

05.4;12

Исследование роста пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на монокристалле Al_2O_3 с CeO_2 буферным подслоем

© В.В. Афросимов, Е.К. Гольман, Р.Н. Ильин, М.Н. Панов,
Д.А. Плоткин, С.В. Разумов, В.И. Сахаров,
И.Т. Серенков, А.В. Тумаркин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 28 августа 1997 г.

Магнетронным распылением получены сверхпроводящие пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на монокристаллах Al_2O_3 с CeO_2 -подслоем. С помощью рассеяния ионов средних энергий и дифракции рентгеновских лучей показана хорошая монокристалличность пленок по всей толщине вплоть до $2.6 \mu m$. Высказано предположение, что углубления, образовавшиеся при росте пленок над зёрнами "посторонней" фазы, могут служить стоками для дефектов.

На начальных стадиях роста сверхпроводящих пленок сложного состава, таких как $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, получаемые методом распыления, возможно образование островков как основной фазы с различной ориентацией оси c , так и "посторонних" фаз, отличающихся от основной составом и ориентацией. При этом в процессе дальнейшего роста пленки по достижении толщины порядка сотен нанометров в первом случае происходит переход от c -нормального к a -нормальному росту [1], а во втором случае на поверхности пленки образуются выросты или углубления [2,3].

Задачей данной работы является исследование зависимости качества $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ пленки, выращиваемой методом магнетронного распыления на Al_2O_3 подложке с буферным CeO_2 слоем [4], от толщины пленки в условиях, когда на начальном этапе возможно образование "посторонних" фаз [5]. Исследование структуры пленок производилось методом рассеяния ионов средних энергий [6,7] и рентгенографии, поверхность исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа.

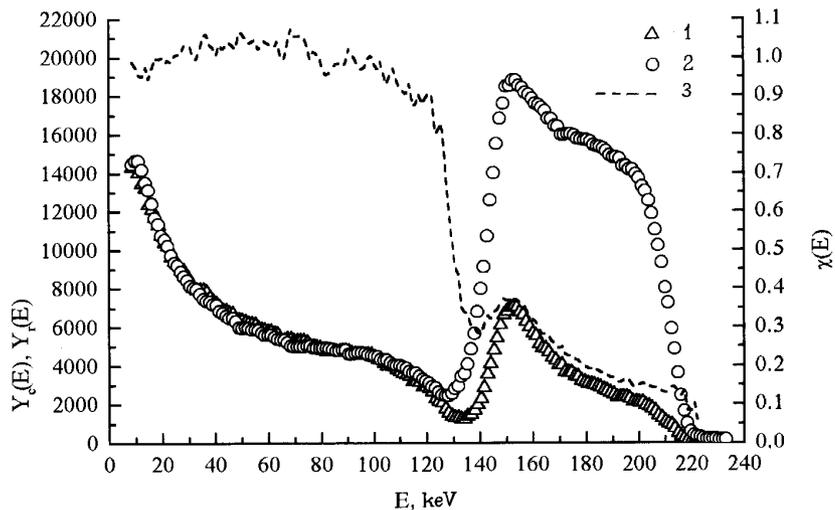
№ пленки	Ток, А	Время, h	Толщина, 10^{15} mol/cm^2	D , $10^{-18} \text{ cm}^2/\text{mol}$	χ_0	χ_{\min}
1	0.2	5	48	1.8	0.14	0.20
2	0.4	2.5	60	2.6	0.10	0.16
3	0.2	10	95	2.6	0.07	0.13
4	0.2	20	155	1.8	0.06	0.12
5	0.2	45		1.6	0.06	0.11
6	0.4	40	$2.6 \mu\text{m}^*$	1.7	0.07	0.11

*Измерено профилометром.

Были исследованы 6 пленок, различающихся толщиной, определяемой током разряда и длительностью напыления. Характеристики пленок приведены в таблице. Толщины первых четырех пленок были определены из спектров обратного рассеяния ионов. Если исходить из плотной упаковки ($\rho = 6.35 \text{ g/cm}^3$), то 10^{15} mol/cm^2 соответствует 1.72 nm , т.е. самая тонкая пленка имела толщину 82 nm . Для самой толстой пленки измерения профилометром дали 2600 nm . Все пленки были сверхпроводящими с T_c $88\text{--}90 \text{ K}$. Для трех наиболее толстых пленок поверхностное сопротивление, определяемое с помощью поверхностного резонанса на частоте 4 GHz при 78 K , было менее $10^{-3} \Omega$. На поверхности всех пленок с помощью сканирующего электронного микроскопа были обнаружены углубления, занимающие от 3 до 18% площади поверхности пленки, диаметр которых возрастал от 0.15 до $0.35 \mu\text{m}$ с увеличением толщины пленки. Рентгенографические исследования показали, что в пленке № 1 доля зерен с c -осью, нормальной к подложке, составляла не менее 94%, а для остальных пленок эта доля была еще больше.

Для исследования качества кристаллической структуры пленок вблизи поверхности и по глубине использовалось рассеяние протонов с энергией $E = 240 \text{ keV}$ в режимах каналирования и неориентированного пучка. Энергоспектры рассеянных ионов измерялись с помощью спектрометрического полупроводникового детектора с разрешением около 3 keV , расположенного под углом 155° к направлению падающего пучка. Спектры, полученные в режиме каналирования $Y_c(E)$, неориентированного пучка — $Y_r(E)$ для пленки № 3 изображены на рисунке.

О качестве пленки в объеме можно судить либо по полученной в эксперименте зависимости доли деканализованного пучка от энергии



Энергетические спектры обратнорассеянных протонов для пленки № 3. 1 — режим каналирования, 2 — неориентированный режим, 3 — относительный выход. (По оси "x" отложено количество частиц).

рассеянных ионов

$$\chi(E) = Y_c(E)/Y_r(E) \quad (1)$$

(также показана на рисунке), либо по виду модельной зависимости деканализации от глубины — $\chi^m(t)$. Параметры функции $\chi^m(t)$ подбираются так, чтобы достичь максимального согласия между экспериментальной зависимостью $Y_c(E)$ и расчетной $Y_c^m(E)$, получаемой в процессе моделирования спектра в режиме каналирования. Данные о составе и толщине пленок получались при проводимом общепринятым способом моделировании спектра в режиме случайной ориентации [8]. Для всех исследованных нами пленок функция $\chi^m(t)$ хорошо описывалась линейной зависимостью

$$\chi^m(t) = \chi_0 + Dt. \quad (2)$$

Эту функцию можно сравнить с аналитическим выражением для зависимости деканализованной доли пучка от распределения дефектов по

глубине в случае их малой концентрации [8]:

$$\chi(t) = \chi_i(t) + \sum_k \left(f_k \frac{n_k(t)}{N} + \int_0^t \sigma_k(\varepsilon(z)) n_k(z) dz \right), \quad (3)$$

где $\chi_i(t)$ характеризует деканалирование в бездефектном кристалле, n_k — концентрация, σ_k — фактор деканалирования и f_k — фактор рассеивания для дефектов типа k , ε — предстолкновительная энергия, N — концентрация атомов в мишени. Фактор рассеяния f_k близок к 1 для точечных дефектов, для остальных им можно пренебречь. Для достаточно хорошего монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ $\chi_i(t)$ выражается зависимостью вида (2) с $\chi_0 = 0.03$ и $D = 0.9 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{mol}$ [7]. Линейный характер полученных нами зависимостей вида (2) хорошо согласуется с ходом зависимости (3) в предположении о постоянной по глубине концентрации дефектов. Полученные параметры χ_0 и D для исследованных пленок приведены в таблице.

Параметр D характеризует скорость деканалирования с глубиной. Тот факт, что он не возрастает с увеличением толщины пленок, а также линейность зависимости $\chi(t)$ и следующее из рентгенографических измерений сохранение c -ориентации пленки с ростом ее толщины позволяют считать, что зерна, составляющие пленку, имеют однородную структуру и простираются от границы раздела с подслоем до поверхности.

Качество пленки вблизи поверхности характеризуется минимальным выходом χ_{\min} , определяемым по (1) непосредственно после поверхностного пика (в нашем случае при $t \approx 30 \text{ nm}$) или же параметром χ_0 из (2), соответствующим $t = 0$. Значения параметра χ_{\min} также приведены в таблице.

Анализ приведенных в таблице данных по минимальному выходу показывает, что для толстых пленок он определяется в основном значением χ_{\min} для монокристалла (0.07–0.08 [7]) и разориентацией блоков, вклад которой, оцененный, согласно [9], на основе измеренных нами угловых зависимостей выхода рассеянных ионов, может достигать 0.04. Для тонких пленок, имеющих углубления, ширина которых превышает толщину пленки, заметный вклад в величину χ_{\min} вносят лежащие на дне углублений зерна "посторонних" фаз, не затеняемые стенками, как в толстых пленках.

Таким образом, исследования показали, что пленки в процессе роста, по крайней мере вплоть до толщин $2.5 \mu\text{m}$, сохраняют в подавляющей части площади однородность структуры и нормальное к поверхности направление оси c . Зерна "посторонних" фаз в процессе роста вызывают образование углублений на поверхности, которые тем не менее не ухудшают кристалличности остальной части пленки и даже, возможно, их границы являются стоками для дефектов.

Работа была выполнена при поддержке BMBF/VDI проекта № 029850 (Germany).

Список литературы

- [1] *Basu S.N., Roy T., Mitchell T.E., Muenchausen R.E., Nastasi M.* // Science and Technology of Thin Film Superconductor 2. N.Y.: Plenum, 1990. P. 341–349.
- [2] *Norton M.G., Carter C.B., Moeckly B.H. et al.* // Science and Technology of Thin Film Superconductor 2. N.Y.: Plenum, 1990. P. 379–387.
- [3] *Ramesh R., Iham A., Hwang D.M., Sands T.D., Chang C.C., Hart O.L.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 14. P. 1559–1561.
- [4] *Hollmann E.K., Zaitsev A.G., Loginov V.E. et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1992. V. 25. N 3. P. 504–505.
- [5] *Гольман Е.К., Гольдрин В.И., Плоткин Д.А. и др.* // ФТТ. 1997. Т. 39. № 2. С. 216–218.
- [6] *Афросимов В.В., Дзюба Г.О., Ильин Р.Н. и др.* // СФХТ. 1991. Т. 4. № 9. С. 1767–1777.
- [7] *Афросимов В.В., Дзюба Г.О., Ильин Р.Н. и др.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 12. С. 76–88.
- [8] *Feldman L.C., Mayer J.W., Picraux S.R.* Material Analysis by Ion Channeling. N.Y.: Academic Press, 1982. 300 p.
- [9] *Ishiwara H., Furukawa S.* // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 4. P. 1686–1689.