

05.4

Влияние низкотемпературного отжига на свойства тонких пленок $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

© Ю.Н. Дроздов, С.А. Павлов, А.Е. Парафин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 23 мая 1997 г.

Исследовано влияние отжига при температуре 180°C на структуру, критическую температуру и удельное электросопротивление тонких пленок $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Показано, что пленки, выращенные при пониженных температурах, чувствительны к такому отжигу и его использование приводит к сильному изменению перечисленных параметров пленки.

В течение длительного времени после открытия $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) считалось, что максимальная температура перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) достигается при $\delta = 0$, т. е. при полном окислении. Более детальные исследования YBCO в области низких δ показали, что существует оптимальное значение $\delta \simeq 0.1$, при котором T_c максимально, а в области $\delta < 0.1$ YBCO "переокислено" и T_c здесь понижается на несколько градусов относительно ее максимального значения [1].

В работе J.R. Gvaler и др. [2] исследовалось влияние содержания кислорода на свойства тонких пленок YBCO. Было показано, что как и в объемных образцах, максимальное T_c достигается при некотором оптимальном значении содержания кислорода. При этом уровень содержания кислорода регулировался низкотемпературным отжигом. В этой работе под "низкими" понимаются температуры отжига T_a около 400°C , что существенно ниже ростовых ($600\text{--}700^\circ\text{C}$).

Наши исследования показали, что эпитаксиальные слои YBCO могут быть чувствительны к отжигу с температурой $T_a < 200^\circ\text{C}$. Более того, применение столь низких температур позволило подробно проследить изменение T_c , удельного электросопротивления и периода решетки "c" в зависимости от времени отжига.

Пленки получены распылением керамической мишени YBCO излучением эксимерного лазера ($\lambda = 248\text{ nm}$, $\tau = 27\text{ ns}$). Плотность

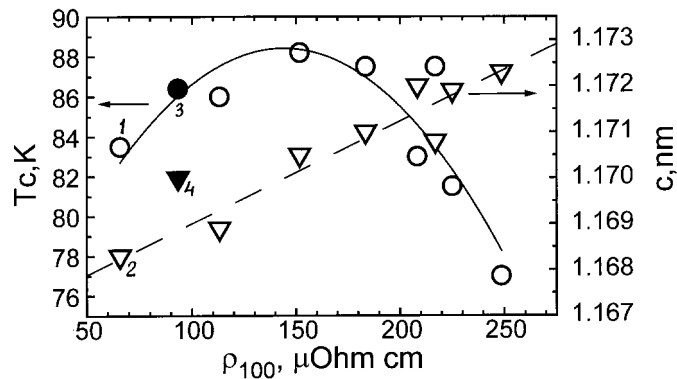


Рис. 1. Изменение критической температуры T_c (1) и периода решетки "с" (2) от удельного сопротивления ρ_{100} пленки YBCO в процессе отжига при температуре 180°C и давлении кислорода 10 Pa. T_c (3) и "с" (4) после отжига при 550°C и давлении кислорода 100 kPa.

энергии в импульсе 10 J/cm², частота повторения 50 Hz. Скорость роста при данных условиях 0.01 nm за импульс. Осаждение проводили на монокристаллические подложки NdGaO₃ при температуре роста $T_d \simeq 620^\circ\text{C}$. Толщина пленки составляла 100 nm. Процесс формирования пленки заканчивали естественным охлаждением до комнатной температуры при давлении кислорода 100 kPa в течение 30 min.

Сопротивление пленки измеряли 4-зондовым методом, для чего на пленку были напылены методом термического испарения серебряные контакты, что позволило получить стабильное низкое контактное сопротивление. T_c определяли по занулению сопротивления пленки. Анализ структуры и измерение периода решетки "с" выполняли рентгенодифракционным методом на ДРОН-4.

Отжиг пленок проводили при температуре 180°C в атмосфере кислорода при давлении 10 Pa шагами по 10–20 min. После каждого шага определяли параметры пленки. На рис. 1 показано изменение критической температуры T_c и периода "с" решетки в зависимости от удельного сопротивления пленки ρ_{100} , измеренного при температуре 100 K. Сама величина ρ_{100} возрастала монотонно, поэтому точки на графике имеют последовательность циклов отжига.

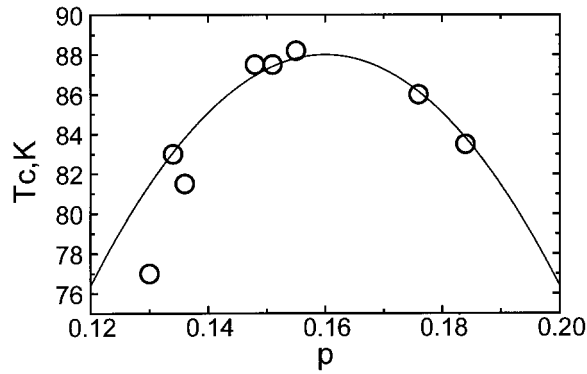


Рис. 2. Зависимость критической температуры T_c от концентрации дырок проводимости " p " в Cu-O плоскости в расчете на 1 атом Cu. Сплошной линией нанесена зависимость (3) с $T_{c\max} = 88$ К.

Видно, что величина T_c росла на начальной стадии отжига и повысилась на 5 К за 2 шага, а затем упала до температуры кипения азота за 7 шагов. Период решетки " c " при этом линейно возрастал. Зависимость T_c от ρ_{100} имеет параболический характер, схожий с данными для монокристаллов YBCO [1].

При обработке полученных данных мы воспользовались эмпирическими зависимостями, связывающими период решетки " c " с концентрацией дырок проводимости в Cu-O плоскости " p " в расчете на 1 атом Cu [3,4]:

$$p = 0.187 - 0.21\delta, \quad (1)$$

$$c = 1.2771 - 0.01557x, \quad (2)$$

где $x = 7 - \delta$.

Рассчитанные из (1) и (2) величины " p " позволяют сравнить наши экспериментальные данные с универсальной для высокотемпературных сверхпроводящих купратов зависимостью приведенной критической температуры $T_c/T_{c\max}$ от концентрации дырок проводимости [3]:

$$T_c/T_{c\max} = 1 - 82.6(p - 0.16)^2. \quad (3)$$

Результаты представлены на рис. 2. Сплошной линией нанесена зависимость (3), где $T_{c\max} = 88$ К. Видно, что экспериментальные точки отвечают ходу универсальной кривой. Таким образом, можно полагать, что использование нами зависимостей (1) и (2), полученных для объемных образцов, справедливо для наших пленок, и наблюдаемые изменения T_c и периода решетки "с" при отжиге обусловлены понижением содержания кислорода в структуре YBCO.

Интересно отметить, что повышение давления кислорода во время отжига до 100 кПа не изменяло хода зависимостей, представленных на рис. 1, однако изменения происходили за более длительное время по сравнению с отжигом при давлении кислорода 10 Па.

Изменения в пленке были обратимыми: из конечного состояния с $T_c < 77$ К мы могли перевести пленку в состояние, близкое к начальному (см. рис. 1), путем отжига при 550°С в атмосфере кислорода при давлении 100 кПа в течение 25 min. Такой результат подтверждает роль кислорода в наблюдаемых процессах.

Следует отметить, что в наших пленках, полученных при температурах роста $T_d \simeq 700^\circ\text{C}$, так же как и в работе [2], не наблюдается "переокисленное" состояние с пониженной T_c . Этот факт, по-видимому, связан с тем, что концентрация дырок и связанная с ней T_c определяется не только уровнем содержания кислорода, но и другими факторами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 9602–16993), проекта "Интеграл" 95043 секции "Сверхпроводимость" госпрограммы "Актуальные направления в физике конденсированных сред" и гранта INTAS 943912.

Список литературы

- [1] *Claus H., Gebhard U., Linker J. et al. // Phys. C. 1992. 200. V. 3 & 4. V. 271–276.*
- [2] *Gavaler J.R., Talvacio J., Weinert R.W. et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1995. V. 5. N. 2. P. 1173–1176.*
- [3] *Tallon J.R., Bernhard C., Shaked H. // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. N 18. P. 12911–12914.*
- [4] *Ohkubo M., Kachi T., Hioki T. et al. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. N 9. P. 899–901.*