими параметрами: плотностью критического тока $I_C = (2 \div 5) \cdot 10^5$ A/cm² и характерным напряжением $V_C = I_C R_N = 0.6 \div 0.9$ mV, чем таковые у хорошо изученных плоскостных переходов.

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики наклоненных асимметричного типа переходов с бикристаллическими углами 21 и 28°. Они имеют гиперболическую зависимость и аналогичны вольт-амперным характеристикам наклоненных переходов с симметричным бикристаллическим углом. Как известно [8,9], такая зависимость характерна для резистивной модели джозефсоновского перехода, в которой присутствуют два канала переноса тока: ток квазичастиц V/R_N и сверхпроводящий ток $I_S(\varphi) = I_C \sin \varphi$. Отметим, что у наклоненных переходов с асимметричным бикристаллическим углом так же, как

Электрофизические параметры планарных и наклоненных типов джозефсоновских бикристаллических переходов

Тип перехода	Бикристалл. угол β	N перехода	$T = 77 \text{ K}$			$T = 4.2 \text{ K}$		
			I_C , mA	R_N , Ω	V_C , mV	I_C , mA	R_N , Ω	V_C , mV
ПБП	24°	J1	0.035	0.9	0.032	1.6	0.9	1.4
		J2	0.047	2.1	0.1	1.7	1.9	3.2
		J3	0.065	0.5	0.032	3.7	0.6	2.2
ПБП	28°	J1	0.017	4.4	0.075	—	—	—
		J2	0.012	4.0	0.050	—	—	—
		J3	0.012	2.8	0.033	—	—	—
НБП	22°	J1	1.25	0.54	0.67	—	—	—
		J2	1.5	0.60	0.90	11	0.6	6.6
		J3	1.5	0.46	0.69	10	0.6	6.0
НБП	28°	J1	0.11	2.5	0.28	—	—	—
		J2	0.24	1.3	0.31	—	—	—
		J3	0.075	4.5	0.34	—	—	—
НАБП	21°	J1	2.6	0.33	0.87	—	—	—
		J2	1.71	0.4	0.68	—	—	—
		J3	1.5	0.41	0.69	—	—	—
НАБП	28°	J1	0.49	1.64	0.80	4.0	0.7	2.8
		J2	0.26	1.04	0.27	4.1	0.5	2.1
		J3	0.1	1.92	0.19	2.2	1.8	4.0

и у двух известных типов переходов, при разориентации, меньшей 18°, наблюдается вольт-амперная характеристика, отличающаяся от гиперболической формы и типичная для вязкого течения вихрей [9]. А при увеличении величины бикристаллического угла более 21° у этого типа переходов наблюдается уменьшение I_C . На вставке к рис. 2 приведены ВАХ в большем масштабе по напряжению. Видно, что у перехода с углом разориентации 21° при увеличении плотности тока более чем в 8 раз наблюдается увеличение сопротивления, которое наиболее вероятно вызвано разрушением сверхпроводящего состояния подводящих электродов, т.е. рабочий диапазон этого перехода задается соотношением $I_C < I < 8I_C$.

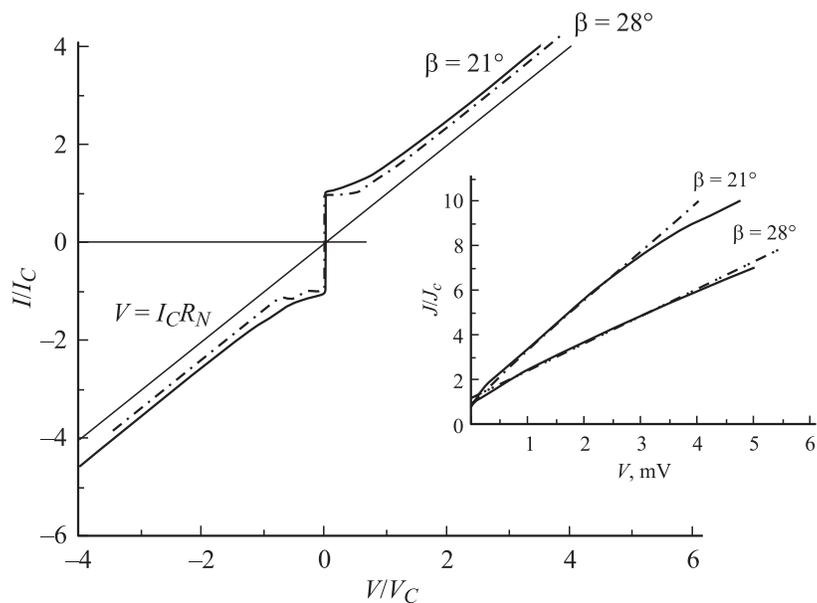


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики наклоненного асимметричного бикристаллического типа переходов с углами разориентации 21 и 28° при $T = 77$ К. Омическая прямая показана тонкой линией. На вставке приведены ВАХ в большем масштабе по напряжению. Пунктиром показаны асимптоты линейной части ВАХ.

У наклоненного асимметричного типа переходов критический ток I_C максимален при нулевых значениях напряженности магнитного поля, а при ее увеличении он уменьшается немонотонно, т.е. так же, как и у распределенных джозефсоновских переходов [9]. Исследования вольт-амперных характеристик такого типа переходов под воздействием монохроматического излучения миллиметрового диапазона $A \sin(2\pi f_c t)$, где $f_c = 56$ GHz показали хорошее соответствие динамических и измеренных на постоянном токе параметров переходов при $T = 77$ К. С понижением температуры наблюдается рост избыточного тока и увеличиваются отклонения от резистивной модели.

Результаты проведенных исследований основных параметров предложенного в данной работе нового типа бикристаллических переходов

свидетельствуют о возможности создания на их основе джозефсоновских переходов с высокими значениями критических параметров при $T = 77$ К: плотностью критического тока $I_C = (2 \div 5) \cdot 10^5$ А/см² и характерным напряжением $V_C = I_C R_N = 0.6 \div 0.9$ мВ, а следовательно, и перспективности их применения как в высокочастотной, так и низкочастотной сверхпроводниковой электронике.

Отметим, наклоненный асимметричный тип бикристаллических переходов лишен основных недостатков, присущих известным типам переходов. Как показано выше, по сравнению с плоскостным типом переходов он позволяет достигнуть при $T = 77$ К значительно лучших значений критических параметров. А в отличие от наклоненного симметричного типа переходов, одной из его рабочих поверхностей является практически изотропная (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, на которой можно изготавливать дополнительные элементы джозефсоновских устройств: фильтров, антенн, схемы задания питания и т.д.

Кроме того, переходы предлагаемого типа могут быть изготовлены не только на соответствующих бикристаллических подложках, но и на обычных подложках, в так называемом биэпитаксиальном исполнении. Для этого можно на основе известных критериев взаимных ориентаций при гетероэпитаксии (см., например, [10]) произвести соответствующий подбор материалов диэлектрического подслоя (подслоев) и подложки, а также ориентации подложки. До настоящего времени, несмотря на многочисленные исследования, удается изготавливать и исследовать биэпитаксиальные джозефсоновские переходы только с фиксированным значением бикристаллического угла, равным 45° , которое далеко от оптимального [11]. Как показывают наши оценки, наклоненный асимметричный тип бикристаллических переходов при его биэпитаксиальном исполнении может быть лишен этого существенного недостатка и сформирован с бикристаллическим углом, отличным от 45° и более близким к его оптимальному значению. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно, так как открывает реальные возможности создания биэпитаксиальных бикристаллических джозефсоновских переходов с высокими критическими параметрами на основе металлоксидных высокотемпературных сверхпроводников.

Авторы благодарны Ю.В. Кислинскому и К.И. Константиану за полезные обсуждения.

Работа выполнялась при частичной поддержке проектов РФФИ 04–02–16687 и 04–02–16818а, программ ИНТАС Европейского союза № 01–0809 и № 2001–0249, МНТЦ проект № 2369, гранта научных школ президента России НШ–1344.2003.2.

Список литературы

- [1] *Riedel R.A., Bagwell P.F.* // Phys. Rev. B. 1998. V. 57(10). P. 6084–6089.
- [2] *Barash Yu.S.* // Phys. Rev. B. 2000. V. 61(1). P. 678–688.
- [3] *Tanaka Y., Kashiwaya S.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 53 (18). P. R11 957-R11 960.
- [4] *Vale L.R., Ono R.H., Rudman D.A.* // IEEE Tr. Appl. Superconductivity. 1997. V. 7(3). P. 3193–3197.
- [5] *Poppe U., Divin Y.Y., Faley M.L., Wu J.S., Jia C.L., Shadrin P., Urban K.* // IEEE Tr. Appl. Superconductivity. 2001. V. 11(1). P. 3768–3771.
- [6] *Divin Y.Y., Kotelyanski I.M., Shadrin P.M., Jia C.L., Poppe U., Urban K.* // Book of Abstracts of 6 European Conference on Applied Superconductivity. 2003. P. 166.
- [7] *Дивин Ю.Я., Котелянский И.М., Губанков В.Н.* // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48 (10). С. 1238–1249.
- [8] *Овсянников Г.А., Борисенко И.В., Константиныч К.И., Маштаков А.Д., Степанцов Е.А.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25 (11). С. 65–72.
- [9] *Likharev K.K.* // Rev. Mod. Phys. 1979. V. 51(1). P. 101–159.
- [10] *Палатник Л.С., Папиров И.И.* Эпитаксиальные пленки. М.: Наука, 1971. С. 453.
- [11] *Tafari F., Carillo F., Lombardi F. et al.* // Supercond. Sci. Technol. 1999. V. 12. P. 1007–1009.