

05.4

Улучшение сверхпроводящих параметров $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ пленок, выращенных на сапфире, при использовании буферного слоя титаната стронция

© Г.А. Овсянников, А.Д. Маштаков, П.Б. Можаяев,
Ф.В. Комиссинский, З.Г. Иванов, П. Ларсен

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия
Чалмерсский технический университет, г. Гетеборг, Швеция

Поступило в Редакцию 6 марта 1998 г.

Методом лазерного распыления получены пленки ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ на сапфире с использованием дополнительного буферного слоя из титаната стронция (гетероструктура $(100)\text{SrTiO}_3 / (001)\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x / (100)\text{CeO}_2 / (1\bar{1}02)\text{Al}_2\text{O}_3$) и исследованы ее сверхпроводящие характеристики. Показано, что за счет буферирования сапфира пленкой титаната стронция можно увеличить критическую температуру $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ пленок на два градуса и повысить в несколько раз плотность критического тока.

Титанат стронция SrTiO_3 (STO) является одним из лучших материалов подложек для роста эпитаксиальных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) пленок. Его кубическая кристаллическая решетка типа перовскита имеет параметр $a = 0.3904 \text{ nm}$, который мало ($< 2.5\%$) отличается от постоянных решетки a и b базовой плоскости ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO). Температурный коэффициент линейного расширения (КТР) STO, равный $9.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, также близок к КТР YBCO ($12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Недостатки титаната стронция — высокая диэлектрическая проницаемость, высокие СВЧ-потери — ограничивают его применение в микроволновой технике. Для этих целей наиболее подходящими являются подложки из сапфира и кремния, которые к тому же имеют значительно меньшую стоимость. При использовании этих материалов, однако, необходимо использовать защитные подслои, которые предотвращают диффузию атомов подложки в растущую ВТСП пленку. Одним из наиболее часто используемых материалов такого защитного подслоя при осаждении пленок YBCO на сапфировую под-

ложку является оксид церия CeO_2 , кубическая кристаллическая решетка которого (типа флюорита) имеет параметр $a = 0.541$ nm, менее чем на 1% отличающийся от трансляции вдоль направления $[110]$ YBCO. Как было показано ранее (см. например, [1–4]), на подложках $(1\bar{1}02)$ Al_2O_3 (r -плоскость) с тонким (30–50 nm) эпитаксиальным подслоем CeO_2 можно получать эпитаксиальные пленки YBCO (001) с высокими структурными и электрофизическими параметрами при температурах 700–770°C. Однако повышение температуры осаждения выше 800°C, обеспечивающее рост пленок наивысшего качества на подложках STO, ухудшает свойства пленки YBCO из-за химического взаимодействия между ВТСП пленкой и защитным подслоем CeO_2 [3]. В связи с этим было предложено использовать дополнительный буферный слой STO для исключения взаимодействия YBCO и CeO_2 [5,6]. В данной работе методом лазерного распыления получены пленки YBCO на сапфире с использованием дополнительного буферного слоя STO и исследованы ее сверхпроводящие характеристики. Показано, что за счет буферирования сапфира пленкой титаната стронция можно увеличить критическую температуру YBCO пленок на два градуса и повысить в несколько раз плотность критического тока.

Для напыления пленок YBCO, CeO_2 и STO использовался эксимерный лазер KrF (длина волны излучения 248 nm) с плотностью энергии на мишени до 3 J/cm². Давление в камере поддерживалось постоянным в диапазоне 0.03–1 mbar в зависимости от напыляемого материала. Подложка размещалась на расстоянии 50 mm от мишени на нагреваемом подложкодержателе, температура которого во время напыления поддерживалась постоянной с точностью 1°C в диапазоне 750–900°C. Для улучшения термического контакта с нагревателем подложка приклеивалась к подложкодержателю серебряной пастой. По окончании напыления в камеру напускался кислород до давления 800 mbar и подложка охлаждалась со скоростью 15°C/min до комнатной температуры. Толщины напыленных пленок составили 20–60 nm для буферных слоев и 120–200 nm для YBCO пленки.

Структура полученных пленок исследовалась методами рентгеновской дифрактометрии ($\theta/2\theta$ -сканирование). Сверхпроводящие параметры пленок YBCO (критическая температура T_c , ширина перехода в сверхпроводящее состояние ΔT_c) определялись из измерений магнитной восприимчивости пленок, а также температурных зависимостей сопро-

Кристаллографические параметры пленок, определенные из рентгенограммы $\theta/2\theta$ -сканирования

Материал слоя	Толщина слоя, nm	Индекс рефлекса	Параметр решетки, nm	Полуширина рефлекса, grad
CeO ₂	30	(002)	0.504	0.37
YBCO*	50	(005)	1.171	0.47
STO*	200	(002)	0.391	0.23
YBCO	150	(005)	1.173	0.28

* Параметры буферных слоев YBCO и STO были определены в отдельном эксперименте.

тивления и критического тока мостиков шириной 4–8 μm , полученных ионно-лучевым травлением YBCO пленки через маску из фоторезиста.

На рис. 1, *a* приведены дифрактограммы $\theta/2\theta$ -сканирования буферного слоя CeO₂/STO толщиной 430 nm (30 + 400) на сапфире *r*-ориентации. CeO₂ имеет ориентацию (001); других ориентаций не наблюдалось в пределах точности измерений. Верхний слой STO, однако, растет в смешанной ориентации (110) и (111). Хотя в работе [7] сообщалось о получении пленок STO с преимущественной ориентацией (001) на гетероструктуре CeO₂/Al₂O₃, авторам этой работы не удалось избежать роста побочных (110) и (111) ориентаций STO. Возможно, нарушение эпитаксиального роста STO на CeO₂/Al₂O₃ вызывается химическим взаимодействием STO с CeO₂ [5]. Чтобы обеспечить рост STO ориентации (001) в ряде работ использовались дополнительные буферные слои [5,6]. В качестве такого слоя нами был использован тонкий (30 nm) слой YBCO.

На рис. 1, *b* представлены дифрактограммы $\theta/2\theta$ -сканирования гетероструктуры STO/YBCO/CeO₂/Al₂O₃ с толстым верхним слоем STO. Наряду с пиками (00*n*) CeO₂ наблюдается четко выраженная система пиков STO (00*m*), пик (002) которой сливается с пиком (006) YBCO. Основной вклад в интенсивность рефлекса дает STO ввиду значительной большей толщины пленки. Этот трехслойный буфер с толщиной STO 50 nm использовался для напыления на сапфире пленок YBCO толщиной 100–200 nm. Рентгенограмма всей гетероструктуры с верхней пленкой из YBCO пленки представлена на рис. 1, *c*. Постоянные решетки и полуширины наиболее интересных рефлексов для всех слоев гетероструктуры представлены в таблице.

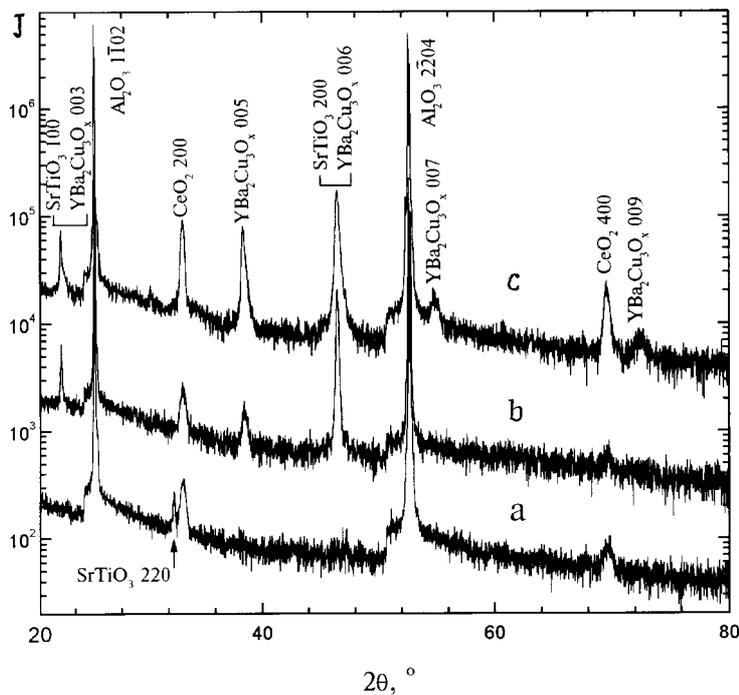


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы $\theta/2\theta$ -сканирования следующих гетероструктур: *a* — STO-400/CeO₂-30/Al₂O₃; *b* — STO-200/YBCO-50/CeO₂-30/Al₂O₃; *c* — YBCO-150/STO-60/YBCO-20/CeO₂-30/Al₂O₃. Толщины слоев в nm приведены вслед за слоем.

Критические температуры сверхпроводящего перехода T_c девяти из десяти YBCO пленок, полученных на буфере из STO, находились в интервале 89–90 К, в то время как для пленок, напыленных на CeO₂, как правило, не превышали 88 К [2,3]. На рис. 2 приведены зависимости магнитной восприимчивости пленки YBCO толщиной 120 nm и сверхпроводящих параметров (сопротивления и критического тока) мостика шириной 7 μm , изготовленного из той же пленки ионно-лучевым травлением через маску из фоторезиста. Видно, что критическая температура всей пленки, определенная из магнитных

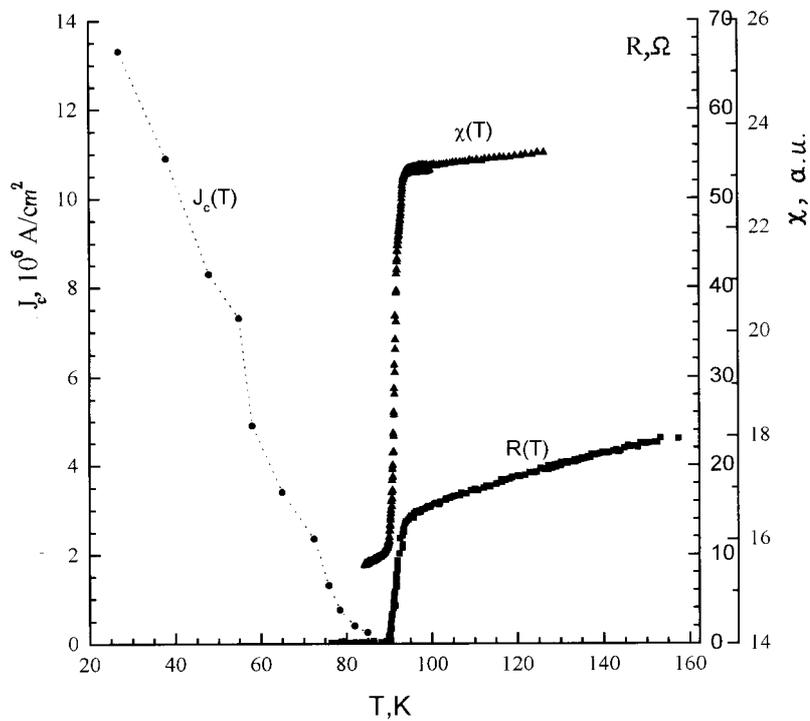


Рис. 2. Температурные зависимости магнитной восприимчивости YBCO пленки на гетероструктуре STO/YBCO/CeO₂/Al₂O₃, сопротивления и критического тока мостика шириной 7 μm, изготовленного из той же пленки.

измерений, оказывается несколько ниже $T_{cm} = 88.0$ K, чем величина $T_{c0} = 89.6$ K, определенная по нулю сопротивления мостика шириной 7 μm. Различие этих температур $T_{cm} - T_{c0} = 1.6$ K, наряду с шириной сверхпроводящего резистивного перехода $\Delta T_c = 2.8$ K, определенная по уровню 0.9 и 0.1 от сопротивления мостика при $T > T_c$, может служить мерой неоднородности сверхпроводящих параметров пленки по площади подложки. Плотность сверхпроводящего критического тока j_c при азотной температуре составляет значения $2 \cdot 10^6$ A/cm² и увеличивается с понижением температуры, почти линейно достигая

значения $1.4 \cdot 10^7$ А/см² при гелиевой температуре (рис. 2). Отметим, что при использовании одиночного буфера из SeO_2 на сапфире j_c при $T = 77$ К было равно 10^6 А/см².

Таким образом, экспериментально показано, что использование сложного буфера с верхним слоем из титаната стронция позволяет получать на сапфире эпитаксиальные ВТСП пленки YBCO более высокого качества, чем при использовании одиночного буферного слоя оксида церия. Предложенный метод может быть использован для роста ВТСП пленок YBCO для пассивной СВЧ-электроники (фильтры, резонаторы, переключатели и т. д.). Вариация толщин и условий получения буферных слоев, в частности обеднение кислородом STO, вызывает уменьшение его диэлектрической проницаемости [8], позволит регулировать параметры СВЧ-устройств на сапфире.

Авторы благодарны Ю.В. Бойкову, Д. Винклеру и И.М. Котелянскому за полезное обсуждение.

Работа частично поддерживалась государственной программой Российской Федерации "Современные проблемы физики конденсированного состояния", подраздел "Сверхпроводимость", Российским фондом фундаментальных исследований и программой ИНКО-Коперникус Европейского Союза.

Список литературы

- [1] Котелянский И.М., Лузанов В.А., Дикаев Ю.М. и др. // Сверхпроводимость: Физика. Химия. Техника. 1994. Т. 7. С. 1306–1311.
- [2] Можяев П.Б., Овсянников Г.А., Сков Й.Л. // ЖТФ. 1998. (в печати.)
- [3] Маштаков А.Д., Котелянский И.М., Лузанов В.А., Можяев П.Б., Овсянников Г.А., Бдикин И.Д. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 19. С. 8–13.
- [4] Zaitsev A.G., Kutzner R., Wordenweber R. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 2723–2726.
- [5] Voikov Yu.A., Ivanov Z.G. // J. of Alloys and Compounds. 1997. V. 251. P. 193–196.
- [6] Nicoletti, Villigier // IEEE Trans. On Appl. Supercond. 1997. V. 7. P. 1399–1403.
- [7] Гольман Е.К., Логинов В.Е., Прудан А.М., Разунов С.В. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. С. 84–87.
- [8] Hitani M., Imagawa K., Takagi K. // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. V. 34. P. 254–260.