

04; 05

© 1993

АКТИВИРУЕМЫЙ ПЛАЗМОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ РОСТ  
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК  $Y-Ba-Cu-O$ В.Д. Окунев, Н.Н. Пафомов,  
З.А. Самойленко, В.М. Свистунов

Одной из проблем в технологии пленок ВТСП, сохраняющей свое значение для всех способов получения, является выращивание тонких сверхпроводящих слоев с минимальной ( $\sim \xi_0$ ) толщиной переходного слоя, пригодных для создания многослойных структур, включая туннельные и джозефсоновские контакты [1]. Сложность данной задачи связана с высокой химической активностью соединений ВТСП. Пути ее решения хорошо известны: поиск химически нейтральных по отношению к ВТСП подложечных материалов и снижение температуры роста пленок, обеспечивающее одновременно и совместимость сверхпроводниковой технологии с технологией интегральных микросхем.

Заметное снижение температуры роста пленок ВТСП наблюдается при активации процессов осаждения слоев плазмой тлеющего разряда, ультрафиолетовым или лазерным излучением [2-4]. В настоящей работе продемонстрирована возможность активируемого роста монокристаллических пленок  $YBaCuO$  без нагревания подложек.

Эксперименты проводились в обычной диодной распылительной системе на постоянном токе в атмосфере аргона. Интенсивность ионной бомбардировки регулировалась изменением расстояния мишень-подложка и режима распыления. Температура подложек ( $SrTiO_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $ZrO_2$ ,  $Si$ , ситалл, поликор, стекло,  $Mo$ ,  $Ni$  и др.) не превышала  $100^\circ C$ . Толщина пленок составляла 0.2-3 мкм. Их структура исследовалась рентгеновским методом. Дифракционные картины были получены в камере Дебая при рассеянии  $CrK\alpha$ -лучей.

В работе наблюдались два типа зависимостей скорости роста пленок от полного тока в диодной системе (рис. 1). При слабом взаимодействии поверхности пленки с плазмой, когда подложки выведены из зоны интенсивной ионной бомбардировки, скорость роста линейно увеличивается с увеличением тока. В этом режиме без дополнительного нагревания подложек растут пленки с аморфной структурой. Они стабильны, имеют хорошие диэлектрические и механические свойства, что позволяет их использовать в качестве защитных и маскирующих покрытий для пленок ВТСП [5].

В режиме, обеспечивающем активное взаимодействие плазмы тлеющего разряда с растущим слоем, резко увеличивается вероятность распыления самой пленки ионами низких энергий. Зависимость

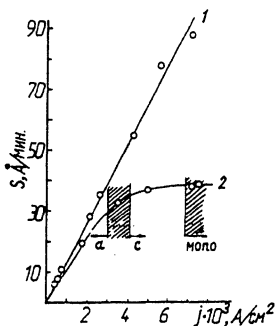


Рис. 1. Зависимость скорости роста пленок  $Y-Ba-Cu-O$  от плотности тока в диодной системе при слабом (1) и активном (2) взаимодействии плазмы с поверхностью.

скорости роста от полного тока имеет характер насыщения (рис. 1, кривая 2). Изменением геометрии скорость роста можно уменьшить еще на порядок.

В режиме ограничения скорости роста структура пленок быстро меняется с увеличением плотности тока. При вторичном распылении пленки ионами низких энергий, сопоставимых с энергиями связи атомов в соединении  $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ , коэффициенты распыления зависят от степени совершенства локальной структуры ВТСП. Если учесть влияние дефектов (например, оборванных или неправильных связей) на устойчивость локальной структуры, то очевидно, что при взаимодействии с ионами низких энергий в первую очередь будут удаляться комплексы с наиболее дефектной упаковкой атомов, имеющих самые низкие энергии связи с решеткой. В результате совершенство структуры пленок быстро растет с увеличением интенсивности вторичного распыления. Близость поверхности, являющейся эффективным стоком для всех типов дефектов, в том числе и тех, которые могут образоваться при ионной бомбардировке, не позволяет им накапливаться в объеме. Такой процесс возможен в узком интервале энергий ионов: при больших энергиях, значительно превышающих энергии связи между атомами, исчезает чувствительность скорости распыления к локальной структуре, а при слишком малых – распыление вообще прекращается, и влияние плазмы на рост пленок будет целиком обусловлено влиянием ионной бомбардировки на подвижность поверхностных атомов. Очевидно, что максимальную подвижность в этом случае будут иметь слабосвязанные атомы, что также должно способствовать уменьшению концентрации дефектов в пленках.

Сначала изменения структуры пленок с ростом тока в системе наблюдаются в пределах аморфной фазы  $YBaCuO$ . При малых токах ( $< 1 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ) наблюдается обычная для этого случая дифракционная картина: гало в малых углах, формирующееся с участием в рассеянии рентгеновских лучей кластеров, ядра которых

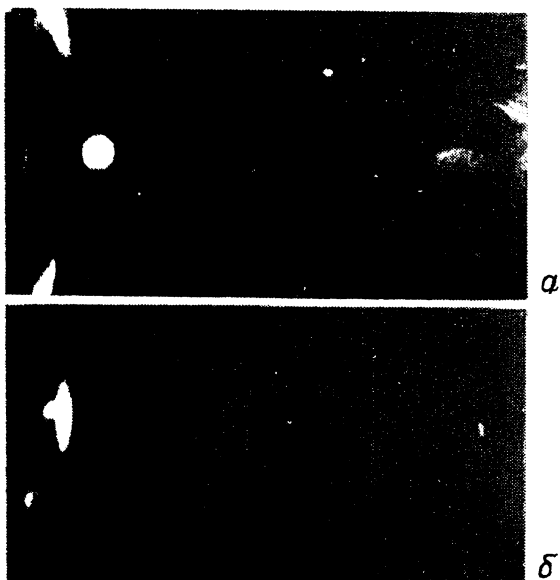


Рис. 2. Дифракционные картины пленок на  $MgO$  (а) и  $SrTiO_3$  (б).

состоят из мезоскопических фрагментов кристаллоподобных плоскостей (001) фазы  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , и увеличивающийся с ростом угла дифракции  $\theta$  фон от неупорядоченных межкластерных областей [6, 7]. Средние межплоскостные расстояния в кластерах составляют около 11.5 Å; интенсивность когерентного рассеяния, характеризующая долю объема, занимаемого кластерами, невелика и составляет несколько процентов от полной интегральной интенсивности рассеянного излучения. С ростом тока появляются гало в средних углах дифракции, наблюдавшиеся ранее при отжиге пленок [8] (там, где сосредоточены наиболее интенсивные линии кристаллической фазы). Дальнейшее увеличение плотности тока приводит к сужению гало и росту их интенсивности. Наконец, при  $j > 3 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> на фоне гало фиксируются слабые линии (в первую очередь для пленок на металлических подложках), т.е. образуется аморфно-кристаллическая структура. Поликристаллическая структура быстро развивается, а при токах  $\sim 7 \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> на некоторых подложках начинают расти монокристаллические слои.

Основные дифракционные максимумы наблюдаются на дебаеграммах в области углов  $\theta \approx 25^\circ$  и соответствуют дифракции от плоскостей типа (110) фазы  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . При этом проявляется существенное различие в форме дифракционных максимумов от пленок на различных подложках<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Тип подложки оказывает значительное влияние на структуру пленок при всех режимах осаждения, включая сюда и область существования аморфного состояния образцов.

Рентгенограммам пленок на  $MgO$  свойственны два рефлекса, смещенные от осевой линии к концам дебаевской дуги (рис. 2, а, на котором просматривается также и рефлекс от подложки). Пленки на  $SrTiO_3$  или на сапфире с подслоем  $ZrO_2$  характеризуются ярким узким рефлексом, расположенным на осевой линии вдоль дебаевской дуги (рис. 2, б). Интенсивность иных дифракционных максимумов на дебаеграммах была малой.

При существенных рассогласованиях параметров решеток пленки и подложки (например, пленки на кремнии или на неодимовой гране) в том же самом режиме растут слои с аморфной структурой. Получение последних указывает на то, что, несмотря на интенсивную бомбардировку пленки ионами плазмы, температура в зоне роста остается достаточно низкой и не превышает  $250^\circ C$  (при  $250^\circ C$ , как показано нашими исследованиями [8], аморфные пленки кристаллизуются).

Рост монокристаллических пленок  $YBaCuO$  при столь низких температурах является убедительной демонстрацией возможностей метода плазменной активации и подтверждает высказанную гипотезу о том, что при распылении пленки ионами низких энергий в первую очередь удаляются атомные комплексы с наиболее дефектной структурой, тем самым позволяя в широких пределах управлять совершенством структуры пленок.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Куприянов М.Ю., Лихарев К.К. // УФН. 1990. Т. 160. № 5. С. 49-87.
- [2] Данилин Б.С. // Итоги науки и техники. 1990. Т. 26. С. 133-170.
- [3] Adachi H., Hirochi K., Setsune K. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 26. P. 2263-2265.
- [4] Hayashi S., Kawada T., Setsune K. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 7. P. L1487-L1488.
- [5] Окунев В.Д., Пафомов Н.Н. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 9. С. 1-6.
- [6] Okunev V.D., Samoilenko Z.A. // Materials Science Forum. 1990. V. 62-64. P. 29-30.
- [7] Окунев В.Д., Самойленко З.А. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 2811-2815.
- [8] Окунев В.Д., Самойленко З.А. // Изв. РАН. Неорганич. материалы. 1992. Т. 28. № 4. С. 847-852.

Поступило в Редакцию  
4 февраля 1993 г.