

05.4;12

Осаждение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ пленок на обе стороны подложки методом магнетронного напыления

© Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, Д.В. Мастеров,
С.А. Павлов, А.Е. Парафин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
E-mail: masterov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 29 января 2010 г.

Исследованы особенности формирования пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ на обеих сторонах подложки при их поочередном нанесении методом магнетронного напыления в геометрии *on-axis*. При напылении пленки на первую сторону подложки, на ее второй стороне формируется тонкая пленка, которая может служить качественным подслоем при получении пленки заданной толщины на второй стороне подложки. Показано, что контроль свойств пленки, сформированной на обратной стороне подложки в процессе напыления на лицевую сторону, может служить тестом на оптимизацию технологических параметров роста.

Одним из наиболее важных применений эпитаксиальных пленок высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) являются фильтры СВЧ-диапазона [1]. При их изготовлении обычно используются подложки с выращенными на обеих сторонах пленками сверхпроводника. При получении таких структур могут возникать определенные технологические трудности [2]. В настоящей работе были исследованы условия формирования слоев YBCO на противоположных сторонах подложки в процессе поочередного *on-axis* магнетронного напыления. На рис. 1 схематически изображена конфигурация нашей ростовой установки. Технология получения YBCO пленок подробно описана в работе [3].

В работе использовались подложки LaAlO_3 двусторонней полировки производства CrysTec GmbH и дисковые мишени YBaCuO стехиометрического („1–2–3“) состава. Рентгеноструктурный анализ пленок, в том числе и определение эффективной толщины фазы YBCO [4]

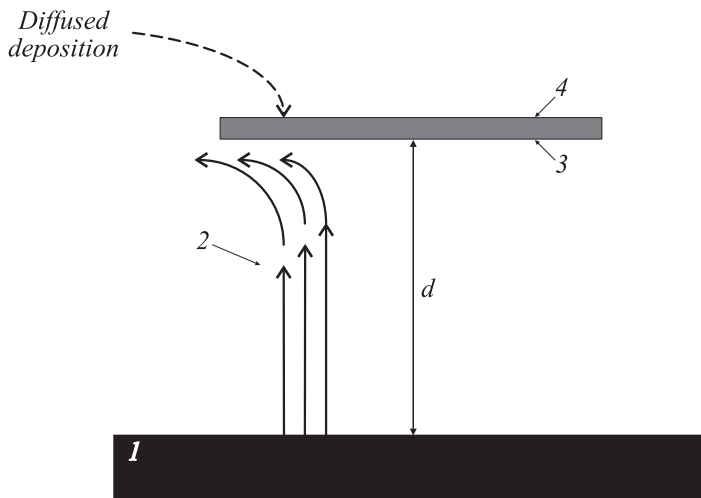


Рис. 1. Схема напыления пленок YBCO: 1 — мишень, 2 — направление газовых потоков, 3 — лицевая сторона подложки, 4 — обратная сторона подложки.

проводился на дифрактометре ДРОН-4 на $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Для исследования поверхностной морфологии пленок использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) „Solver-P4“.

Структурное совершенство получаемых пленок характеризовалось величиной $\Delta\omega$ — полушириной кривой качания рентгеновского отражения YBCO(005). Эта величина характеризует в основном разориентацию направлений оси c блоков мозаики.

Если специально не защитить экраном обратную сторону подложки, на ней будет осаждаться материал мишени и, следовательно, будет расти пленка YBCO, но со скоростью, существенно меньшей, чем на стороне, обращенной к мишени. Таким образом, в одном процессе выращиваются две пленки, причем условия их роста сильно различаются. Сравнение характеристик полученных пленок позволяет сделать важные выводы о технологических параметрах проведенного процесса напыления и ускорить выбор оптимального режима. Например, в табл. 1 приведены толщина, скорость роста, структурные параметры,

Таблица 1. Пример характеристик пленок, сформировавшихся на лицевой и обратной сторонах подложки в результате *on-axis* осаждения на лицевую сторону

Сторона	Толщина пленки, nm	Скорость роста, nm/h	$\Delta\omega$, deg	Параметр решетки c , nm	Критическая температура T_c , К	Ширина перехода ΔT , К
Лицевая	330	110	1.05	1.1649	78	11
Обратная	60	20*	0.42	1.1666	87.2	3

* Толщина пленки неоднородна по площади. Характеристики пленки измерены на расстоянии 2 mm от края подложки.

критическая температура и ширина перехода у пленок, выросших на лицевой и обратной сторонах подложки при неоптимизированных параметрах технологического процесса.

Достаточно высокое качество пленки, сформировавшейся на обратной стороне подложки, говорит о том, что состав вещества, переносимого к подложке, близок к стехиометрическому, а температура роста близка к оптимальной. Низкое качество пленки на лицевой стороне, по-видимому, определяется тем, что в процессе роста она подвергается бомбардировке высокоэнергетичными частицами. К их числу относятся отрицательные ионы кислорода и электроны, ускоренные в поле мишени; ионы аргона, ускоренные в поле плавающего потенциала подложки; отраженные от мишени и нейтрализованные первичные ионы; нейтральные частицы, возникающие в результате обменных процессов и др. Такая бомбардировка даже при энергиях падающих частиц ~ 1 eV вызывает селективное перераспыление и десорбцию адатомов, в результате чего катионный состав пленки может сильно меняться [5–7]. Катионный состав, в свою очередь, определяет все структурные и электрофизические свойства пленок YBCO. Таким образом, в рассматриваемом случае для достижения оптимального режима *on-axis* напыления следовало либо повысить давление рабочей смеси в реакторе, либо уменьшить напряжение разряда.

Дополнительным подтверждением того, что различие характеристик пленок, параметры которых приведены в табл. 1, обусловлены различной степенью термализации энергичных частиц, могут служить АСМ-изображения пленок МР 2.56 и МР 2.57, приведенные на рис. 2.

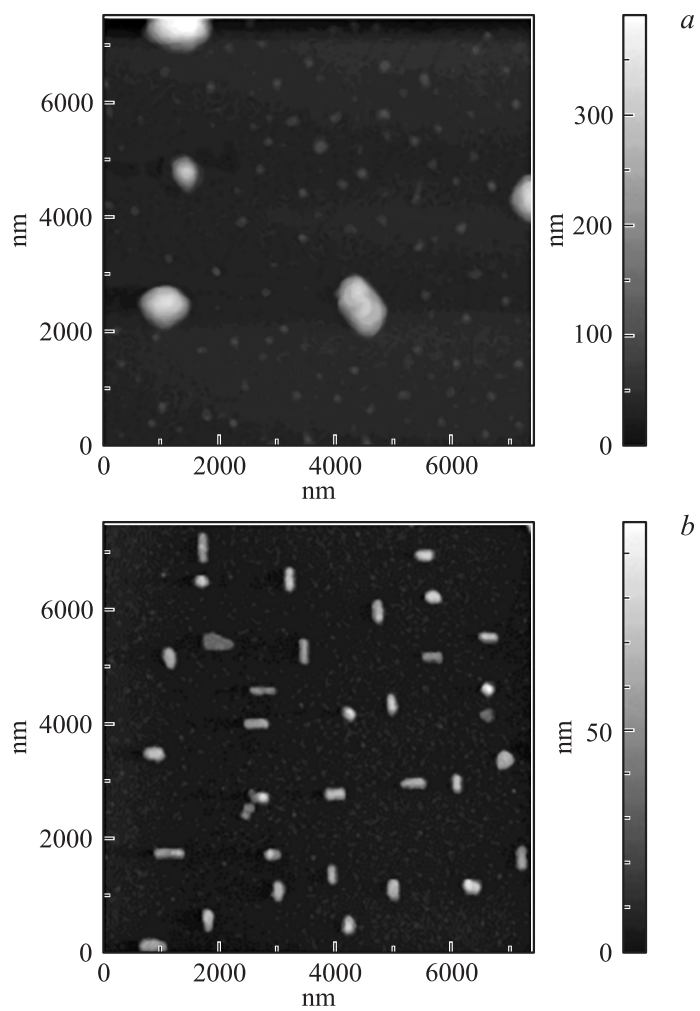


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности: *a* — обратной стороны образца МР 2.56, *b* — лицевой стороны образца МР 2.57.

Пленка МР 2.57 была выращена на обращенной к мишени стороне подложки, а МР 2.56 сформировалась на обратной стороне другого образца. Технологические параметры в обоих процессах роста были одинаковы и оптимизированы, скорости роста отличались примерно на порядок. Толщина обеих пленок была одинаковой и составляла ≈ 9 nm. Видно, что пленка МР 2.57 имеет меньший средний размер зерен, а также меньшую общую шероховатость, что свидетельствует о влиянии на растущую пленку бомбардировки энергичными частицами [5,6]. Из-за очень низкой скорости роста и латеральной неравномерности толщины практически невозможно использовать режим напыления, в котором осаждение материала происходит только на обратной стороне подложки.

Далее приведем сравнение структурных параметров пленок, выращенных на обеих сторонах подложки. Пленки имели конечную толщину около 200 nm. Рост проводился при одинаковых технологических параметрах: давлении, температуре подложки, напряжении и токе разряда магнетрона. Технологические параметры были оптимизированы таким образом, чтобы электрофизические характеристики пленок — критическая температура, критический ток и поверхностное СВЧ сопротивление — на обеих сторонах имели высокие значения. Сначала выращивалась пленка на одной стороне подложки, затем установка выключалась, подложка переворачивалась и выращивалась вторая пленка. За время осаждения первой пленки до толщины 200 nm на стороне подложки, противоположной мишени, формировалась пленка толщиной около 10 nm. Таким образом, отличие между условиями осаждения пленок на первой и второй сторонах подложки состояло в начальных условиях роста. На первой стороне пленка начинала расти с высокой скоростью непосредственно на поверхности подложки. На второй стороне сначала в существенно более термализованных условиях на поверхность подложки осаждался „автоподслой“ толщиной 5–10 nm, и затем вторая пленка доращивалась до толщины 200 nm в обычных условиях, обеспечивающих приемлемую скорость роста. Измерения показали, что величина $\Delta\omega$ данного „автоподслоя“ зависела от его толщины t : $\Delta\omega > 0.5^\circ$ при $t < 10$ nm и $\Delta\omega < 0.3^\circ$ при $t \geq 10$ nm. В табл. 2 приведены величины $\Delta\omega$ нескольких образцов. Из приведенных данных видно, что структурные параметры пленок, выращенных на „автоподслое“, всегда выше. Отметим, что для проверки напылялись образцы и с экранированием обратной стороны подложки.

Таблица 2. Величина разориентации оси c блоков мозаики $\Delta\omega$ (в градусах) в пленках, полученных на противоположных сторонах подложки

Номер образца	Первая сторона	Вторая сторона (с „автоподслоем“)
1	0.39	0.33
2	0.40	0.29
3	0.56	0.36
4	0.34	0.24
5	0.33	0.30

В этом случае заметного различия величин $\Delta\omega$ на разных сторонах одной подложки не наблюдалось.

В результате проведенного исследования установлено, что используемая методика магнетронного напыления позволяет получать YBCO пленки высокого качества на обеих сторонах подложки. Показано, что величина разориентации оси c блоков мозаики $\Delta\omega$ пленок в большой степени определяется условиями формирования начального слоя толщиной до 10 nm. При обеспечении роста данного слоя в условиях термализации частиц газовой среды возможно получение более толстых пленок с величиной $\Delta\omega < 0.3^\circ$ даже при последующем росте в менее термализованных условиях. Особенностью роста пленки на обратной стороне подложки является отсутствие ионной и электронной бомбардировки. Поэтому контроль свойств пленки, формирующейся на обратной стороне подложки при *on-axis* осаждении на лицевую сторону, является удобным тестом на оптимизацию технологических параметров роста.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-08-00632-а.

Список литературы

- [1] Tao Yu, Chunguang Li, Fei Li et al. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2009. V. 57. N 7. P. 1783.
- [2] Müller G., Aschermann B., Chaloupka H. et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1997. V. 7. N 2. P. 1287.

- [3] *Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е., Дроздов Ю.Н.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 10. С. 109.
- [4] *Варганов А.В., Вовилкин Е.А., Вышеславцев П.П.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63. В. 8. С. 608.
- [5] *Данилин Б.С.* // Обзоры по высокотемпературной сверхпроводимости. 1992. В. 4(8). С. 101.
- [6] *Rossmagel S.M., Cuomo J.J.* // Thin Solid Films. 1989. V. 171. P. 143.
- [7] *Технология тонких пленок (справочник)* / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Т. 1. Пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М.: Сов. радио, 1977. 664 с. (Handbook of Thin Film Technology / Ed. by L.I. Maissel and R. Glang. V. 1. McGraw Hill Hook Company, 1970).