

05.4; 11; 12

© 1991

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}/Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$   
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫВ.А. Воронин, И.А. Годованик,  
В.Н. Голубев, М.Н. Дроздов,  
А.Ю. Климов, Е.Б. Ключенков,  
Е.Н. Салашенко

Одним из наиболее актуальных направлений в разработке криоэлектронных устройств на основе высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) материалов является развитие методов получения слоистых структур типа  $SIS$ ,  $SNS$ . При этом малая длина когерентности в ВТСП материалах обуславливает большую сложность изготовления многослойных джозефсоновских структур. Наибольших успехов в этом направлении удалось достичь при использовании в паре с  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  в качестве несверхпроводящего слоя полупроводника  $Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  [1], который также имеет перовскитоподобную структуру с параметрами решетки, близкими к параметрам  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  (рассогласование меньше 1.5%). Структура и свойства полученных сверхрешеток и гетероструктур типа  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}/Y_2Pr_{1-y}Ba_2Cu_3O_{7-x}$  описаны в работах [2-5]. Об успешном применении прослойки  $Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  толщиной  $\sim 100 \text{ \AA}$  при изготовлении джозефсоновского контакта с контролируемыми характеристиками сообщено в [6].

В данной работе методами дифракции электронов и Оже-спектроскопии исследованы полученные *in situ* импульсным лазерным напылением двухслойные и многослойные эпитаксиальные гетероструктуры типа  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}/Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  с толщинами слоев от 100 до 3000  $\text{ \AA}$ .

Формирование гетероструктур на нагретых до 700°C подложках  $SrTiO_3$  и  $ZrO_2$  осуществлялось послойным осаждением продуктов испарения двух керамических мишеней  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  и  $Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ , поочередно облучаемых эксимерным лазером  $KrF$  ( $\lambda = 248 \text{ нм}$ ,  $E_{\text{имп}} = 0.3 \text{ Дж/имп}$ ,  $\nu = 1-30 \text{ Гц}$ ) при давлении кислорода в камере во время напыления  $\sim 10^{-1} \text{ Тор}$ . С применением защитных масок в процессе послойного осаждения были сформированы гетероструктуры, имеющие открытые участки поверхности всех внутренних слоев. На таких гетероструктурах измерялись электрические характеристики внутренних слоев и исследовалась их структура методом электронной дифракции на отражение.

Из электронограмм (рис. 1, а, б) видно, что слои при толщинах от 200 до 3000  $\text{ \AA}$  в многослойных гетероструктурах имеют совершенную структуру с ориентацией оси  $\bar{c}$  по нормали к поверх-

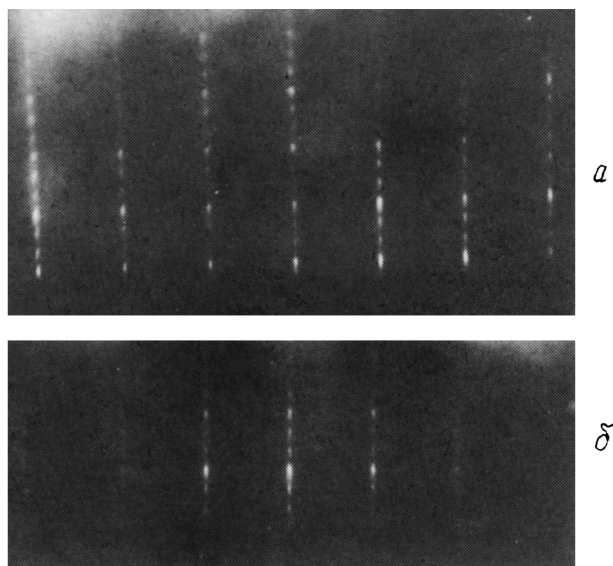


Рис. 1. Электронограммы на отражение пленок  $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$  в двухслойных структурах. а -  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (200 Å) /  $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$  (1500 Å) /  $SrTiO_3$ ; б -  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (1400 Å) /  $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$  (2000 Å) /  $ZrO_2$ .

ности подложки. При этом необходимо отметить, что размер зерен и разориентация направления оси  $\vec{c}$  зависят от режима формирования данной гетероструктуры.

Гетероструктуры с толщинами слоев от 100 до 300 Å были исследованы методом Оже-анализа на спектрометре ЭСО-3-03. Ускоряющее напряжение на электронной пушке  $U_e$  составляло 3 кВ, ток 0.3 мкА, диаметр пучка  $\sim 5$  мкм. Послойное стравливание осуществлялось ионами  $Ar^+$ ,  $U_i = 1$  и 2 кВ, скорость распыления и глубина разрешения определялись из дополнительных измерений на слоях известной толщины. На рис. 2, а приведено распределение  $Pr$  в двухслойной структуре  $Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x} / Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  с толщиной слоев  $d_{Pr} \sim 150$  Å,  $d_Y \sim 1000$  Å. Распределение  $Y$  не показано из-за перекрытия пиков  $Y$  (127 эВ) и  $Pr$  (119 эВ). Согласно рис. 2, а, толщина переходного слоя составляет 15–20 Å, а поскольку эта величина практически совпадает с глубиной выхода Оже-электронов с энергией 700 эВ [7], реальное взаимопроникновение слоев не превышает 5–10 Å. На рис. 2, б приведено распределение элементов  $Pr$ ,  $Ba$ ,  $Cu$ ,  $O$  в пятислойной структуре  $Pr.../Y.../Pr.../Y.../Pr.../SrTiO_3$  с толщиной слоев

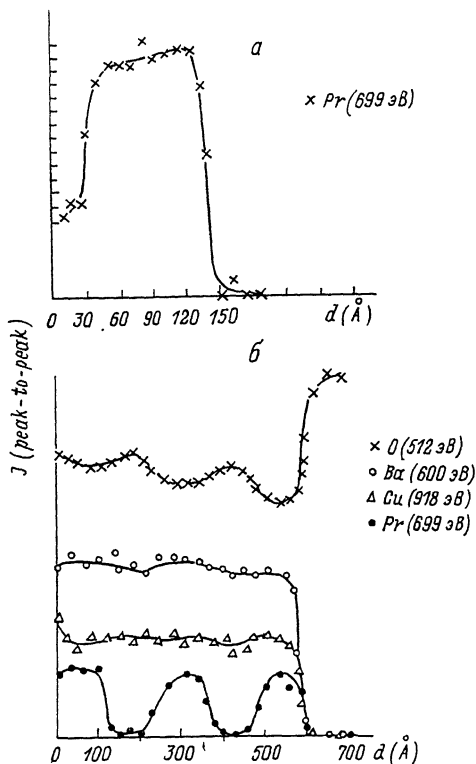


Рис. 2. Распределение элементов в структурах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  /  $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$ . а - двухслойная структура,  $U_i = 1$  кВ, скорость распыления  $S = 5$  Å/мин; б - пятислойная структура,  $U_i = 2$  кВ,  $S = 12$  Å/мин.

$\sim 120$  Å полученное при ускоряющем напряжении  $U_i = 2$  кВ. Для этого режима травления глубина разрешения спектрометра  $\Delta z$  остается постоянной по всей толщине структуры  $d \sim 600$  Å, хотя ее величина  $\Delta z$  (40–50 Å) оказывается несколько больше, чем при  $U_i = 1$  кВ. Как видно из рис. 2, б, данная структура имеет четкую периодичность слоев, однако толщина переходных областей, определяемая в этом случае артефактами ионного распыления, увеличивается до 40–50 Å и совпадает с  $\Delta z$ . Стехиометрия слоев  $YBaCuO$  соответствует составу 1–2–3–7.

Электрические характеристики поверхностных слоев  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в гетероструктурах с толщиной  $\geq 500$  Å, измерялись на сформированных фотолитографически мостиках шириной 20 мкм и

100 мкм. В качестве контактного материала использовалась термически напыленная пленка серебра. Контроль электрических характеристик внутренних слоев  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  гетероструктур проводился на мостиках, сформированных на открытых участках поверхности этих слоев.

При общей толщине гетероструктуры  $\leq 500 \text{ \AA}$  пленки  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  как в поверхностных, так и во внутренних слоях имели следующие характеристики:  $T(R=0) \geq 90 \text{ K}$ ,  $\Delta T \leq 1.5 \text{ K}$ ,  $J_c \geq 10^6 \text{ A/cm}^2$ .

Слои  $Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  обладают при температуре 90 К удельным сопротивлением на три порядка выше, чем у  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ , и имеют полупроводниковый ход зависимости  $R(T)$  до гелиевых температур.

Таким образом, приведенные в настоящей работе данные говорят о высоком структурном совершенстве слоев в гетероструктурах типа  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x} / Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ . Пленки  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x} > 500 \text{ \AA}$  обладают высокой токонесущей способностью во всех гетероструктурах, если полная толщина гетероструктуры не превышает  $5000 \text{ \AA}$ .

Развитый в настоящей работе метод получения эпитаксиальных гетероструктур положен в основу формирования защитных слоев  $PrBa_2Cu_3O_{7-x}$  для пленок  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$  толщиной  $< 600 \text{ \AA}$  и активно используется в работах по созданию джозефсоновского туннельного контакта с контролируемыми характеристиками.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] P o p p e U., P r i e t o P., S c h u b e r t J. et al. // Solid State Comm. 1989. V. 71. N 7. P. 569-572.
- [2] V e n k a t e s a n T., I n a n i A., D u t t a B. et al. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 4. P. 391-393.
- [3] W u X.D., X i X.X., L i Q. et al. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 56. N 4. P. 400-402.
- [4] E i b l O., H o e n i n g H.E., T r i s o n e J.-M. et al. // Phys. C. 1990. V. 172. N 3&4. P. 365-372.
- [5] E i b l O., H o e n i n g H.E., T r i s o n e J.-M. et al. // Phys. C. 1990. V. 172. N 3&4. P. 373-382.
- [6] G a o J., A a r n i n k W.A.M., G e r r i t s m a G.J., R o g a l l a H. // Phys. C. 1990. V. 171. N 1&2. P. 162-130.
- [7] Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бриггса и М.П.Сиха. М.: Мир, 1987. 598 с.

Поступило в Редакцию  
29 июня 1991 г.