

05.4;11;12

©1995

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ ПЕРЕХОД, СФОРМИРОВАННЫЙ НА ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТУПЕНЬКЕ ИЗ ОКСИДА ЦЕРИЯ В ПРОЦЕССЕ РОСТА НА САПФИРОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

*И.М.Котелянский, А.Д.Маштаков, П.Б.Можжаев,
Г.А.Овсянников, Ю.М.Дикаев*

В последнее время интенсивно исследуются типы джозефсоновских переходов, в которых слабая связь образуется при пересечении мостиком, сформированным в эпитаксиальной пленке высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), специально созданной неоднородности подложки. Одним из методов создания такой неоднородности является формирование резкой ступеньки на поверхности подложки [1].

В настоящее время для формирования резкой ступеньки используется метод ионного травления, который, к сожалению, сопровождается появлением в протравленной поверхности нарушений кристаллической структуры и большой концентрации дефектов [2]. При эпитаксиальном росте ВТСП пленки эти дефекты приводят к ее неоднородности и возникновению в микромостике неконтролируемых паразитных сверхпроводящих контуров.

В настоящей работе впервые, насколько нам известно, мы сообщаем результаты по изготовлению и исследованию джозефсоновских переходов, полученных без использования ионного травления поверхности подложки. Ступени высотой 300 нм, с резким профилем, формировались из эпитаксиальной пленки оксида церия (CeO_2) в процессе ее роста на сапфировой подложке. Этот метод формирования ступеньки позволяет получать практически бездефектными поверхность боковой грани и подложки. Кроме того, он позволяет формировать ступеньку из материала, отличного от материала подложки.

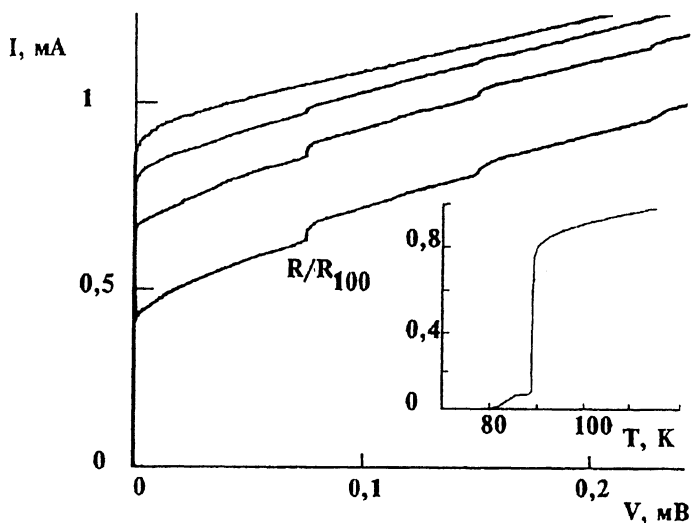
Формирование ступеньки осуществлялось следующим способом. Вначале на всю поверхность сапфировой подложки ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) с ориентацией (1102) методом электронно-лучевого напыления осаждалась эпитаксиальная "защитная пленка" CeO_2 ориентацией (001) и толщиной 30–50 нм [3]. Она предотвращала диффузию атомов алюминия из сапфи-

ровой подложки в пленку ВТСП в процессе ее эпитаксиального роста при высокой температуре. Затем на слоистой структуре $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ формировалась маска, через которую методом электронного лучевого испарения осаждалась эпитаксиальная пленка CeO_2 толщиной, равной заданной высоте ступеньки. Маска выдерживала без изменения своей геометрической формы температуры выше 800°C (температуры эпитаксиального роста пленки CeO_2) и легко удалялась химическим растворением, без нарушений поверхности подложки и сформированной ступеньки. Рисунок в маске создавался с помощью одного из трех способов: обычной контактной фотолитографией, взрывной фотолитографией или методом двухслойной "подвесной" маски [4].

Исследования на рентгеновском дифрактометре показали четкую ориентацию пленок CeO_2 . Полуширина пика (002) равна $(\Delta 2\theta) = 0.083^\circ$, что свидетельствует о хорошей кристаллической структуре CeO_2 . Постоянная решетки пленки CeO_2 , определенная по пику (002) $c = 5.387 \text{ \AA}$, хорошо соответствует табличному значению. Толщина пленки CeO_2 , определенная по формуле $d = \lambda / ((\Delta 2\theta) \cos \theta)$, дает значение 110 нм, что определяется усредненной толщиной $d = (d_b + d_s) / 2 = 165 \text{ нм}$, где $d_b = 30 \text{ нм}$ — толщина защитного слоя и $d_s = 300 \text{ нм}$ — высота ступени. Исследования на микроскопе атомных сил показали, что усредненный угол наклона ступени к плоскости подложки в большинстве случаев превышает 60° [5].

Сверхпроводящие пленки из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) толщиной 100–150 нм напылялись в разряде постоянного тока при высоком давлении кислорода [6]. Температура в процессе напыления поддерживалась около 800°C , давление кислорода составляло 4 мбар. По окончании напыления пленки отжигались в течение 1 ч. при температуре 400°C в атмосфере кислорода. Джозефсоновские переходы изготавливались с применением обычной фотолитографии травлением через маску из фоторезиста узких мостиков из YBCO пленки. Мостики шириной 4 и 10 мкм изготавливались как в направлении поперек ступеньки, так и на гладких сторонах поверхности. Все электрические измерения проводились по четырехточечному методу.

Проведенные тесты сверхпроводящих свойств YBCO пленок на гладкой поверхности показали, что критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние лежит в диапазоне 90 К, ширина сверхпроводящего перехода менее 1 К. Плотность критического тока пленок при $T = 77 \text{ К}$ превышала $5 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$. Те же измерения, проведенные для мостиков, пересекающих ступеньку, показали, более низкую температуру сверхпроводящего перехода $T_c \approx 80 \text{ К}$. Как видно из температурной зависимости сопротивления пленки (см. вставку на рисунке), имеется плато между 80 и 89 К с



Автономная ВАХ YBCO мостика, пересекающего ступеньку из CeO_2 (1), при $T = 4.2$ К и семейство ВАХ (2-4) при воздействии микроволнового излучения частотой 37 ГГц и мощностью 5 мВт при различных затуханиях в тракте 40, 35, 26 дБ соответственно. На вставке приведена зависимость его сопротивления от температуры.

конечным значением сопротивления, в районе которого берега YBCO пленки по обе стороны ступеньки находятся в сверхпроводящем состоянии, в то время как участок пленки, лежащий на склоне ступеньки, еще находится при этих температурах в резистивном состоянии.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных переходов приведены на рис. 1. При $T = 4.2$ К плотность критического тока составила $2.5 \cdot 10^4$ А/см², характеристическое напряжение $V_0 = I_c R_N = 500$ мкВ, где R_N — нормальное сопротивление, а I_c — критический ток. Кроме автономных ВАХ на рисунке показаны также ВАХ, записанные при внешнем СВЧ облучении на частоте 37 ГГц. На ВАХ при больших напряжениях $V > 2$ мВ наблюдается превышение экспериментальных значений тока над асимптотическими значениями: $I = V/R_N$ — избыточный ток, характерный для сверхпроводящих слабых связей с непосредственной (нетуннельной) проводимостью. Отсутствие на ВАХ участков со скачкообразным увеличением дифференциального сопротивления, характерных для последова-

тельно соединенных слабых связей с различающимися критическими токами, говорит о том, что реализован случай одиночной межкристаллической границы, обеспечивающей слабую связь в пленке. Ступеньки Шапиро на ВАХ при внешнем СВЧ воздействии, появляющиеся при соответствующих гармоникам частоты этого воздействия напряжениях, демонстрируют наличие джозефсоновской связи в межкристаллической границе. Следует, однако, отметить, что максимальная высота ступенек Шапиро примерно в пять раз меньше, чем следует из резистивной модели джозефсоновского перехода, применимой к слабым связям с непосредственной проводимостью.

Таким образом, нами впервые получены джозефсоновские переходы на ступеньки их эпитаксиальной пленки CeO_2 , сформированной в процессе ее осаждения через маску на сапфировой подложке. Отличие амплитуды ступенек Шапиро от предсказанных в резистивной модели, вероятно, обусловлено неоднородностью края ступеньки в плане из-за используемой для формирования рисунка фотолитографической маски.

Авторы благодарны Ю. Бойкову и К. Константиану за полезное обсуждение результатов исследований. Д. Зртцу за измерения ступенек с помощью микроскопа атомных сил и Ф. Крах за помощь в проведении измерений на сканирующем электронном микроскопе. Работа частично финансировалась Государственной программой России "Актуальные направления физики конденсированного состояния", направление "Сверхпроводимость", проектом ИНТАС Европейского союза и программой Российско-шведского сотрудничества Министерства науки России.

Список литературы

- [1] *Friedl G., Roas B., Romheld M., Jutzi W.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. P. 2751-2755.
- [2] *Jia C.L., Kabius B., Urban K. et al.* // Physica. C. 1992. V. 196. P. 211-221.
- [3] *Kotelyanskii I.M., Kavchenko V.B., Lebedev V.Yu. et. al.* // Applied Superconductivity / ed. H.C. Freyhardt, DGM Informationssgesellschaft. 1993. V. 1. P. 425-426.
- [4] *Howard R.E.* // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. P. 1034-1035.
- [5] *Kotelyanski I.M., Mozhaev P.B., Mashtakov A.D., Ovsyannikov G.A., Dikaev Yu.M., Ertz D.* // Europ. Conf. on Appl. Superc. 1995. EUCAS'95. report 243B9.
- [6] *Mozhaev P.B., Ovsyannikov G.A., Polyakov S.N., Kov'ev E.K.* // Europ. Conf. on Appl. Superc. 1995. EUCAS'95. report 253B2.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Москва
Физический факультет МГУ
Москва

Поступило в Редакцию
7 июня 1995 г.