

05.4;11;12

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДИФФУЗИОННЫХ НАРУШЕНИЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

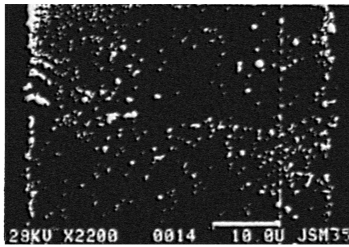
© М.В.Павловская

Очевидное требование к тонкопленочным структурам при эксплуатации состоит в том, чтобы они сохраняли свое строение и свойства в течение длительного времени при рабочих температурах ($T = 78$ К). Существует ряд экспериментальных работ (ссылки в работе [1]), указывающих на деградацию объемных и пленочных образцов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($YBaCuO$) после пропускания тока. И следовательно, для успешного использования пленок $YBaCuO$ в технике необходимо изучить механизмы их деградации при длительном пропускании электрического тока.

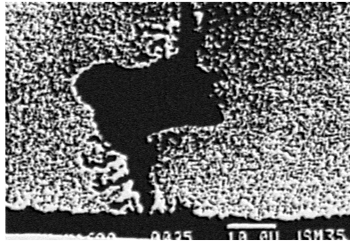
При испытании пленок в сверхпроводящем состоянии, когда величина транспортного тока ниже критической, в ряде работ деградация проявлялась в виде локальных изменений структуры и состава образцов. При испытании пленок в нормальном состоянии при температуре $T = 300$ К деградацию под действием тока связывают с электродиффузионным перемещением (миграцией) атомов кислорода [2]. В последующей работе тех же авторов [3] методами микрорамановской и оптической спектроскопии показано, что под действием внешнего электрического поля происходит движение к катоду кислородных вакансий (и их агломерация), что вызывает встречный поток атомов кислорода к аноду.

В настоящей работе проведено испытание пленок в резистивном состоянии при температуре $T = 78$ К. Целью работы являлось определение влияния длительного пропускания тока на морфологию поверхности пленок $YBaCuO$ и получение оценок времени работы до разрушения структур в виде полосок — времени жизни полосок.

Объектом исследования являлись блочно-эпитаксиальные пленки $YBaCuO$ толщиной (0.2–0.3) мкм на подложке Al_2O_3 с подслоем CeO_2 . Структуры в виде полосок имели следующие размеры: ширина — 50 мкм, длина — 1 мм. Испытания проводились при пропускании импульсов тока, образованных в результате однополупериодного выпрямления синусоидального тока частотой 100 Гц. Сопротивление образцов в резистивном состоянии составляло (10–40) Ом при температуре $T = 100$ К — (100–150) Ом. Более подробно характеристики образцов и методика проведения испы-



а



б

Рис. 1. Фотографии повреждений пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, сделанные методом РЭМ.

таний представлены в предыдущей нашей работе [1], где сообщалось о результатах испытаний пленок в сверхпроводящем состоянии при $T = 78 \text{ K}$. Исследование морфологии поверхности пленок до и после проведения испытаний проводилось с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) в режиме вторичных электронов на установке JSM-35. Для улучшения качества изображения поверхность образцов декорировалась тонким слоем (6 нм) золота. Количество образцов, время испытаний ($t_{\text{и}}$) и состояние образцов после испытаний показаны в таблице.

№ образца	$t_{\text{и}}$, ч	Состояние
1	103	Разрыв
2	250	Разрыв
3	130	+
4	310	+
5	30	Разрыв
6	70	+

Знак (+) указывает, что испытания образцов № 3, 4, 6 более указанного времени не проводились. Для трех образцов № 1, 2, 5 наблюдалось образование повреждений, которые приводили к нарушению сплошности полоски, т. е. к разрыву. Повреждения имели характер трещин, распространяющихся до подложки (рис. 1). Для образца № 2 разрыв произошел по дефекту в виде полости (рис. 1, б), которая была и до испытаний. Можно отметить следующие особенности повреждений, приводящих к разрыву:

— образование трещин происходит поперек (не вдоль) полоски;

— трещины расположены в центральной части полоски, не вблизи перехода к контактной площадке большего размера;

— образование наростов и участков оплавления по краям трещин, а также повреждений в виде микротрещин, которые ориентированы вдоль полоски.

Образование поперечных трещин, приводящих к разрыву полосок, вероятно, связано с увеличением локальной плотности тока при уменьшении площади поперечного сечения проводника. Когда трещина имеет заметную перпендикулярную к току составляющую длины, эффективная ширина полоски уменьшается. Это влечет за собой увеличение локальной плотности тока, что соответствует увеличению генерации тепла и локальной температуры полоски. Трещины вдоль полоски, параллельные току, оказывают меньший эффект на плотность тока и самонагрев, тогда как трещины, перпендикулярные току (поперек полоски), играют решающую роль и обуславливают выход элемента из строя. Образование подобного вида повреждений (трещин) при испытаниях в интервале низких температур наблюдалось и на полосковых структурах пленок таллиевого состава [4].

Сравнительный анализ морфологии поверхности пленок до и после испытаний показал, что после испытаний структура поверхности сильно меняется, как показано на рис. 2. В исходном состоянии образец № 6 (рис. 2, а) имел плотную структуру; после $t_n = 310$ ч (рис. 2, б) структура становится дефектной с наличием чередующихся пор и бугорков. Для образца № 4, который имел в исходном состоянии более рыхлую структуру поверхности (рис. 2, в), после $t_n = 70$ ч наблюдается увеличение размеров пор и образование наростов большого размера (рис. 2, а). Изменение морфологии поверхности с образованием сетки пор и бугорков имело место как для образцов № 3, 4, 6, так и для образцов № 1, 2, 5, для которых наблюдался разрыв полосок.

Приведенные результаты показывают, что воздействие тока высокой плотности на полосковые структуры на осно-

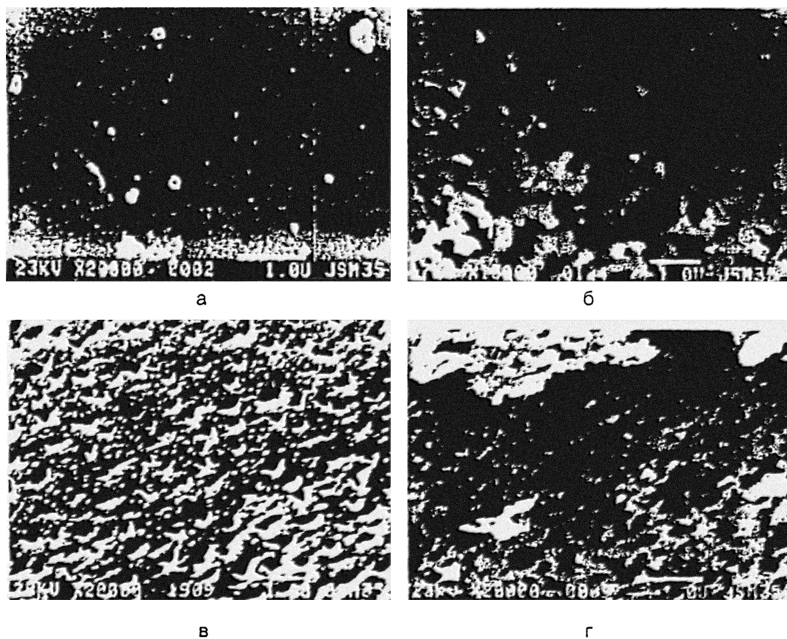


Рис. 2. Морфология поверхности пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: а, в — образцы № 6 и 4 до испытаний; б, г — образцы № 6 и 4 после испытаний.

ве пленок YBaCuO в резистивном состоянии при температуре 78 К приводит к изменению морфологии поверхности полосок и к нарушению их сплошности (разрыву). Получена оценка временного интервала образования повреждений, которая составляет (100–300) ч. По-видимому, образование подобных дефектов при низких температурах происходит вследствие электродиффузионных перемещений атомов и вакансий под действием внешнего электрического поля, подобно как и при комнатной температуре [3], но значительно медленнее.

Наличие вакансий в кристаллической решетке соединений YBaCuO (позиции O5 в плоскости Cu1 вакантны) позволяет предположить, что в указанных соединениях диффузия осуществляется посредством вакансионного механизма, при котором один из соседних атомов занимает близлежащую вакансию. Наиболее “подвижными” атомами в соединении YBaCuO являются атомы кислорода. Энергия активации атомов кислорода по данным работ [5,6] составляет величину 33 мэВ в широком интервале температур. Столь

малые значения энергии активации говорят о слабой связи атомов кислорода с решеткой, что также указывает на возможность протекания диффузионных процессов при низких температурах.

Автор благодарит ONERA/CERT (Франция) за финансовую поддержку.

Список литературы

- [1] Павловская М.В., Разумов С.В. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 17. С. 15-20.
- [2] Moeckly B.H., Lathor D.K., Buhrman R.A. // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. N 1. P. 400-417.
- [3] Moeckly B.H., Buhrman R.A., Sulewski P.E. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 11. P. 1427-1429.
- [4] Holstein W.L., Wilker C., Pang P.S.W., Laubacher D.B., McKenna S.P., Face D.W. // IEEE Transaction of Applied Superconductivity. 1995. V. 5. N 2. P. 1693-1696.
- [5] Singh P., Nyayate M.N., Devare S.H., Devare H.G. // Phys. Rev. B. 1988. V. 39. N 4. P. 2308-2311.
- [6] Jantsch S., Ihringer J., Maicle J.K. // J. Less.-Comm. Metals. 1989. V. 150. P. 167-175.

Поступило в Редакцию
12 июля 1996 г.
