

02

## Структурное состояние образцов ВТСП-проводников второго поколения, полученных методом лазерной абляции

© Т.П. Криницина<sup>1</sup>, С.В. Сударева<sup>1</sup>, Ю.В. Блинова<sup>1</sup>, Е.И. Кузнецова<sup>1</sup>, Е.П. Романов<sup>1</sup>,  
М.В. Дегтярев<sup>1</sup>, О.В. Снигирев<sup>2</sup>, Н.В. Порохов<sup>2</sup>, Д.Н. Раков<sup>3</sup>, Ю.Н. Белотелова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара,  
Москва, Россия

E-mail: jml@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 10 июля 2012 г.)

Разными методами исследована структура буферных слоев и осажденных пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Y123), обладающих высокой критической плотностью тока ( $\sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ ). Обнаружено, что сверхпроводящие пленки и буферные слои обладают мелкодисперсной структурой. Считаем, что эта структура вместе с высокой текстурой пленок Y123 типа (001) ответственны за высокую критическую плотность тока. В буферных слоях обнаружена необычная текстура, которая отличается от текстуры подложек и пленок Y123. В сверхпроводящих пленках, осажденных на буферные слои  $\text{CeO}_2$ , наблюдалась система взаимно перпендикулярных линий, которая в нашем случае представляет собой доменную структуру с частицами Y123 на границах.

### 1. Введение

В настоящее время высокотемпературные сверхпроводящие композиционные провода на основе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (Y123) на металлических лентах-подложках производятся в промышленных масштабах в США, Германии, Китае, Японии. В России прилагаются значительные усилия для наверстывания многолетнего запаздывания в этой области прикладных разработок и создания собственной технологии производства ВТСП проводов второго поколения.

Тонкопленочные ВТСП-провода второго поколения, полученные разными способами осаждения сверхпроводящей пленки на подложки [1–7] обладают высокой критической плотностью тока (более  $10^6 \text{ A/cm}^2$ ), что на несколько порядков выше, чем у их предшественников — ВТСП-проводников первого поколения — многожильных композитов на основе керамики  $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  в Ag-оболочке. Возникает вопрос: чем обусловлены столь высокие значения критического тока осажденных пленок Y123. Помимо высокой текстуры (001), которая передается сверхпроводящей пленке от текстурированных подложек (оси  $c$  решетки фазы Y123 перпендикулярны плоскости подложек), должны быть еще какие-то причины и особенности структуры, которые обуславливают столь высокие значения критического тока. Из многочисленных экспериментов известно, что напыленные пленки из любых материалов обычно обладают мелкодисперсной структурой. Однако в работе [8] представлены электронно-микроскопические изображения структуры пленок Y123, полученных методом лазерного осаждения на подложки из сапфира и  $\text{LaAlO}_3$  с буферным слоем  $\text{CeO}_2$ , которые демон-

стрируют структуру, характерную для массивных образцов Y123. Это двойниковая структура из длинных двойников шириной  $\sim 500 \text{ \AA}$ . При этом критическая плотность тока может достигать  $5 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ . Такая же крупнодвойниковая структура обнаружена в пленках Y123, осажденных методом лазерной абляции при  $725^\circ\text{C}$  на подложки  $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и обладающих высокими критическими токами [9]. Здесь возможны два объяснения: либо представленные микрофотографии отражают структуру не всего образца, а отдельных его участков, либо структура везде двойниковая, как в кристаллитах массивных образцов, но между отдельными фрагментами пленки имеется хорошая связь. Другие электронно-микроскопические работы по структуре осажденных пленок Y123 нам неизвестны.

Для развития отечественной технологии производства ВТСП-проводов второго поколения необходимо накопление большого объема знаний, в том числе и о структурных особенностях изготовленных образцов и их влиянии на электрофизические параметры — плотность критического тока и температуру перехода в сверхпроводящее состояние.

В настоящей работе разными структурными методами исследованы композиционные ленточные образцы  $\text{Ni-W}/(\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3)/\text{Y123}$ ,  $\text{Ni-W}/\text{CeO}_2/\text{Y123}$ , полученные методом лазерной абляции и обладающие достаточно высокими значениями температуры перехода в сверхпроводящее состояние и критической плотности тока. Определены фазовый состав композиционных объектов, изучена структура сверхпроводящих пленок и буферных слоев, определены текстура и сопряжение решеток всех составляющих образца, оценены параметры структурного несоответствия  $\delta$  между решетками

составляющих, а также упругие напряжения в образце и их последствия.

## 2. Образцы и методика эксперимента

В работе исследовано три вида коротких композиционных образцов, полученных методом лазерной абляции с целью отработки физических основ технологии изготовления ВТСП-проводов второго поколения. Напыление пленок проводилось при  $800^\circ\text{C}$ , последующий отжиг — при  $550^\circ\text{C}$ , затем следовало медленное охлаждение в атмосфере кислорода [10].

Образец № 1 представлял собой отрезок текстурированной по (001) ленты сплава Ni–W размером  $10 \times 10 \text{ mm}$  толщиной  $70 \mu\text{m}$  с нанесенными на него сначала буферным слоем YSZ ( $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ ) толщиной  $\sim 100 \text{ nm}$ , затем — сверхпроводящим слоем толщиной  $150 \text{ nm}$ . Температура перехода образца в сверхпроводящее состояние  $T_c$ , измеренная по кривой магнитной экранировки, была равна  $80 \text{ K}$ . Область напыления пленок представляла собой круг диаметром  $9 \text{ mm}$ , вписанный в квадрат подложки.

Образец № 2 — это отрезок Ni–W-ленты с двумя буферными слоями  $\text{CeO}_2$ , наносимыми при температуре  $800^\circ\text{C}$ , их общая толщина  $\sim 100 \text{ nm}$ . Первый буферный слой наносился в вакууме с целью предотвращения диффузии оксида никеля в пленку Y123, второй — в атмосфере кислорода для предотвращения диффузии кислорода из напыляемой затем пленки Y123 в пленку буферного слоя. Толщина напыленного сверхпроводящего слоя Y123 составляла  $\sim 150 \text{ nm}$ . Область напыления сверхпроводящей пленки — четверть круга диаметром  $\sim 9 \text{ mm}$ , на буферном слое по всему кругу. Температура перехода в сверхпроводящее состояние данного образца составляла  $T_c = 81 \text{ K}$ .

Образец № 3 отличался от образца № 2 тем, что буферные слои  $\text{CeO}_2$ , каждый толщиной по  $50 \text{ nm}$ , наносились при температуре  $810^\circ\text{C}$ . Данный композиционный образец сверху был покрыт защитной пленкой золота. Область напыления пленок — круг диаметром  $\sim 9 \text{ mm}$ . Начало перехода в сверхпроводящее состояние наблюдалось при  $T_c = 78 \text{ K}$ .

Рентгеноструктурные исследования проводили на автоматизированном дифрактометре STADI-P в излучении  $\text{CuK}\alpha$ . Электронно-микроскопический анализ выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta-200 с приставкой EDAX для микроанализа и просвечивающего электронного микроскопа JEM-200CX. Тонкие фольги для просвечивающего электронного микроскопа готовили электролитически.

## 3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены участки рентгеновских дифрактограмм для всех трех образцов. Для всех композиционных ленточных образцов характерна высокая текстура

сверхпроводящих пленок типа (001) — на дифрактограммах присутствуют только линии (001) фазы Y123, а также высокая текстура (100) Ni–W-подложек (на при-

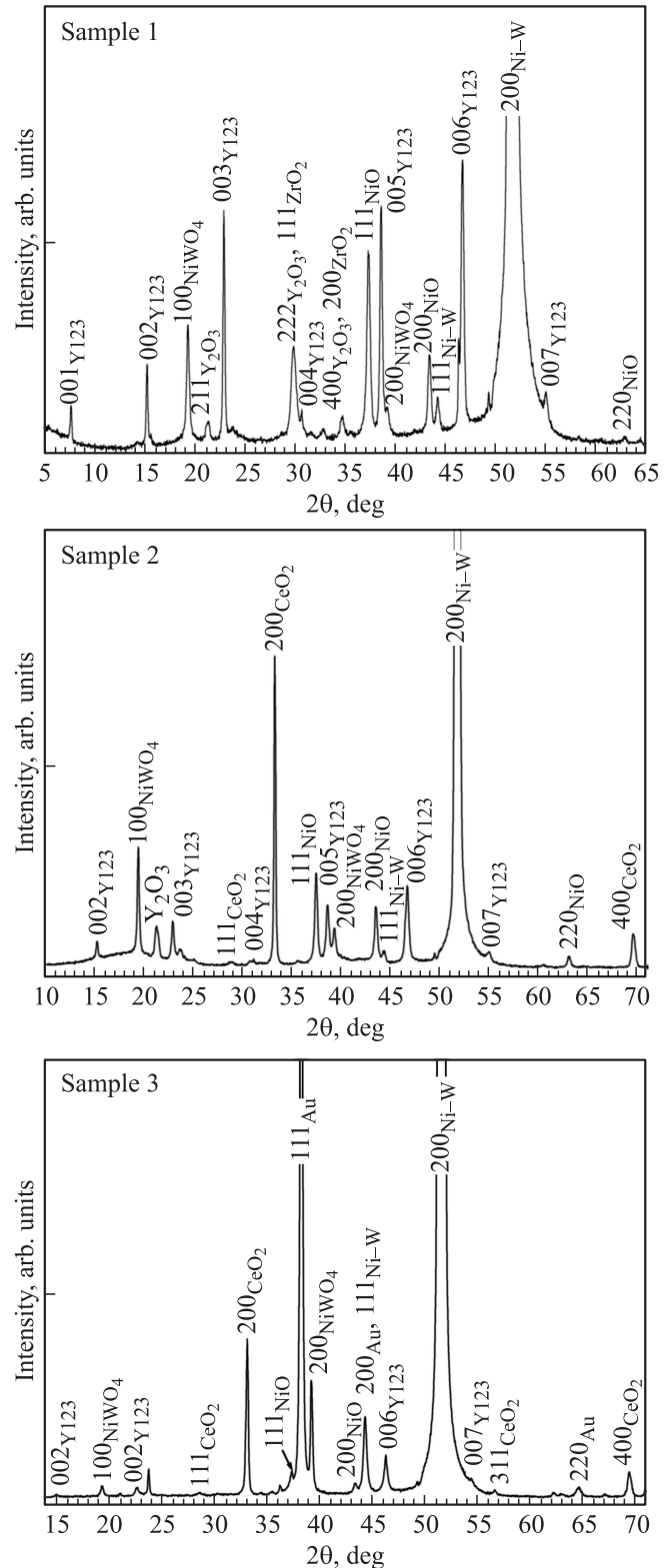


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы композиционных образцов: Ni–W/YZS/Y123 (№ 1); Ni–W/CeO<sub>2</sub>/Y123 (№ 2); Ni–W/CeO<sub>2</sub>/Y123/Au (№ 3), излучение  $\text{CuK}\alpha$ .

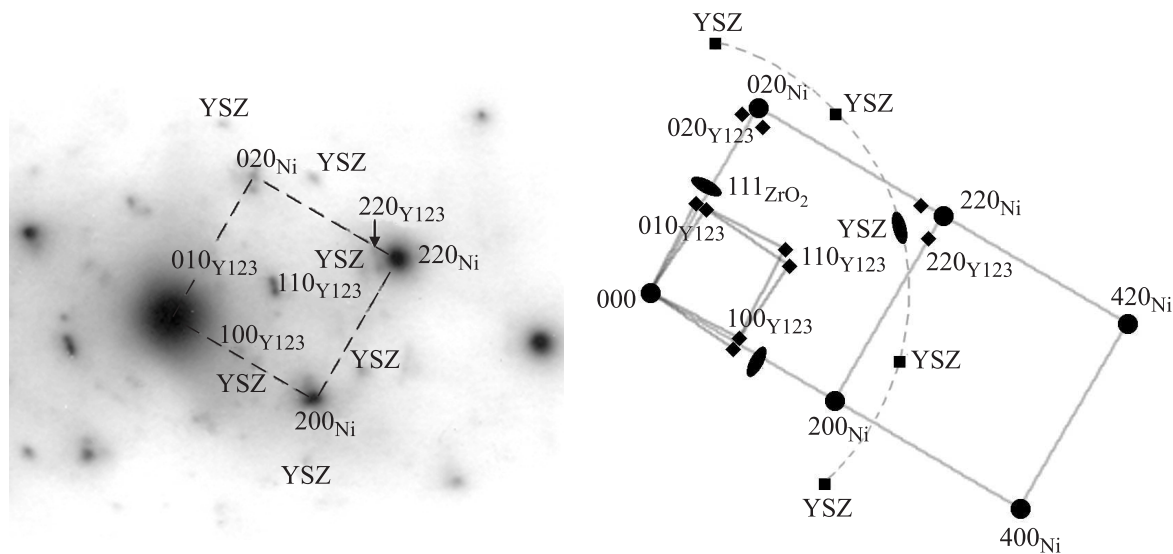


Рис. 2. Электронограмма и соответствующая схема образца Ni–W/YSZ/Y123 (№ 1).

веденных участках дифрактограмм наблюдается только одна, очень сильная линия  $(200)_{\text{Ni-W}}$ . Более слабая интенсивность линий  $(001)$  фазы Y123 для образцов № 2, 3 связана с небольшим объемом сверхпроводящей пленки в образце № 2 и наличием внешнего покрытия из Au в образце № 3. Параметры решеток фазы 123  $a$  и  $b$  для всех трех образцов одинаковы:  $a = 3.8200 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8860 \text{ \AA}$ , а параметры  $c$  несколько отличаются:  $c = 11.6859, 11.6841, 11.7483 \text{ \AA}$  для образцов № 1, 2 и 3 соответственно. Если сопоставить известную зависимость  $[11]$  постоянных решетки фазы 123 от содержания кислорода и полученные нами параметры  $a, b, c$ , то можно отметить, что по данным  $a$  и  $b$  кислородный индекс фазы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  во всех трех образцах близок к 7, а по данным параметров  $c$  он несколько ниже.

На всех дифрактограммах присутствуют линии от буферных слоев YSZ ( $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ ) и  $\text{CeO}_2$ . Анализ показал, что все эти фазы имеют кубическую решетку с параметрами:  $a_{\text{ZrO}_2} = 5.1477 \text{ \AA}$ ,  $a_{\text{Y}_2\text{O}_3} = 10.3927 \text{ \AA}$ ,  $a_{\text{CeO}_2} = 5.42 \text{ \AA}$ . Особо следует отметить появление фазы  $\text{ZrO}_2$  с кубической структурой. Согласно [12], кубический  $\text{ZrO}_2$  существует выше температуры  $2370^\circ\text{C}$ . Но высокотемпературная кубическая фаза  $\text{ZrO}_2$  с параметром  $a_{\text{ZrO}_2} = 5.1477 \text{ \AA}$  может быть застabilизирована при комнатной температуре добавкой в решетку  $\text{ZrO}_2$  оксида  $\text{Y}_2\text{O}_3$  в количестве от 15 до 20 mol.%, что, по видимому, и происходит в образце № 1. На дифрактограмме образца № 2 (Ni–W/ $\text{CeO}_2$ /Y123) обнаружена очень сильная линия  $(200)$  от буферного слоя  $\text{CeO}_2$ , а для образца № 3 (Ni–W/ $\text{CeO}_2$ /Y123/Au) эта линия намного сильнее линии  $(111)$ , что может свидетельствовать об образовании текстуры  $(001)$ . Что касается буферного слоя ( $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$ ) образца № 1 (Ni–W/YSZ/Y123), то данные рентгенографии не позволяют судить о существовании в нем текстуры.

Из сопутствующих фаз во всех образцах обнаружены оксиды  $\text{NiWO}_4, \text{NiO}$ .

Рассмотрим результаты электронно-микроскопического исследования. На рис. 2 приведена электронограмма композиционного образца № 1 и ее схема, поскольку рефлексы фазы Y123 и буферного слоя слабые. На электронограмме присутствуют рефлексы всех составляющих композиционной ленты, и электронограмма наглядно демонстрирует текстуру каждой составляющей. Плоскость  $(001)$  сверхпроводящей пленки параллельна плоскости  $(001)$  подложки из сплава Ni–W. Однако направление  $[010]_{123}$  не параллельно направлению  $[010]_{\text{Ni-W}}$ . Как видно, на электронограмме имеется по два дифракционных пятна фазы Y123 около узлов  $(010)$  и  $(020)$ , которые располагаются симметрично по обе стороны направления  $[010]^*$ . Это означает, что в сверхпроводящей пленке присутствуют два вида текстурованных по плоскости  $(001)_{\text{Ni-W}}$  кристаллов фазы 123, оси  $[010]$  которых развернуты относительно оси  $[010]_{\text{Ni-W}}$  на угол  $\sim 2^\circ$ . Эффект дезориентации хорошо виден и около узлов  $(110)_{\text{Y123}}$  и  $(220)_{\text{Y123}}$ .

Неожиданный результат по текстуре получился для буферного слоя этого образца. Из электронограммы и ее схемы следует, что рефлексы  $(111)_{\text{ZrO}_2} + (222)_{\text{Y}_2\text{O}_3}$  и  $(222)_{\text{ZrO}_2} + (444)_{\text{Y}_2\text{O}_3}$  (последнее обозначено на схеме YSZ) в виде вытянутых по дебаевскому кольцу дуг и отдельных точек располагаются симметрично около осей  $[100]_{\text{Ni-W}}^*$ ,  $[010]_{\text{Ni-W}}^*$  и  $[110]_{\text{Ni-W}}^*$ . Таким образом, в этом буферном слое реализуется только одна очень специфическая текстура: оси  $[111]_{\text{buff}}$  группируются вблизи направлений типа  $[100]_{\text{Ni-W}}$  и  $[110]_{\text{Ni-W}}$ . И при такой необычной текстуре буферного слоя растущая сверхпроводящая пленка наследует текстуру подложки  $(001)$ .

Из приведенной на рис. 2 электронограммы можно получить также представление о величине и характере упругих напряжений, существующих в данном композиционном образце. Так, в направлении  $[110]$  параметр

структурного несоответствия  $\delta$  между решетками Ni–W-подложки и буферного слоя, определяемый по формуле

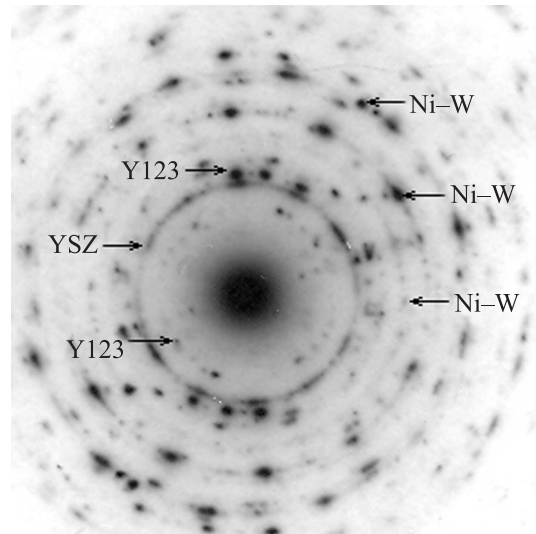
$$\delta = \frac{2(d_1 - d_2)}{(d_1 + d_2)},$$

равен 18% ( $d_{(220)\text{Ni-W}} = 1.2525 \text{ \AA}$ ,  $d_{(222)\text{ZrO}_2} = 1.4860$ ,  $d_{(444)\text{Y}_2\text{O}_3} = 1.5000 \text{ \AA}$ ). В этом же направлении [110] параметр структурного несоответствия  $\delta$  между решетками буферного слоя и сверхпроводящей пленки составляет  $\sim 9\%$  ( $d_{(220)\text{Y123}} = 1.3619 \text{ \AA}$ ,  $d_{(222)\text{ZrO}_2} = 1.4860 \text{ \AA}$ ,  $d_{(444)\text{Y}_2\text{O}_3} = 1.5000 \text{ \AA}$ ). Причем со стороны буферного слоя на подложку и сверхпроводящую пленку действуют растягивающие напряжения. В направлении же [100] параметр структурного несоответствия  $\delta$  между решетками сверхпроводящего и буферного слоев составляет 25% ( $d_{(100)\text{Y123}} = 3.82 \text{ \AA}$ ,  $d_{(111)\text{ZrO}_2} = 3.11 \text{ \AA}$ ,  $d_{(222)\text{Y}_2\text{O}_3} = 2.97 \text{ \AA}$ ), причем на пленку Y123 действуют сжимающие напряжения.

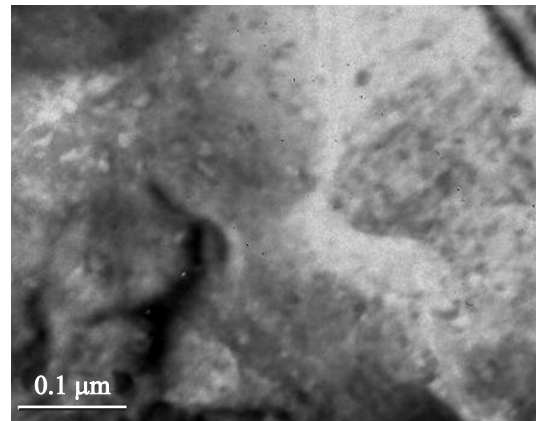
Такие большие упругие напряжения приводят к катастрофическим изменениям в структуре композиционной ленты, когда сдерживающий эффект со стороны Ni–W-подложки становится слабым. Это происходит, например, во время электролитического утонения образца с целью получения фольги для просвечивающего электронного микроскопа. Как только толщина Ni–W-подложки становится меньше некоторой критической, под действием упругих напряжений происходит пластическая деформация во всех составляющих образца: структура Ni–W-подложки сильно измельчается, блоки, зерна разворачиваются на  $360^\circ$ , на электронограммах появляются дебаевские кольца, принадлежащие всем составляющим ленты (рис. 3). Основной разворот в Ni–W-подложке происходит в плоскости (001), так как линия (200)<sub>Ni-W</sub> на электронограмме много сильнее, чем (111)<sub>Ni-W</sub>.

Расчет электронограммы (рис. 3) показал, что межплоскостные расстояния, соответствующие Ni–W-подложке и буферному слою после такой деформации сохранили свои значения, а межплоскостные расстояния сверхпроводящей пленки сильно изменились по сравнению с исходным состоянием. Обычно пластическая деформация не изменяет межплоскостных расстояний, поэтому единственным объяснением этого факта является увеличение расстояния образец–фотопленка, вызванное отслаиванием сверхпроводящей пленки — так велики упругие напряжения в данном объекте. Поэтому получение тонкой фольги для исследования в просвечивающем электронном микроскопе, которая сохранила бы информацию обо всех составляющих образца, оказывается трудной задачей.

На рис. 4 приведено изображение структуры образца № 1 (Ni–W/YSZ/Y123), которое соответствует электронограмме на рис. 2. На общем фоне, который представляет собой монокристаллическую область Ni–W-подложки, видна мелкодисперсная составляющая от напыленных пленок. Размеры частиц (зе-



**Рис. 3.** Электронограмма образца № 1 после пластической деформации под действием упругих напряжений в композиционной ленте — результат утонения образца.

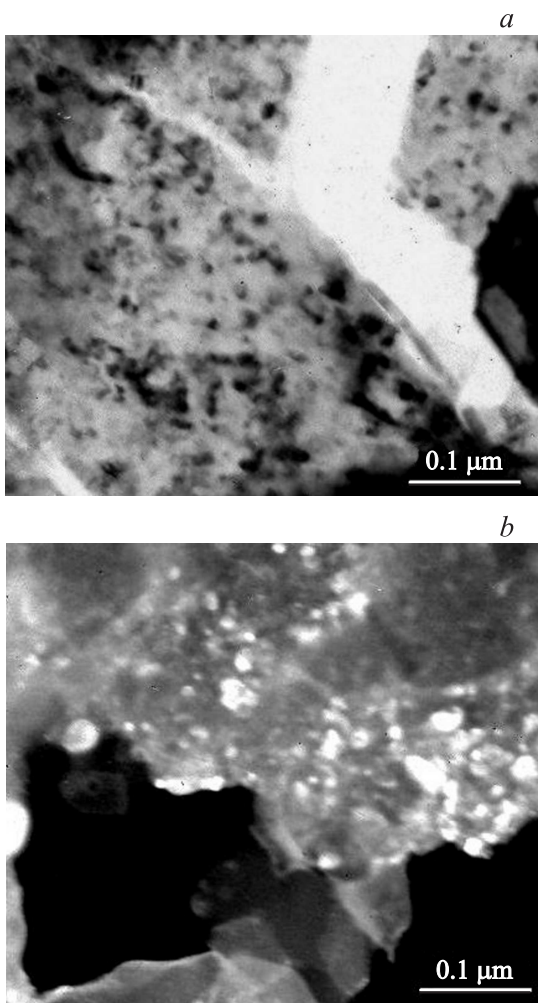


**Рис. 4.** Мелкодисперсная структура сверхпроводящей пленки (образец № 1). Изображение структуры соответствует электронограмме на рис. 2

рен)  $\sim 100\text{--}200 \text{ \AA}$ . Двойниковую структуру мы не обнаружили. По-видимому, именно такая мелкодисперсная структура сверхпроводящей пленки совместно с ярко выраженной ее текстурой (001) отвечают за высокие критические токи этих композиционных материалов.

Рис. 5, а демонстрирует электронно-микроскопическое светлопольное изображение структуры образца № 1 после пластической деформации тонкой фольги. Этому участку соответствует электронограмма с дебаевскими кольцами на рис. 3. Размер зерна после такой деформации практически не изменился, оставшись, как на рис. 4. Темнопольное изображение в рефлексах дебаевских колец от всех составляющих образца (кольца располагаются очень близко друг к другу) можно рассматривать





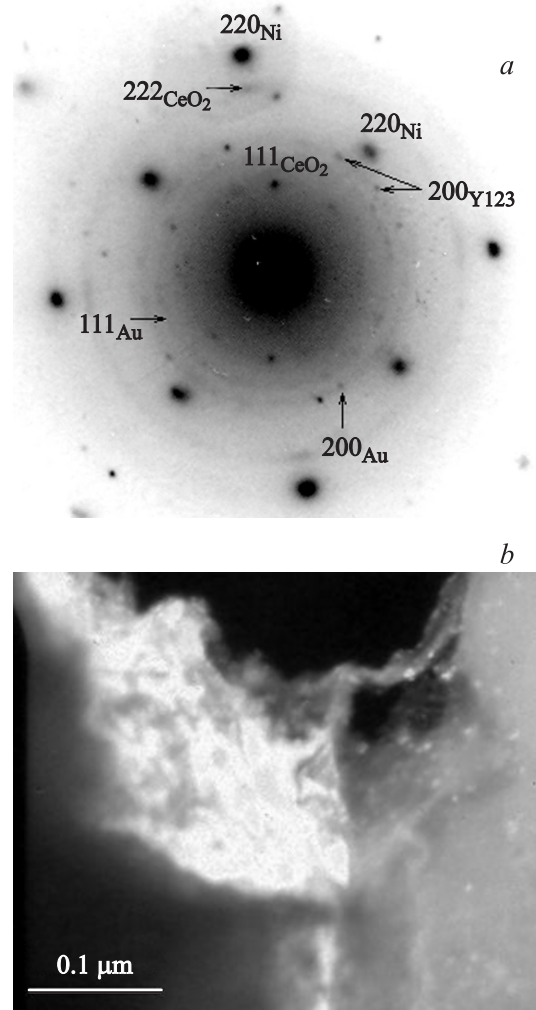
**Рис. 5.** Изображение структуры образца № 1 после пластической деформации под действием упругих напряжений: *a* — светлое поле, *b* — темное поле. Снимки соответствуют электронограмме на рис. 3.

как наглядную демонстрацию мелкозернистой структуры пленок.

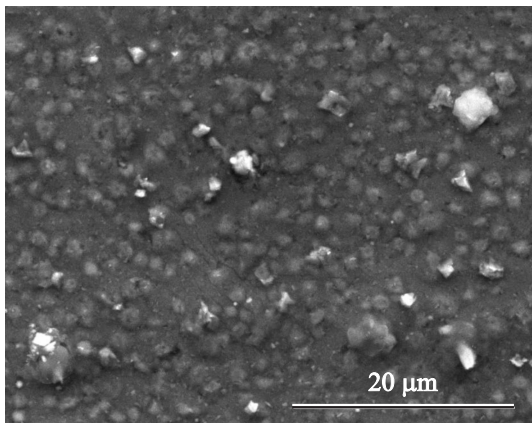
На рис. 6, *a* показана электронограмма, которая принадлежит образцу № 3 (Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123/Au). Электронограмма ориентирована точно по плоскости (001)<sub>Ni-W</sub><sup>\*</sup>. На ней наблюдаются четыре дебаевских кольца: два из них принадлежат внешнему защитному покрытию из Au, а два кольца относятся к буферному слою. Последнее свидетельствует об отсутствии острой текстуры (001) в буферном слое в этом участке. На дебаевском кольце (222)<sub>CeO<sub>2</sub></sub> вблизи узлов типа (220)<sub>Ni-W</sub> имеются усиления интенсивности, что указывает на образование специфической текстуры в буферном слое, как и в образце № 1, о которой упоминалось выше. Кроме того, около узлов типа (200)<sub>Ni-W</sub> симметрично по обе стороны, как и на электронограмме на рис. 2, располагаются рефлексы (200)<sub>Y123</sub>, что свидетельствует об образовании текстуры (001) в сверхпроводящей пленке. На темнопольном

изображении в рефлексах (220)<sub>Ni-W</sub> и (222)<sub>CeO<sub>2</sub></sub> видна мелкодисперсная структура буферного слоя.

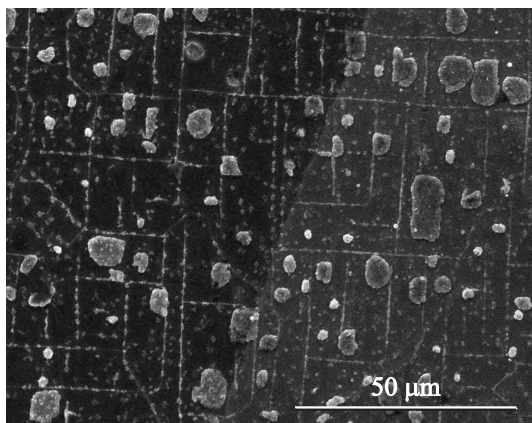
В работах [13,14] экспериментально обнаружен и теоретически обоснован важный эффект „шахматного“ распределения нормальных и касательных напряжений и деформаций на интерфейсе „поверхностный слой–подложка“, что является следствием сильно развитой поверхности и малого объема осажденной пленки и несоответствия кристаллических решеток сопрягаемых сред. Клетки „шахматного“ распределения растягивающих и сжимающих напряжений определяют соответствующую структуру материала в осажденной тонкой пленке: материал из клеток сжимающих напряжений вытесняется (во время напыления и при последующем отжиге) в клетки растягивающих напряжений. В результате на поверхности пленки формируется рельеф в виде огромного количества гранул или островков; на наш взгляд, пленка приобретает бугристое строение. Следствием „шахматного“ распределения напряжений на интерфейсе



**Рис. 6.** Образец Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123/Au (№ 3): *a* — электронограмма; *b* — мелкодисперсная структура буферного слоя, темное поле.



**Рис. 7.** Структура сверхпроводящей пленки образца Ni-W/YSZ/Y123 (№ 1) в сканирующем электронном микроскопе.



**Рис. 8.** Структура буферного слоя и сверхпроводящей пленки образца Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123 (№ 2) в сканирующем электронном микроскопе.

является и возникновение прямоугольной сетки трещин [13].

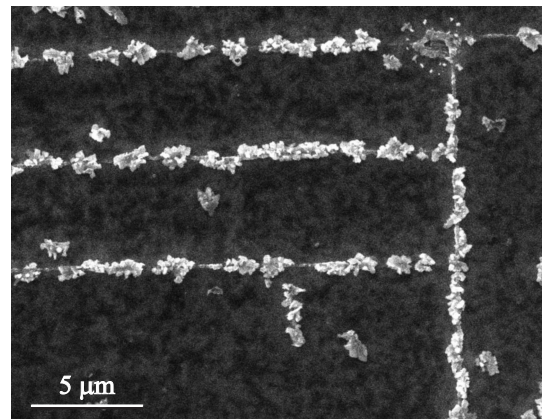
На рис. 7 показана структура сверхпроводящей пленки образца № 1 (Ni-W/YSZ/Y123), наблюдаемая в сканирующем электронном микроскопе. Видна яркая островковая или бугристая структура пленки, что находится в полном соответствии с представлениями, развиваемыми в работах [12,13]. Подобная структура наблюдалась также в работах [3,5,6].

Структура образца № 2 (Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123) в сканирующем электронном микроскопе совершенно иная (рис. 8): повсеместно видна сетка из взаимно перпендикулярных линий белого цвета, образующих в основном прямоугольные фигуры, а также некоторое количество каких-то крупных частиц светлого цвета. В большинстве работ [1,2,5,6,13,15] эти взаимно перпендикулярные линии называют трещинами, и считается, что их присутствие в сверхпроводящих пленках неблагоприятно влияет на критический ток. Так, например, в работах [1,2]

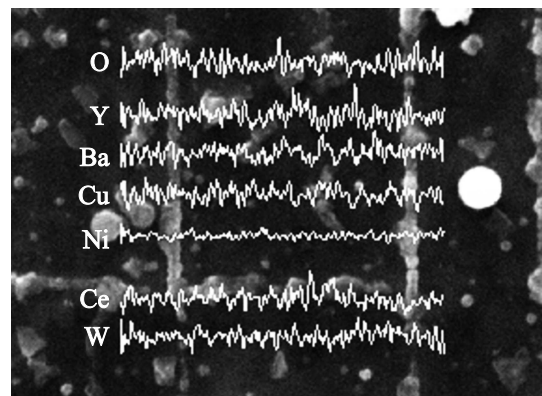
эта сетка перпендикулярных линий темного цвета и действительно похожа на систему трещин, а в работе [7] трещины в пленке CeO<sub>2</sub> имеют разную толщину и напоминают изображение субзеренной или зеренной структуры. Прямоугольные сетки на поверхности иногда связывают с доменами [16].

На рис. 8 можно наблюдать одновременно структуру буферного слоя CeO<sub>2</sub> (слева) и структуру напыленной сверхпроводящей пленки Y123 (справа). Эти две области разделяет наклонная линия, которая делит снимок на две части — более темную и более светлую. Полное соответствие структур в буферном слое и сверхпроводящей пленке и их непрерывный переход с некоторым смещением из одной области в другую заставляет предполагать, что рассматриваемая структура возникает сначала в буферном слое CeO<sub>2</sub>, а затем наследуется пленкой Y123. Эта точка зрения была ранее высказана в работах [1,2,6,8].

Что же представляет собой система параллельных линий в нашем случае? Является ли она сеткой трещин или это изображение доменной структуры, которая



**Рис. 9.** Структура сверхпроводящей пленки образца № 2 в сканирующем электронном микроскопе.



**Рис. 10.** Структура сверхпроводящей пленки и кривые распределения всех элементов композиционного образца № 2 вдоль линии сканирования; сканирующая микроскопия и микроанализ.

возникает сначала в слое  $\text{CeO}_2$ , затем в напыленной пленке Y123 для уменьшения упругих напряжений в образце. На рис. 9 приведено изображение участка буферного слоя при большем увеличении и хорошо видно, что это не трещины, а границы доменов, декорированные большим количеством каких-то частиц, по-видимому, той же природы, что и крупные частицы внутри доменов (рис. 8). Рис. 10 демонстрирует изменение концентраций всех элементов, входящих в образец Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123 (обр. № 2), вдоль линии сканирования, совпадающей с положением концентрационной кривой для Си: какие-либо провалы интенсивности в местах расположения рассматриваемых параллельных линий отсутствуют. Следовательно, это действительно доменные границы. Точечный микроанализ частиц на границах доменов и крупных частиц внутри доменов показал, что они содержат только элементы, входящие в образец. Обнаружение в них Ni, W, Ce является результатом влияния на микроанализ буферного слоя CeO<sub>2</sub> и подложки Ni-W при такой малой толщине сверхпроводящей пленки ~ 150 nm.

Образец № 3 (Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123/Au), несмотря на наличие буферного слоя из CeO<sub>2</sub>, показал в сканирующем электронном микроскопе структуру, близкую к структуре образца № 1 (Ni-W/YSZ/Y123) — островковое или бугристое строение сверхпроводящей пленки.

#### 4. Заключение

Рентгенографически показано, что подложки Ni-W и сверхпроводящие пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  всех исследованных образцов обладают высокой кубической текстурой:  $(001)_{\text{Ni-W}} \parallel (001)_{\text{Y123}}$ . Высокая плоскостная текстура  $(001)_{\text{Ni-W}} \parallel (001)_{\text{Y123}}$  подтверждена и электронографически. Однако обнаружено, что имеются две ориентации решеток фазы 123, которые развернуты в плоскости  $(001)_{\text{Ni-W}}$  относительно оси  $[010]_{\text{Ni-W}}$  на малый угол — 2°.

Высокая кубическая текстура обнаружена только в буферном слое образца Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123 (образец № 2). Ее признаки есть и на рентгенограмме образца Ni-W/CeO<sub>2</sub>/Y123/Au (образец № 3). В буферных слоях YSZ (ZrO<sub>2</sub> + Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (обр. № 1) и CeO<sub>2</sub> (обр. № 3) обнаружена специфическая текстура: направления  $[111]_{\text{buff}}$  сосредоточены в некотором угловом интервале около осей  $[100]_{\text{Ni-W}}$ ,  $[010]_{\text{Ni-W}}$  и  $[110]_{\text{Ni-W}}$ . Такая текстура буферного слоя не препятствует формированию высокой кубической текстуры пленки Y123.

В сверхпроводящей пленке и буферном слое обнаружена мелкодисперсная структура с размерами ~ 100–200 Å. Наличие такой структуры одновременно с высокой кубической текстурой обеспечивает высокую плотность критического тока пленок Y123, поскольку при малых углах разориентации достаточно больших зерен сверхпроводящих ВТСП-пленок плотность крити-

ческого тока близка к предельным значениям, наблюдаемым в высокотемпературных сверхпроводниках [17].

Проведена оценка параметров несоответствия  $\delta$  между решетками составляющих композиционного образца. Обнаружено, что в сверхпроводящей пленке в плоскости (001) в различных кристаллографических направлениях реализуются большие упругие напряжения разного знака. Под действием этих напряжений в сверхпроводящей пленке образуется два типа структур: островковые или бугристые и структуры, которые характеризуются системой взаимно перпендикулярных линий. Показано, что последние в нашем случае не являются трещинами, а представляют собой доменные границы, декорированные частицами.

#### Список литературы

- [1] A. Gauzzi, M. Baldini, M. Bindi, F. Bissoli, E. Gilioli, S. Ginocchio, F. Pattini, S. Rampino, S. Zannella. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7**, 1181 (1997).
- [2] E. Gilioli, A. Gauzzi, M. Bindi, S. Rampino, F. Pattini, F. Bissoli, S. Ginocchio, M. Baldini, S. Zannella. *Adv. Sci. Technol.* **47**, 17 (2006).
- [3] J. Xiong, Y. Chen, Y. Qiu, B. Tao, W. Qin, X. Cui, J. Tang, Y. Li. *Supercond. Sci. Technol.* **19**, 1068 (2006).
- [4] R. Bhattacharya, S. Phok, W. Zhao, A. Norman. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19**, 3451 (2009).
- [5] C. Park, D.P. Norton, J.D. Budai, D.K. Christen, D. Vrebelyi, R. Feenstra, D.F. Lee, A. Goyal, D.M. Kroeger, M. Paranthaman. *Appl. Phys. Lett.* **73**, 1904 (1998).
- [6] P.N. Barnes, R.M. Nekkanti, T.J. Haugan, T.A. Campbell, N.A. Yust, J.M. Evans. *Supercond. Sci. Technol.* **17**, 957 (2004).
- [7] S.M. Lim, H.S. Kim, K.C. Chung, B.S. Lee, D. Youm. *Supercond. Sci. Technol.* **17**, 148 (2004).
- [8] G. Kästner, C. Schäfer, S. Senz, D. Hesse, M. Lorenz, H. Hochmuth, M. Getta, M.A. Hein, T. Kaiser, G. Müller. *Supercond. Sci. Technol.* **12**, 366 (1999).
- [9] F. Pailloux, R.J. Gaboriaud, C. Champeaux, A. Catherinet. *Mater. Characterization* **46**, 55 (2001).
- [10] Н.В. Порохов, Э.Е. Левин, М.Л. Чухаркин, Д.Н. Раков, А.Е. Воробьева, А.В. Варлашкин, О.В. Снигирев. *Радиотехника и электроника* **57**, 9 (2012).
- [11] J.D. Jorgensen, B.W. Veal, A.P. Paulikas, L.J. Nowicki, G.W. Crabtree, H. Claus, W.K. Kwok. *Phys. Rev. B* **41**, 1863 (1990).
- [12] H.G. Scott. *J. Mat. Sci.* **10**, 1527 (1975).
- [13] В.Е. Панин, А.В. Панин, В.П. Сергеев, А.Р. Шугуров. *Физическая мезомеханика* **10**, 9 (2007).
- [14] В.Е. Панин, А.В. Панин, Д.Д. Мойсеенко, Т.Ф. Елсукова, О.Ю. Кузина, П.В. Максимов. *Докл. РАН* **409**, 606 (2006).
- [15] T. Muroga, H. Iwai, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Iijima, T. Saito, T. Kato, Y. Sugawara, T. Hirayama. *Physica C* **392–396**, 796 (2003).
- [16] C. Sagui, A.M. Somoza, C. Roland, R.C. Desai. *J. Phys. A* **26**, 1163 (1993).
- [17] D. Dimos, P. Chaudhari. *J. Manhart. Phys. Rev. B* **41**, 4038 (1990).