

02,13

Структура и свойства напыленных пленок в композиционных образцах $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$

© Ю.В. Блинова¹, О.В. Снигирев², Н.В. Порохов², С.В. Сударева¹, Т.П. Криницина¹, М.В. Дегтярев¹

¹ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: sudareva@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 15 февраля 2016 г.)

Методом лазерной абляции изготовлен композиционный сверхпроводник $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ с критической плотностью тока $7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Методом сканирующей электронной микроскопии на поверхности напыленных пленок обнаружены бугорки, обогащенные медью и кислородом. С помощью просвечивающей электронной микроскопии в сверхпроводящей пленке обнаружена зернистая структура (размеры $0.2\text{--}0.3 \mu\text{m}$) с хорошими контактами по границам, а также системы двойников шириной $\sim 400 \text{ \AA}$. Такая структура пленки вместе с высокой текстурой (001) обеспечивает указанную критическую плотность тока.

Работа выполнена по теме „Кристалл“ (№ г.р. 01201463333) при поддержке УрО РАН (проект № 15-17-2-16) и Минобрнауки РФ (ГК 14.604.21.0005 (RFMEFI57614X0015)).

1. Введение

Тонкие пленки широко используются в современной микроэлектронике (интегральные схемы, микросенсоры, датчики и др.). Другое направление применения — использование композиционных лент на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Y123) в промышленном масштабе в качестве функциональных материалов с высокими электрофизическими, оптическими, трибологическими характеристиками. Структура и свойства тонких пленок резко отличаются от таковых для объемной фазы, из которой они образуются [1]. Для пленочных покрытий характерны два основных фактора неравновесности состояния материала: наноразмерность структурных образований и высокие напряжения. При понижении температуры подложки T_s размер кристаллитов уменьшается. При $T_s < 400^\circ\text{C}$ размер составляет менее 10 nm [2].

В настоящей работе получены напыленные сверхпроводящие пленки Y123 на монокристаллических подложках SiO_2 с буферными слоями. Определены их сверхпроводящие характеристики (T_c , j_c). Разными структурными методами исследованы структура и текстура этих композиционных образцов. При этом особое внимание было уделено изучению тонкой структуры сверхпроводящих пленок методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с целью выявления элементов структуры, отвечающих за высокие сверхпроводящие характеристики, а также исследованию типичной для напыленных пленок островковой или бугристой структуры, которая наблюдалась с помощью сканирующего электронного микроскопа-микроанализатора.

Островковой структуре в литературе посвящено много работ [1–11]. Лидирующее положение среди них занимают работы школы Панина. В работах [3–7]

экспериментально и теоретически обоснован принципиально важный эффект „шахматного“ распределения напряжений и деформаций на интерфейсе поверхностный слой–подложка. За толщину интерфейса обычно принимают толщину тонкой пленки. Формирование в тонких пленках „клетчатых“ структур происходит уже в процессе напыления. По данным [8] после нанесения четырех монослоев резко возрастают упругие напряжения вследствие несоответствия между кристаллическими решетками пленки и подложки и разницы в упругих константах. Результатом является „шахматное“ распределение сжимающих и растягивающих нормальных и касательных напряжений на границе пленка–подложка. Теоретическое моделирование интерфейса поверхностный слой–подложка подтвердило заключение о „шахматном“ распределении локальных напряжений и деформаций при сопряжении двух разнородных сред [12]. Частичная релаксация этих упругих напряжений сопровождается массопереносом: материал из областей сжимающих напряжений вытесняется в области растягивающих напряжений. Результатом могут быть трехмерные образования: островки или бугорки; в них максимальные напряжения в 2 раза меньше, чем в плоской пленке.

„Шахматный“ характер формирования структуры на поверхности пленки как следствие специфического напряженно-деформированного состояния на интерфейсе ярко проявляется при различных дополнительных воздействиях: при отжиге тонких пленок (периодические складки из-за разницы коэффициентов термического расширения (КТР)), при растяжении, термоциклировании (прямоугольная сетка трещин, отслаивание отдельных „клеток“). В работе [9] показана главенствующая роль периодического распределения упругих напряжений в районе интерфейса металлическая подложка–оксидная

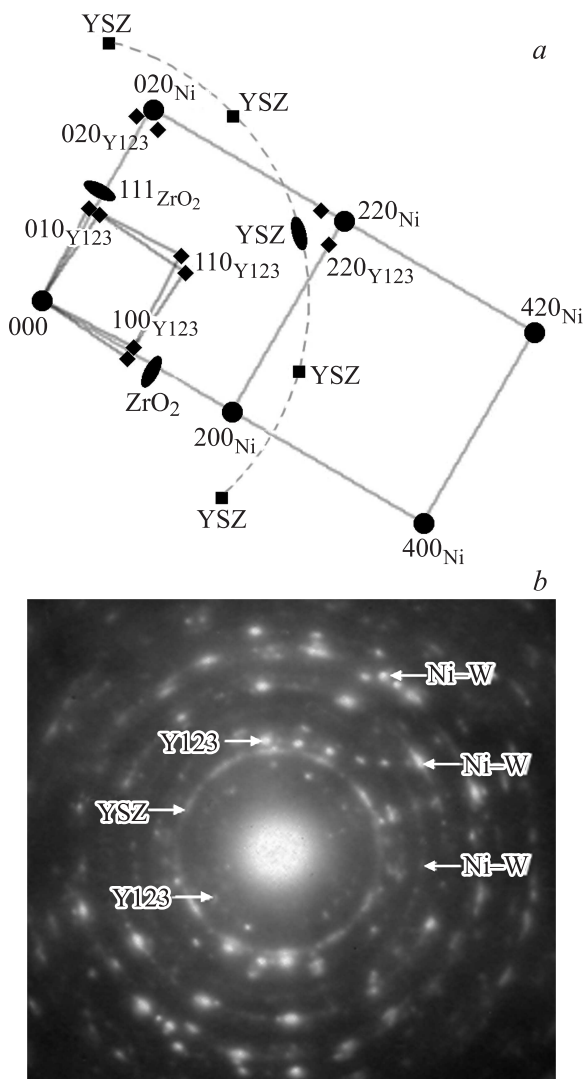


Рис. 1. Образец Ni–W/YSZ/Y123. *a* — схема электронограммы, ось зоны [001], *b* — электронограмма после пластической деформации под действием упругих напряжений в композиционной ленте, результат утонения образца [13].

пленка в деградации тонких пленок (периодические складки) под действием термической и механической нагрузок. На плоских образцах титана с наводороженным поверхностным слоем, подвергнутых знакопеременному изгибу, также экспериментально подтвержден эффект „шахматной доски“ в распределении напряжений и деформаций на интерфейсе [10]. В работе [11] изучены закономерности образования гофрированной структуры тонких пленок алюминия, напыленных на подложки Si с промежуточным слоем из полистирола, поведение которого контролируется в интервале температур отжига 110–150°C как упругой, так и вязкой деформацией. По мнению автора [11], причиной появления гофрированной структуры являются дополнительные напряжения, вызванные различием КТР Al-пленки, подслоя и Si-подложки. Установлено, что вершины образующихся

периодических складок формируются растягивающими напряжениями, а впадины гофрированной структуры — сжимающими напряжениями.

В работе [13] нам удалось получить электронограмму с осью зоны [001]_{Ni–W,Y123}, на которой присутствуют рефлексы от всех составляющих композиционной ленты Ni–W/YSZ/Y123 (YSZ — диоксид циркония, стабилизированный иттрием), при этом все рефлексы имеют межплоскостные расстояния, соответствующие массивным образцам. По этой электронограмме (ее схема с соблюдением пропорций приведена на рис. 1, *a*) был оценен уровень внутренних упругих напряжений в композиционной ленте. Расчеты показали, что параметры структурного несоответствия между решетками составляющих ленты, определяемые по формуле $\delta = 2(d_1 - d_2)/(d_1 + d_2)$, где $d_{1,2}$ — межплоскостные расстояния сопрягаемых слоев, в различных кристаллографических направлениях изменяются в пределах от 9 до 25%. Например, в направлении [100] $\delta \approx 25\%$, и сверхпроводящая пленка испытывает сжимающие напряжения со стороны буферного слоя, а в направлении [110] $\delta \approx 9\%$, и на пленку Y123 действуют растягивающие напряжения со стороны буферного слоя. Эти напряжения так велики, что при уменьшении толщины подложки Ni–W ниже некоторой критической происходит мощная деформация. Вместо точечной электронограммы по (001)_{Ni–W,Y123}* возникает система дебаевских колец, а сверхпроводящая пленка отслаивается (рис. 1, *b*).

Таким образом, на основе анализа литературных данных можно заключить, что возникновение всякого рода неровностей (бугорки, складки) на поверхности напыленных на подложки тонких пленок является следствием массопереноса, который реализуется в результате „шахматного“ распределения сжимающих и растягивающих упругих напряжений на интерфейсе. Такие бугорки, складки при определенном составе могут служить дополнительными местами закрепления вихрей магнитного потока.

2. Методика

Исследованы следующие образцы: SiO₂ (монокристаллический)/YSZ/CeO₂/Y123 и SiO₂/YSZ/CeO₂/Y123 с напыленными золотыми контактами для измерения электрофизических свойств.

Для напыления буферных слоев и слоя высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) на поверхность монокристаллической кварцевой подложки (очищенной сначала в ультразвуковой ванне с ацетоном, а затем с изопропиловым спиртом) использовался метод лазерной абляции: быстрое испарение вещества с поверхности твердой мишени лазерным пучком и его осаждение на подложку с образованием пленки из вещества мишени. Установка для напыления состоит из эксимерного лазера (Lambda Physik LPX205i, длина волны 248 nm, плотность энергии излучения на поверхности мишени в диапазоне от 1 до 2.2 J/cm²), вакуумного поста, системы

для смены мишеней, позволяющей наносить за один вакуумный цикл до четырех разнородных материалов, системы напуска кислорода и терморегулятора, обеспечивающего автоматический режим контроля температуры образца.

Одним из главных параметров при росте тонких пленок является чистота процесса [14], которая достигалась за счет использования стехиометрических мишеней чистотой не менее 99.9%, а также вакуумной системы, позволяющей создавать остаточное давление в камере не более 10^{-5} Па. После нарушения вакуума ростовой камеры на поверхности мишени может адсорбироваться влага из атмосферного воздуха, а также могут формироваться посторонние оксидные соединения [14]. Удаление посторонних компонентов с поверхности мишени достигалось при закрытой заслонке между подложкой и мишенью путем предварительной абляции мишени перед проведением ростового процесса. Подложка из монокристаллического кварца имеет значительное рассогласование параметров кристаллической решетки с параметрами Y123, а также у кварца и ВТСП-пленки сильно различаются КТР. В связи с этим была создана буферная система между подложкой и ВТСП-пленкой. В качестве буферных слоев были выбраны диоксид циркония, стабилизированный иттрием, — YSZ ($\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$) — для предотвращения образования окислов и смягчения разницы КТР и диоксид церия CeO_2 для согласования кристаллических решеток с ВТСП-пленкой [15,16]. Характеристики подложки, буферных слоев и сверхпроводящей пленки представлены в таблице.

Система буферных и ВТСП-слоев наносилась методом лазерного напыления при температуре образца $800\text{--}760^\circ\text{C}$ в атмосфере кислорода при давлении $10\text{--}60$ Па. После напыления следовал отжиг при 550°C в атмосфере кислорода для насыщения пленки Y123 кислородом с последующим медленным охлаждением образца до комнатной температуры. Образец для измерения электрофизических свойств представлял собой подложку из монокристалла SiO_2 размером 5×5 мм с толщиной $100\ \mu\text{m}$, на которую при температуре 800°C последовательно наносились буферные слои YSZ толщиной ~ 100 нм и CeO_2 толщиной ~ 100 нм и сверхпроводящий слой Y123 толщиной ~ 150 нм.

Температура сверхпроводящего перехода определялась по кривой магнитной экранировки. Для определения электрофизических характеристик ВТСП-пленок использовался классический метод измерения сопротивления по четырехточечной схеме. В связи с этим на образце формировался рисунок из системы мостиков при помощи фотолитографического процесса [17]. После этого на образец наносились 10 нм титанового подслоя для обеспечения адгезии и 100 нм золота методом магнетронного распыления при комнатной температуре. Затем пленки Ti и Au удалялись методом lift-off (взрыва) со всей поверхности образца, за исключением контактных площадок. Схема литографии мостиков представлена на рис. 2. На рис. 3 приведена фотография мостика

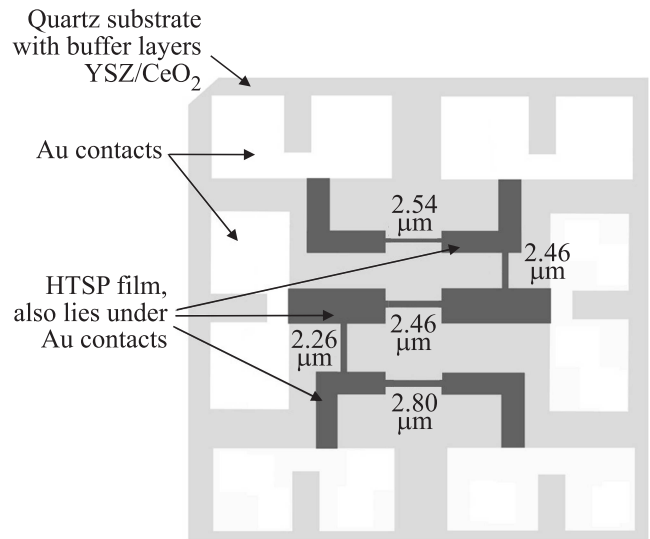


Рис. 2. Схема образца SiO_2 (монокристалл) / YSZ / CeO_2 / Y123 / Au. Указана ширина мостиков.

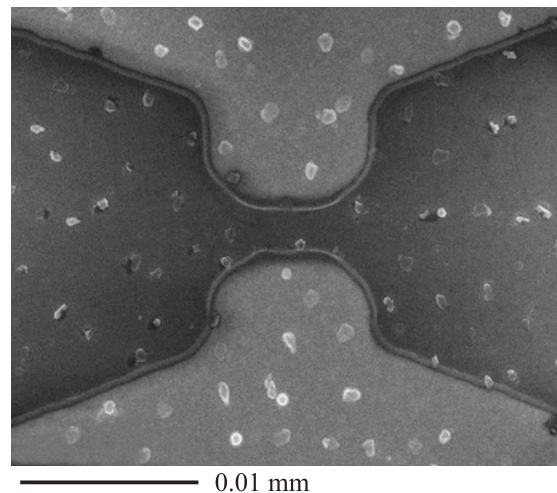


Рис. 3. Изображение мостика в растровом микроскопе. Образец $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}/\text{Au}$.

ВТСП, сделанная с помощью растрового микроскопа. Размеры мостика составляют $2.5\ \mu\text{m}$ в ширину, 150 нм в высоту при длине около $5\ \mu\text{m}$. Создание мостиковой системы необходимо для измерения плотности критического тока. Из вольт-амперной характеристики (ВАХ) мостика находились значения критического тока I_c , а исходя из геометрических размеров пленки (ее толщины и ширины мостика) оценивалась плотность критического тока j_c . Участок ВАХ вблизи критического тока показан на рис. 4.

Структура образцов исследовалась рентгенографически на дифрактометре STADI-P (чувствительность $1\text{--}3$ vol.%) в излучении $\text{Cu K}\alpha$, методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Quanta-200 с приставкой EDAX для микроанализа и

Характеристики используемых материалов

Материал	Кристаллическая решетка	КТР, 10^{-6} K^{-1}	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$
SiO ₂	Гексагональная ($a = 4.91344(4) \text{ \AA}$, $c = 5.40524(8) \text{ \AA}$)	1.4	1713
YSZ	Кубическая ($a = 5.16(2) \text{ \AA}$)	11	1084
CeO ₂	Кубическая ($a = 5.41134(12) \text{ \AA}$)	8.5	2400
Y123	Орторомбическая ($a = 3.8274(5) \text{ \AA}$, $b = 3.8777(6) \text{ \AA}$, $c = 11.688(2) \text{ \AA}$)	11–13	1000

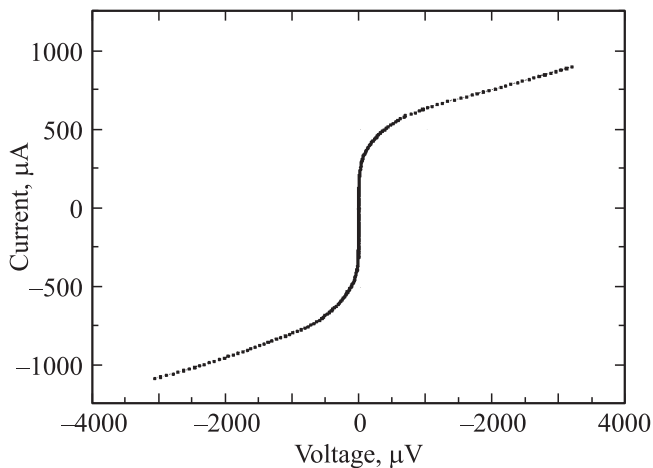


Рис. 4. Участок ВАХ вблизи критического тока. Образец SiO₂/YSZ/CeO₂/Y123/Au.

ПЭМ на приборе JEM-200CX. Исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования „Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов“ ИФМ УрО РАН. Объекты для электронно-микроскопического исследования „на просвет“ получены методом ионного утонения.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Образец SiO₂/YSZ/CeO₂/Y123. Критическая температура этого образца $T_c \approx 87 \text{ K}$. Составляющие композиционного образца ориентированы по плоскости (001) — кубическая текстура (см. рентгенограмму на рис. 5, *a*). На рис. 6, *a* приведено изображение поверхности пленки Y123 в сканирующем электронном микроскопе-микроанализаторе. Видны образования наподобие выделений с белым контрастом. Из рис. 6, *b, c* следует, что имеются образования двух типов: с ярким белым контрастом и более бледные. Первые, на наш взгляд, имеют большую толщину, т.е. значительно возвышаются над поверхностью пленки. По этой причине в них несколько больше Y, Ba. Микроанализ показал, что в выступах обоих типов наблюдается значительное превышение содержания Cu и некоторое превышение содержания кислорода по сравнению с плоской пленкой: во всех выступах меди приблизительно в 2 раза больше, чем в пленке (рис. 6, *b, c*). Некоторое уменьшение содер-

жания Si в высоких выступах (рис. 6, *b, c*) объясняется большим удалением от подложки SiO₂ (из-за малой толщины пленок фиксируется Si из подложки).

В соответствии с данными работ [1–12] можно отметить, что наблюдаемые нами выступы (бугорки) на пленке Y123 являются результатом массопереноса из областей сжимающих напряжений в места растягивающих напряжений. Как уже указывалось, в бугорках напряжения в 2 раза меньше, чем в плоской пленке [8], т.е. их образование энергетически выгодно. Значительное превышение содержания Cu, а также повышенное содержание кислорода в выступах вполне согласуются с нашим заключением об их происхождении. Действительно, более богатая медью и кислородом фаза YBa₂Cu₄O₈ (Y248) с параметрами $a = 3.843 \text{ \AA}$, $b = 3.888 \text{ \AA}$, $c = 27.176 \text{ \AA}$ образуется из матричной фазы YBa₂Cu₃O₇ ($a = 3.828 \text{ \AA}$, $b = 3.888 \text{ \AA}$, $c = 11.77 \text{ \AA}$) путем внедрения в решетку последней дефекта упаковки по плоскостям (001), а именно второй плоскости Cu1–O1 с цепочками –O–Cu–O–. В результате в решетке Y248 возникают двойные слои Cu1–O1. Другая же фаза, богатая медью и кислородом, YBa₂Cu₄O₁₅ с параметрами $a = 3.8338 \text{ \AA}$, $b = 3.8693 \text{ \AA}$, $c = 50.49 \text{ \AA}$ представляет собой попеременно чередующиеся по плоскостям (001) блоки, принадлежащие фазам Y248 и Y123. Процесс внедрения дефекта упаковки Cu1–O1 в фазу Y123 с увеличением параметра решетки вдоль оси c может

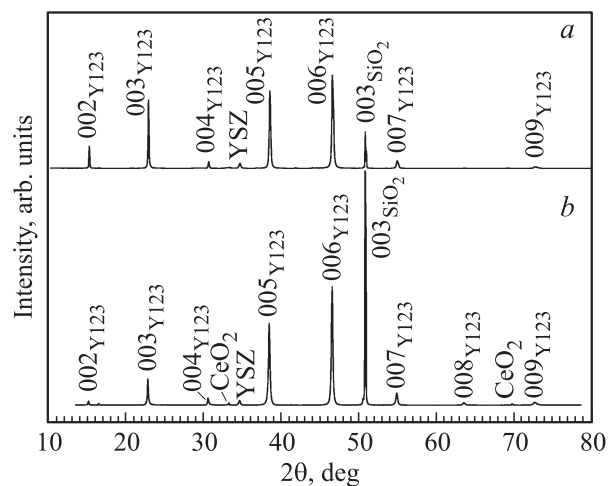


Рис. 5. Рентгенограммы образцов. *a* — SiO₂/YSZ/CeO₂/Y123, *b* — SiO₂/YSZ/CeO₂/Y123/Au.

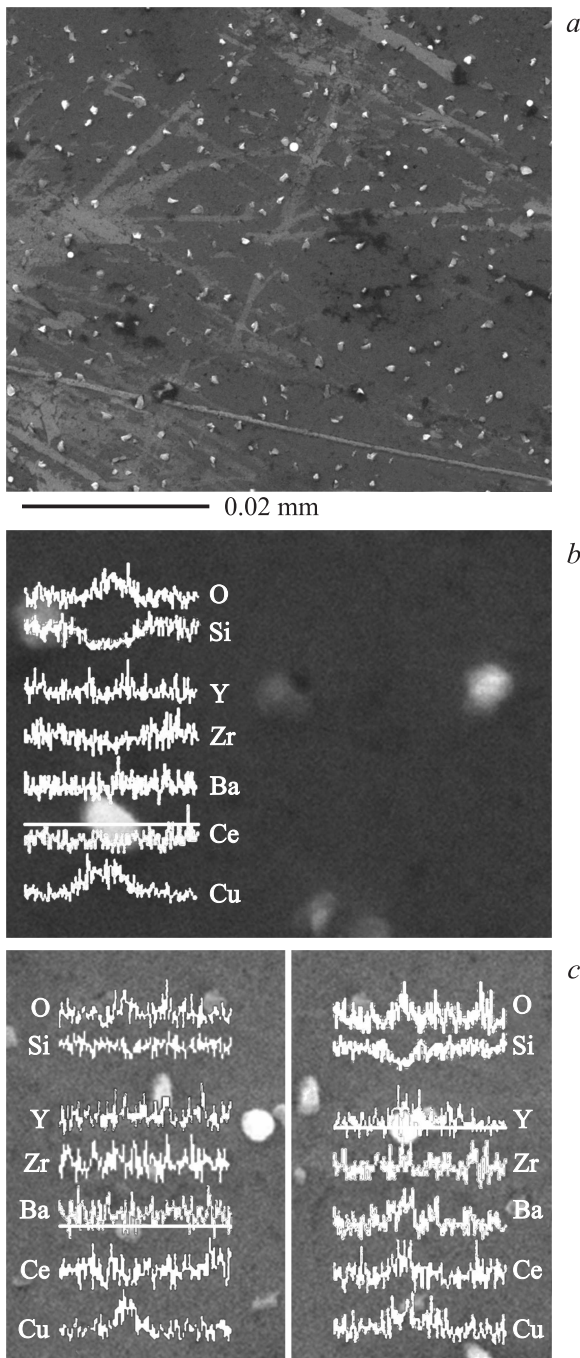


Рис. 6. СЭМ и микроанализ образца $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}$. *a* — изображение поверхности пленки Y123; *b, c* — микроанализ выступов, линия сканирования показана отрезком.

происходить скорее в растянутых областях пленки. Таким образом, экспериментально установленный факт повышенного содержания меди и кислорода в выступах можно рассматривать как подтверждение нашей интерпретации наблюдаемых на пленке образований с белым контрастом. Наличие в пленке бугорков, обогащенных медью и кислородом, может привести к дополнительно увеличению критической плотности тока.

3.2. Образец $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}$ с напыленными золотыми контактами для измерения электрофизических свойств. Температура сверхпроводящего перехода, определенная по кривой магнитной экранировки, составила $T_c = 87$ К, ширина перехода $\Delta T = 4$ К (рис. 7). Исходя из ширины мостика ($2.5 \mu\text{m}$) и толщины пленки Y123 (150 nm) для образца $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}/\text{Au}$, представленного на рис. 2, можно оценить значение j_c как $7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, что является хорошим результатом для пленок на кварцевых подложках. Судя по характеру ВАХ, в частности наличию избыточного тока, и линейному поведению зависимости $I_c(T)$ вблизи критической температуры (рис. 8), в мостике реализуются межгранульные джозефсоновские контакты (intergranular Josephson junction) типа SNS (сверхпроводник–нормальный металл–сверхпроводник) [18,19] и слабейший из них определяет величину критического тока. Проведены измерения сопротивления в зависи-

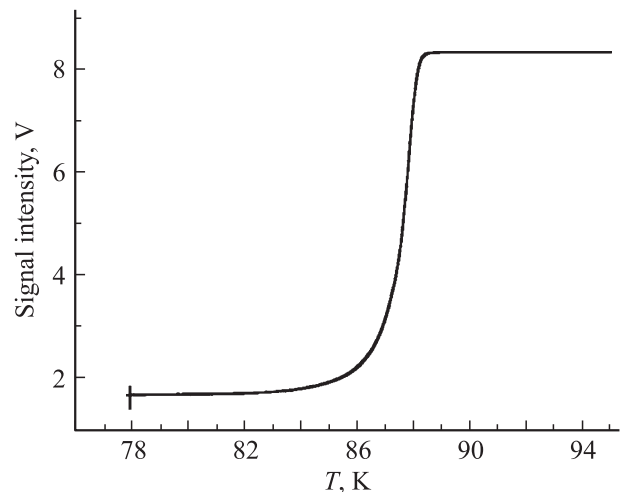


Рис. 7. Сверхпроводящий переход в образце $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}/\text{Au}$.

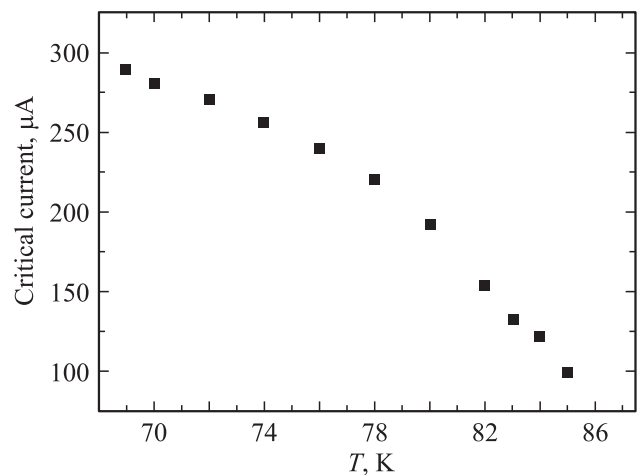


Рис. 8. Температурная зависимость критического тока. Образец $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}/\text{Au}$.

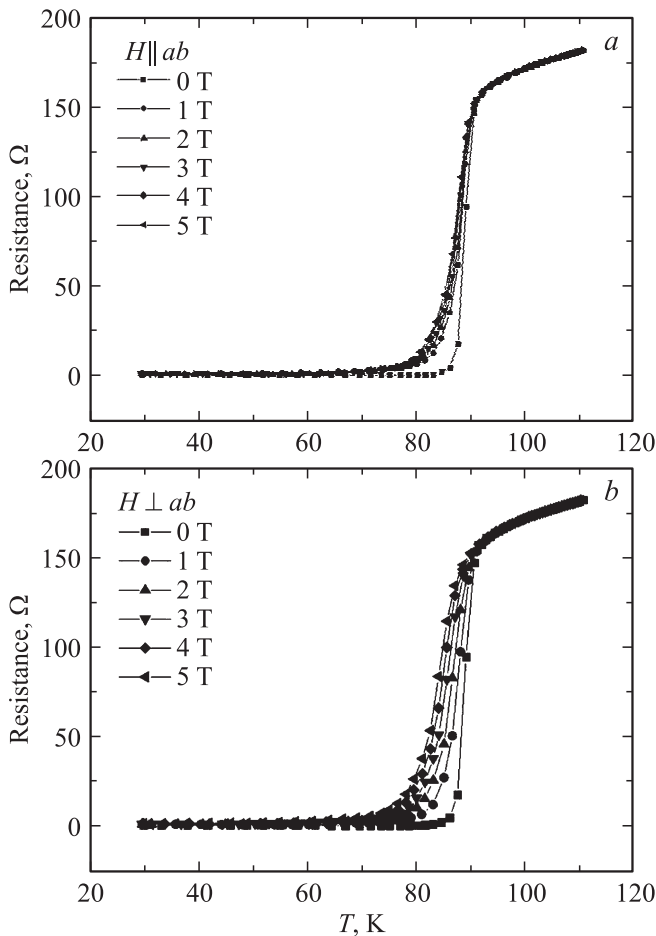


Рис. 9. Зависимость сопротивления от температуры. *a* — в параллельном магнитном поле, *b* — в перпендикулярном магнитном поле.

мости от температуры в магнитных полях величиной от 0 до 5 Т, приложенных параллельно (рис. 9, *a*) и перпендикулярно плоскости образца (рис. 9, *b*). Ширина перехода в отсутствие магнитного поля очень мала и составляет приблизительно 1.5 К, по мере усиления магнитного поля она увеличивается. Уширение перехода хорошо заметно при приложении поля перпендикулярно плоскости *ab*. При приложении магнитного поля параллельно плоскости *ab* уширение не так значительно. Это различие свидетельствует о резкой анизотропии транспортных свойств полученной пленки, т. е. косвенно подтверждается, что пленка эпитаксиальная и преимущественно *c*-ориентированная.

Рентгенографическое исследование показало наличие кубической текстуры во всех составляющих образца (рис. 5, *b*). При исследовании этого образца в сканирующем электронном микроскопе-микроанализаторе обнаружена структура, изображенная на рис. 10. Видно большое количество бугорков на поверхности пленки. Из рис. 10, *a* следует, что бугорки присутствуют как в сверхпроводящей пленке, так и в буферном слое, что объясняется „шахматным“ распределением упругих

напряжений на интерфейсе этих составляющих образца. Микроанализ показал, что содержание меди, находящейся в бугорках, на 20% больше, чем в плоской сверхпроводящей пленке. Однако среди бугорков на краю образца встречаются такие, которые не связаны с массопереносом, а представляют собой неровности на поверхности подложки SiO_2 (помечено точкой на рис. 10, *b*). По данным микроанализа такие бугорки имеют состав $\text{Si}:\text{O}:\text{Y}:\text{Ba}:\text{Cu}:\text{Ce} = 43.50:55.64:0.00:0.34:0.28:0.17$ at.%. Во время исследования образца в сканирующем электронном микроскопе такие бугорки заряжаются электронами и создают мерцательный контраст (см. вставку на рис. 10, *b*).

При электронно-микроскопическом исследовании „на просвет“ этого образца удалось получить информацию о тонкой структуре напыленной сверхпроводящей пленки Y123. В этой пленке с $j_c = 7 \cdot 10^4$ А/см² обнаружена довольно крупная зеренная структура (размеры зерен

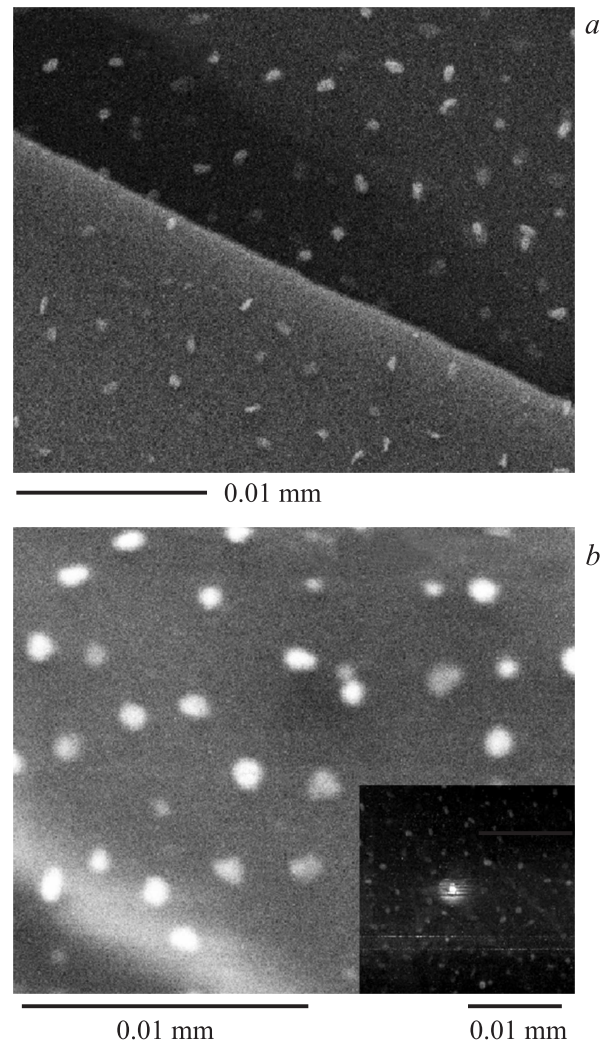


Рис. 10. Образец $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}/\text{Au}$. *a* — СЭМ-изображение буферного слоя (вверху) и ВТСП-пленки (внизу), *b* — СЭМ-изображение буферного слоя у края образца, на вставке — мерцательный контраст от выступа SiO_2 .

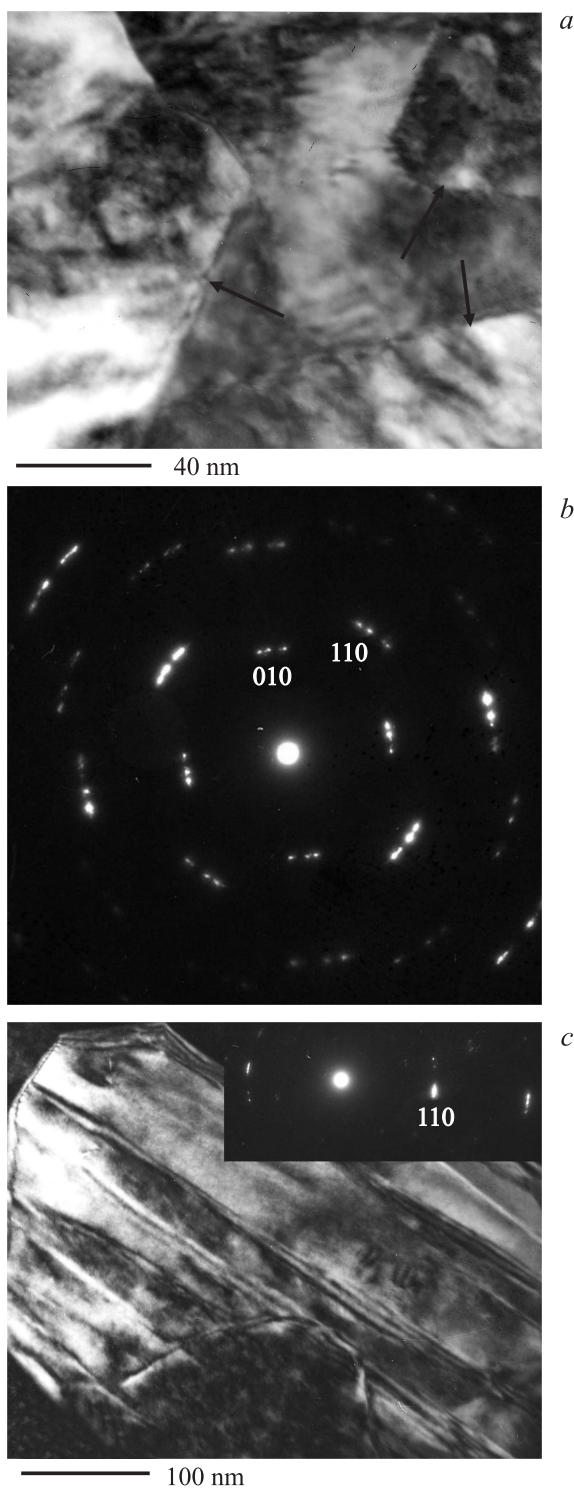


Рис. 11. ПЭМ образца $\text{SiO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2/\text{Y123}/\text{Au}$. *a* — темнопольное изображение в рефлексе $(110)_{\text{Y123}}$, зеренная структура пленки Y123; *b* — соответствующая электронограмма, ось зоны $[001]$; *c* — темнопольное изображение в рефлексе $(110)_{\text{Y123}}$, двойниковая структура пленки Y123.

$0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$) с длинными двойниками шириной $\sim 400\ \text{\AA}$ (рис. 11, *a–c*). Этот результат находится в полном соответствии с данными зарубежных работ [20,21], в

которых в напыленных на подложки LaAlO_3 с буферным слоем CeO_2 и на подложки MgO и AlO_3 пленках Y123 с $j_c \approx 5 \cdot 10^6\ \text{A/cm}^2$ наблюдалась крупнодвойниковая структура (ширина двойников $\sim 500\ \text{\AA}$). Но это противоречит нашей работе [13], где в напыленных на подложки Ni–W с буферными слоями YSZ пленках Y123 с $j_c \approx 10^6\ \text{A/cm}^2$ обнаружена нанокристаллическая структура с размерами кристаллитов $100\text{--}200\ \text{\AA}$. Как видно из рис. 11, *a, b*, сверхпроводящая пленка текстурирована по (001) , а между зернами фазы Y123 хороший контакт: судя по наблюдаемому контрасту от границ зерен в виде довольно тонких линий, связь между зернами фазы приближается к таковой в металлических системах. Полагаем, что этот факт и высокая текстура $(001)_{\text{Y123}}$ являются основными причинами довольно большой критической плотности тока исследуемой пленки ($7 \cdot 10^4\ \text{A/cm}^2$), хотя j_c этой пленки приблизительно на порядок ниже, чем в пленках с нанокристаллической структурой [13].

4. Заключение

Методом лазерной абляции выполнено напыление сверхпроводящей пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ на монокристаллическую подложку SiO_2 с буферными слоями YSZ/CeO₂. Определены сверхпроводящие характеристики этой пленки: $T_c = 87\ \text{K}$, $\Delta T = 4\ \text{K}$, $j_c = 7 \cdot 10^4\ \text{A/cm}^2$. При исследовании этих композиционных образцов в сканирующем электронном микроскопе на поверхности напыленных пленок обнаружены в большом количестве бугорки или выступы, обогащенные медью и кислородом, которые образуются в результате диффузии компонентов Y, Ba, Cu, O из областей сжимающих напряжений в области растягивающих напряжений („шахматное“ распределение упругих напряжений, вызванное несоответствием кристаллических решеток составляющих композиционного образца). Эти выступы, обогащенные медью и кислородом, могут служить дополнительными центрами пиннинга. При электронномикроскопическом исследовании „на просвет“ в напыленных пленках Y123 обнаружена зеренная структура (размеры зерен $0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$) с длинными двойниками шириной $\sim 400\ \text{\AA}$. Судя по наблюдаемому контрасту, контакты между зернами фазы Y123 почти такие же, как в металлических системах. Тесная связь между зернами фазы Y123 и высокая текстура (001) являются основными причинами довольно большой критической плотности тока этих пленок. В качестве центров пиннинга в этом случае выступают границы зерен и двойников.

Авторы выражают благодарность М.Л. Чухаркину, А.С. Калабухову, Д. Винклеру за консультации и помощь в изготовлении образцов.

Список литературы

- [1] В.Д. Кургузов. Вычислительная механика сплошных сред **7**, 91 (2014).
- [2] О.В. Соболев. ФТТ **53**, 1389 (2011).
- [3] А.В. Панин. Физ. мезомеханика **8**, 3, 5 (2005).
- [4] В.Е. Панин, А.В. Панин. Физ. мезомеханика **8**, 5, 7 (2005).
- [5] В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин. Физ. мезомеханика **9**, 3, 9 (2006).
- [6] В.Е. Панин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко. Физ. мезомеханика **9**, 6, 5 (2006).
- [7] В.Е. Панин, А.В. Панин, Д.Д. Моисеенко, Т.Ф. Елсукова, О.Ю. Кузина. П.В. Максимов. ДАН **409**, 5, 606 (2006).
- [8] В.Е. Панин, А.В. Панин, В.П. Сергеев, А.Р. Шугуров. Физ. мезомеханика **10**, 3, 9 (2007).
- [9] A. Panin, A. Shugurov. Procedia Eng. **1**, 23 (2009).
- [10] В.Е. Панин, А.В. Панин, Т.Ф. Елсукова, О.Ю. Кузина. Физ. мезомеханика **8**, 6, 97 (2005).
- [11] А.И. Козельская. В сб: Труды XVII Междунар. научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых „Современные техника и технологии“. Томск (2011). Т. 2. С. 163.
- [12] Д.Д. Моисеенко, П.В. Максимов, И.А. Соловьев. Физ. мезомеханика **7**, 2, 19 (2004).
- [13] Т.П. Криницина, С.В. Сударева, Ю.В. Блинова, Е.И. Кузнецова, Е.П. Романов, М.В. Дегтярев, О.В. Снигирев, Н.В. Порохов, Д.Н. Раков, Ю.Н. Белотелова. ФТТ **55**, 227 (2013).
- [14] K.S. Rajiv, D. Kumar. Mater. Sci. Eng. **R22**, 113 (1998).
- [15] O. Snigirev, M. Chukharkin, N. Porokhov, S.Y. Rusanov, V.V. Kashin, V.B. Tsvetkov, A. Kalabukhov, D. Winkler. J. Phys.: Conf. Ser. **507**, 022 033 (2014).
- [16] 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**, 7, 1128 (2012).
- [17] S.K. Mishra, L.C. Pathak, S.K. Ray, S. Kal, D. Bhattacharya, S.K. Lahiri, K.L. Chopra. J. Supercond. **5**, 445 (1992).
- [18] M. Tinkham. Introduction to superconductivity. 2nd ed. McGraw–Hill, N. Y. (1996). 454 p.
- [19] К.К. Лихарев Введение в динамику джозефсоновских переходов. Наука, М. (1985). 320 с.
- [20] 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).
- [21] F. Pailloux, R.J. Gaboriaud, C. Champeaux, A. Catherinot. Mater. Charact. **46**, 55 (2001).