

Исследование неоднородностей в Y-Ba-Cu-O тонких пленках методами сканирующей зондовой микроскопии

А. К. Воробьев, Н. В. Востоков, С. В. Гапонов, Е. Б. Ключенков, В. Л. Миронов

E-mail: mironov@ipm.sci-nnov.ru

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603600, Нижний Новгород, ГСП-105, Россия

Одной из основных проблем, сдерживающих применение тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников в микроэлектронике, является существенная неоднородность их фазового состава. Совместный анализ фазовых диаграмм и диаграмм состав-свойства пленок наиболее перспективного соединения Y-Ba-Cu-O (YBCO), полученных различными методами [1 - 4], позволяет предположить, что необходимым условием достижения высоких электрических характеристик является значительное обогащение конденсата медью в процессе роста пленок (избыток меди 150 % относительно стехиометричного значения). По-видимому, высокая концентрация адатомов меди необходима для подавления процессов катионного разупорядочения, искажающего YBCO решетку [3,4]. Вследствие значительного избытка медных адатомов YBCO пленки формируются в виде гетерогенной системы, состоящей из матрицы стехиометрической фазы YBCO и обогащенных медью частиц вторичной фазы (преципитатов CuO) с типичными размерами около 0,5 μm и поверхностной плотностью около 10^8 cm^{-2} [1,2]. При исследовании влияния частиц вторичной фазы на свойства структур и приборов на основе YBCO пленок, как правило, обогащенные медью преципитаты рассматриваются только как механические включения в матрицу YBCO пленки, препятствующие воспроизводимому формированию многослойных структур. Анализ процессов роста пленок, проведенный в работе [5], показал, что вблизи преципитатов на расстояниях меньших, чем длина диффузии адатомов меди до встраивания в решетку YBCO λ_c , вероятность захвата адатомов меди преципитатом становится сравнимой с вероятностью встраивания в YBCO решетку. Это может приводить к формированию вокруг преципитатов областей пленки с дефицитом меди, которые, по-видимому, имеют искаженную кристаллическую решетку и пониженные, по сравнению со стехиометричной матрицей, сверхпроводящие свойства [4]. Размеры областей пленки с дефицитом меди определяются длиной диффузии λ_c и, следовательно, зависят от параметров технологического процесса, таких как температура и скорость осаждения. Оценки проведенные для температур осаждения в диапазоне 600-750 °C дают

$\lambda_c \sim 150-250$ нм [5]. Таким образом, оценочные размеры неоднородностей в виде преципитатов и областей пленки с дефицитом меди оказываются сравнимыми с характерными размерами (~ 1 мкм) рабочих областей приборов на основе контактов Джозефсона и, по-видимому, являются одной из основных причин большого ($\sim 30\%$) разброса их параметров [7].

В настоящей работе методами сканирующей зондовой микроскопии исследовались неоднородности YBCO пленок вблизи преципитатов CuO. Пленки формировались на подложках NdGaO₃ методом магнетронного напыления при температуре 660 °С и давлении рабочего газа 38 Па. Конструкция и особенности работы магнетронной напылительной системы подробно описаны в [8], свойства получаемых пленок приводятся в работе [9]. Рельеф и электрические свойства поверхности пленок исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Р4-SPM фирмы NT-MDT и сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) разработанного в ИФМ РАН [10]. Исследования показали, что на поверхности YBCO пленок наблюдаются вольт-амперные характеристики (ВАХ) двух типов, характерных для контактов металл-металл и металл-полупроводник с р-типом проводимости (рис. 1).

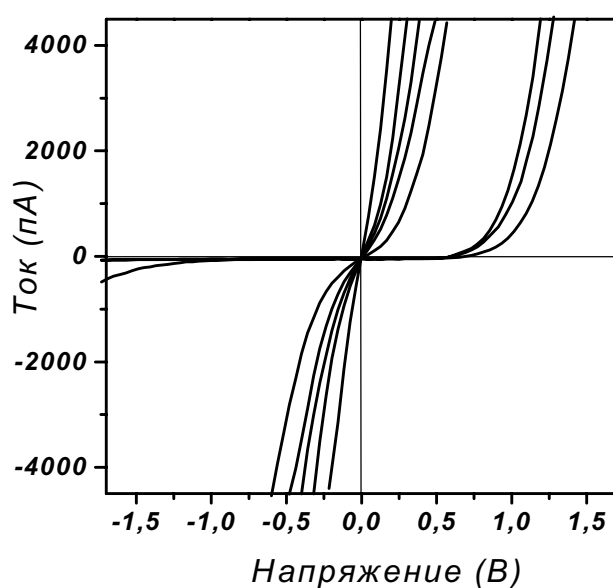


Рис. 1

Для получения СТМ изображения сканирование проводилось при напряжениях на туннельном промежутке соответствующих прямой ветви полупроводниковой ВАХ. Одновременно с рельефом формировалось изображение распределения тока между иглой и образцом, для чего в каждой точке кадра петля обратной связи разрывалась, и записывалось значение тока при напряжении на туннельном промежутке, соответствующем обратной ветви полупроводниковой характеристики. На таком

изображении полупроводниковые области сильно отличаются по контрасту от областей с металлической проводимостью. Для исследования электрических свойств областей пленки вблизи преципитатов CuO снималось распределение дифференциальной проводимости вдоль поверхности образца.

Характерное АСМ изображение рельефа поверхности YBCO пленки представлено на рис. 2. Участки поверхности с одинаковой высотой на изображении выделены контрастом. Большей высоте соответствуют более светлые оттенки серого. Светлые области на изображении соответствуют преципитатам вторичной фазы, обогащенной медью. Контраст изображения выбран так, чтобы были лучше видны области YBCO пленки вокруг преципитатов CuO.

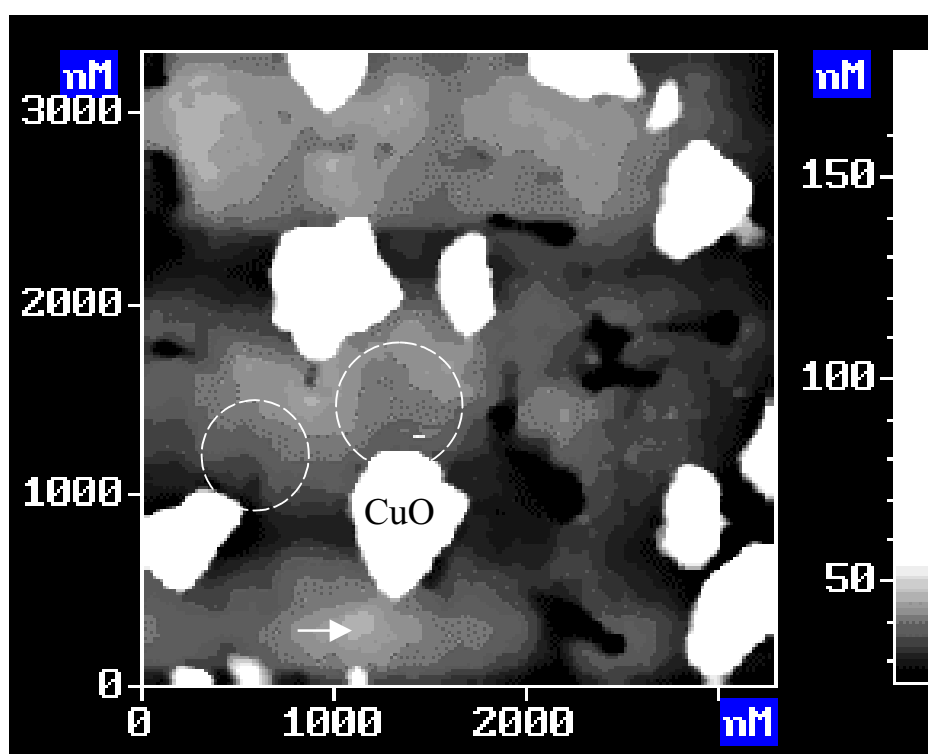


Рис. 2

На рис. 2 отчетливо видна террасная структура, так называемых, ростовых пирамид (отмечены стрелкой), которые являются характерной структурной особенностью, присущей эпитаксиальным YBCO пленкам [11]. Подобные террасные структуры и спиральные фигуры роста наблюдаются в YBCO пленках, полученных различными методами (распыление, лазерная абляция, CVD) на различных подложках и в широком диапазоне скоростей осаждения. Ростовые пирамиды формируются дислокациями либо при выходе дислокационных полупетель на поверхность (в случае послойного роста), либо при коалесценции островков (в случае островкового роста). В работе [12]

исследовались террасные структуры и спиральные фигуры роста в YBCO пленках, полученных методом CVD. Было обнаружено, что террасы являются атомно гладкими, разница высот между соседними террасами составляет 1,17 нм при ширине террас 4-20 нм. Ширина террас ростовых пирамид на рис. 2 составляет ~ 200 нм. Согласно представлению о послойном росте кристаллов, ширина террас обратно пропорциональна пересыщению в паровой фазе [12], или, иными словами, обратно пропорциональна концентрации адатомов. Очевидно, что ширина террас должна быть не больше, чем длина диффузии адатома до его захвата другим адатомом, поскольку в противном случае будет формироваться новый зародыш и ширина террасы уменьшится.

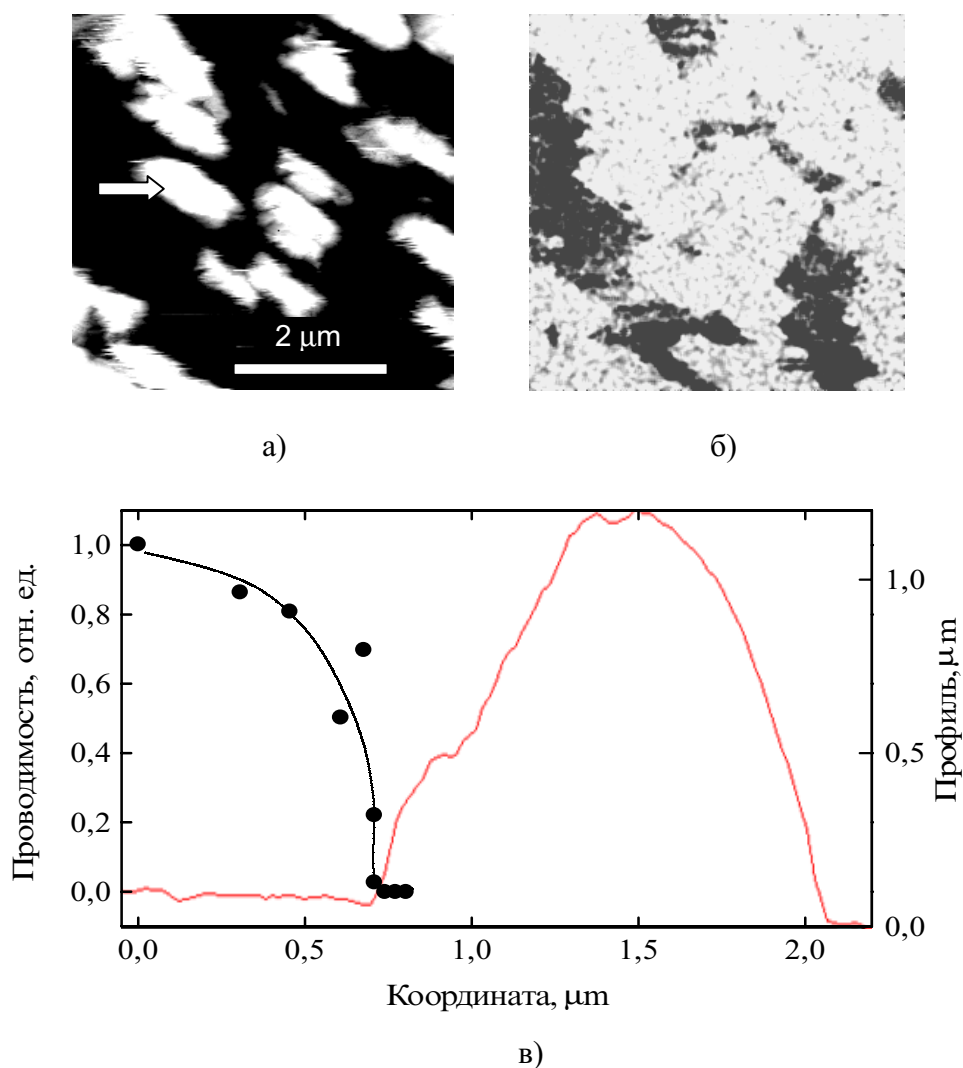


Рис. 3. (а) – СТМ - изображение рельефа поверхности Y-Ва-Си-О пленки, полученное в режиме $j_t = \text{const}$ при потенциале образца $U = 1,5$ V и токе удержания $j_t = 200$ pA. Стрелкой показано сечение, вдоль которого снималось распределение проводимости. (б) – Распределение величины тока (при $U = -1,5$ V) между иглой и образцом Y-Ва-Си-О в области, соответствующей рис. 2(а). (в) – Рельеф поверхности вдоль стрелки, изображенной на рис. 2(а), и, соответствующее ему, распределение относительной дифференциальной проводимости при $U = 0$.

На рис. 2 хорошо видны области искажения формы ростовых пирамид (выделены окружностями) в результате уменьшения толщины YBCO пленки вблизи CuO преципитатов. Размеры таких областей в плоскости подложки составляют ~ 500 нм. В работе [6] при исследовании ранних стадий роста YBCO пленок методом АСМ было показано, что аналогичные области пленок меньшей толщины с размерами около 300 нм наблюдаются уже при формировании первых нескольких монослоев. По-видимому, оба наблюдаемых эффекта имеют одинаковую природу и обусловлены обеднением медью прилегающих к преципитатам областей YBCO пленки в результате захвата преципитатами Cu-адатомов в процессе роста.

На рис. 3 представлены результаты СТМ исследований поверхности YBCO пленки. На изображении распределения туннельного тока (рис. 3, б) видно, что области, соответствующие преципитатам CuO, гораздо менее локализованы, чем на изображении рельефа (рис. 3, а) вследствие перекрытия областей с полупроводниковыми свойствами. Вне этих областей пленка обладает металлическим типом проводимости. Для исследования свойств пленки вблизи частиц CuO было снято распределение дифференциальной проводимости вдоль линии, пересекающей преципитат (направление, вдоль которого снимался профиль показано стрелкой на рис. 3 а). Профиль дифференциальной проводимости приведен на рис. 3, в. Видно, что вблизи преципитата существует область пленки с характерным размером ~ 500 нм с пониженной туннельной проводимостью. Уменьшение туннельной проводимости областей YBCO пленок вокруг CuO преципитатов, по-видимому, также может быть обусловлено дефицитом атомов меди в результате захвата Cu-адатомов преципитатами в процессе роста.

Таким образом, в результате исследований поверхности YBCO пленок методами зондовой микроскопии вокруг обогащенных медью частиц вторичной фазы обнаружены области пленок размерами до 500 нм с измененным рельефом и пониженной туннельной проводимостью. По-видимому, все наблюдаемые изменения свойств пленок имеют единую природу и обусловлены дефицитом атомов меди в YBCO решетке, возникающим в процессе роста в результате захвата медных адатомов преципитатами вторичных фаз обогащенных медью. Такие области могут иметь искаженную кристаллическую решетку и пониженные, по сравнению с матрицей, сверхпроводящие свойства. Поскольку размеры наблюдаемых неоднородностей ($\sim 1 \mu\text{m}$) сравнимы с характерными размерами рабочих областей приборов на основе контактов Джозефсона, формируемых из YBCO пленок, можно ожидать, что такие неоднородности существенно влияют на работу таких приборов и являются одной из основных причин большого разброса их параметров.

Работа выполнена в рамках программ ГКНТ “Актуальные направления в физике конденсированных сред” (направления “Сверхпроводимость” (проекты 33333 и 98064) и “Фундаментальная метрология” (проект 3.45)), а также при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 99-02-16139).

Литература:

1. E. Waffenschmidt, K. H. Waffenschmidt, F. Arndt, et al. // J. Appl. Phys., 75(8), 1994, p. 4092-4096.
2. J. Hudner, O. Thomas, E. Mossang, et al. // J. Appl. Phys., 74(7), 1993, p. 4631-4642.
3. B. Schulte, M. Maul, P. Haussler, et al. // Appl. Phys. Lett., 62(6), 1993, p. 633-635.
4. T. Yoshitake, W. Hattori, and S. Tahara // J. Appl. Phys., 84(4), 1998, p. 2176-2180.
5. Yu.N.Drozдов, S.V.Gaponov, S.A.Gusev, E.B.Kluev, Yu.N.Nozdin et al. // Supercond. Sci. Technol., 9(1996), A166 – A169.
6. J. A. Alarco, G. Brorsson, H. Olin, et al. // J. Appl. Phys., 75(6), 1994, p. 3202-3204.
7. Electronic Applications of Superconductivity in Japan, WTEC Panel Report, July 1998, <http://144.126.176.216/scel96/toc.htm>.
8. А. К. Воробьев, Е. Б. Ключенков, В. В. Таланов, Э. Н. Ботин // Письма в ЖТФ, т. 19, в. 15, с. 12-16, 1993.
9. Yu.N.Drozдов, S.V.Gaponov, S.A.Gusev, E.B.Kluev, Yu.N.Nozdin, V.V.Talanov, A.K.Vorobiev // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 7, N. 2, p.p. 1642-1645, 1997.
10. Д. Г. Волгунов, С. В. Гапонов, В. Ф. Дряхлушин и др. // Приборы и техника эксперимента, 1998, № 2, С. 132 – 137.
11. S. J. Pennycook, M. F. Chisholm, D. E. Jesson, et al. // Physica C, 202 (1992), p. 1-11.
12. L. Luo, M. E. Hawley, C. J. Maggiore, et al. // Appl. Phys. Lett., 62(5), 1993, p. 485-486.