

12,03

Связь морфологии поверхности тонких пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, полученных импульсным лазерным напылением, с температурой окончания сверхпроводящего перехода

© А.И. Ильин¹, О.В. Трофимов¹, А.А. Иванов²

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

E-mail: ilin@iptm.ru

Поступила в Редакцию 26 марта 2020 г.

В окончательной редакции 26 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 апреля 2020 г.

Обнаружена корреляция между температурой окончания сверхпроводящего перехода $T(R=0)$ пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной 100–200 нм, полученных импульсным лазерным напылением на подложки $\text{SrTiO}_3(100)$ с температурой $\sim 740^\circ\text{C}$ и режимами скоростной фильтрации эрозийного факела, образуемого при абляции материала мишени. В условиях напыления изменяли ширину фильтрующего отверстия, частоту следования прошедшего через фильтр на подложку распыленного материала и плотность энергии излучения эксимерного лазера KrF на поверхности мишени. При скоростях напыления менее $0.1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ значения $T(R=0)$ не превышали 77 К и ниже, а поверхность пленок формировали пирамиды высотой до 80 нм вдоль оси c в форме спиралей с прямоугольными основаниями и ступеньками на боковых гранях 1–2 нм. С возрастанием скорости напыления с 0.1 до $0.6 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ $T(R=0)$ увеличивалась до 86 К. Этим режимам соответствовала волнистая поверхность из пирамид высотой до 40 нм с округлыми основаниями диаметром до 1500 нм и нерегулярными ступеньками 1–4 нм на боковых склонах. Преимущественно по границам между пирамидами за время напыления вырастали ограненные кристаллы шириной в основании от 20–30 до 500 нм. Такой рельеф поверхности роста объяснили высокой скоростью потока распыляемого материала, определяемого частотой фильтрации эрозийного факела и плотностью энергии в импульсе при преимущественно поверхностной диффузии.

Ключевые слова: импульсное лазерное осаждение; рельеф поверхности; эволюция пленки; SrTiO_3 .

DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49786.14Н

1. Введение

Несмотря на множество факторов, влияющих на свойства тонких пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) при импульсном лазерном напылении (ИЛН) [1–2], уже через 10–15 лет после открытия ВТСП были найдены основные, определяемые типом подложки. Особенно сильное влияние на механизмы роста, рельеф поверхности и свойства пленок оказывает кристаллическая структура, ориентировка, а также обработка подложки перед напылением [2–3]. В зависимости от этих условий в тонких пленках YBCO на $\text{SrTiO}_3(100)$ подложках наблюдали первичные процессы роста по механизму Вольмера–Вебера или Странского–Крастанова. Рост пленок до толщины 150–200 нм сопровождался образованием на их поверхности пирамид из спиралей с прямоугольными основаниями. Такие пленки обеспечивали критическую плотность тока около $6 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 77 К. Плотность винтовых дислокаций, которые, как полагают, являются центрами пиннинга для вихрей, составляла $9\text{--}28 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ [4,5]. С увеличением фонового давления кислорода в камере при напылении или уменьшении расстояния между подложкой и мишенью наблюдали

как преимущественно двумерный режим, так и режим роста с образованием пирамид в форме спиралей. В последнем случае размах шероховатости на поверхности таких пленок достигал 82 нм. Разный способ роста объяснили изменениями скорости поверхностной диффузии на 2 порядка величины [5], происходящими во время напыления при разных условиях. Рост пирамид по спирали стимулировался частотой фильтрации лазерного факела, при которой временной интервал между двумя последовательными фильтрациями был меньше характерного времени диффузии атомов на расстояние ширины спирали. В результате, в зависимости от механизмов зарождения и условий последующего напыления тонких пленок формировался рельеф поверхности, от которого зависел размер и качество изготавливаемых структур и приборов [6]. Как правило, с уменьшением размера приборов повышались требования к поверхности пленки, так как чем выше шероховатость, тем труднее изготовить устройство с маленьким латеральным разрешением [5–7].

В настоящей работе, были выбраны параметры ИЛН прямо влияющие на скорость компонентов лазерно-

го эрозионного факела, осаждаемых на подложки и формирующих структуру пленки: разную фильтрацию частиц лазерного факела и частоту фильтрации, а также плотность энергии в импульсе, от которых зависело время миграции атомов по поверхности между импульсами. Такой подход к получению пленок также оказался полезным для понимания зависимости температуры сверхпроводящего перехода от режимов напыления.

2. Материалы и методы исследования

Тонкие пленки напыляли на монокристаллические пластины SrTiO₃(100). Пластины размером 5–10 mm² и толщиной 0.5 mm перед напылением очищали травлением в смеси (H₂SO₄ + HNO₃) и промывали в дистиллированной воде. После такой обработки поверхность имела размах шероховатости до 2 nm и среднее квадратичное отклонение шероховатости $R_q = 0.14$ nm.

Установка для импульсного лазерного напыления, подробно рассмотренная в [6], состояла из эксимерного лазера CL7100 с рабочей смесью KrF (длина волны 248 nm, длительность импульса 15 ns) и модернизированного вакуумного поста ВУП-4, оснащенного насосом Varian SH-110 и турбомолекулярным насосом Varian TPS-compact. Эта установка позволяла получать в напылительной камере безмасляный вакуум и менять давление окислительной среды от 1 atm до 10.6 Torr, а также поддерживать нужную температуру подложки от комнатной до 900°C. Температура подложки, измеренная Pt–Pt + 10%Rh термопарой, при напылении находилась в диапазоне 730–750°C. Энергию лазерного импульса измеряли с помощью измерителя мощности и энергии LabMax-TOP с датчиком энергии J-50MUV-248. Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени в экспериментах менялась в диапазоне 1–3 J/cm² с точностью 0.5%. В качестве скоростного фильтра, который позволял отделить быструю мелкодисперсную фракцию распыленного потока вещества от медленной крупноразмерной, использовали вращающийся диск [8] с двумя отверстиями прямоугольной формы на диаметрально противоположных сторонах. Сторона отверстия вдоль радиуса диска была равна 19 mm, а перпендикулярная радиусу сторона (ширина) имела размеры 4, 6, 8 или 10 mm. Диск с отверстиями, расположенными на расстоянии 75 mm от оси вращения находился в 30–35 mm от мишени. Размер отверстия, частота и фаза вращения диска относительно момента генерации лазерного импульса задавали интервал времени, в течение которого частицы распыленного материала могли пройти через отверстие к подложке. Преимущество используемого нами метода фильтрации заключалось в возможности удалять из потока частиц крупную фракцию независимо от других параметров процесса напыления. Частота следования импульсов распыленного материала (частота фильтрации) задавалась системой синхронизации запуска лазера с положением

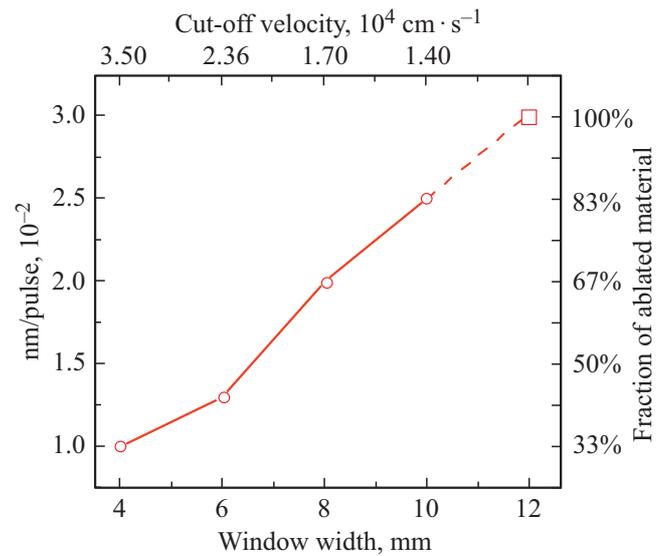


Рис. 1. Скорость напыления пленок в единицах $\text{nm/pulse} \cdot 10^{-2}$ при плотности энергии лазерного импульса $1.72 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ и частоте фильтрации 20 Hz в зависимости от ширины отверстия фильтра (window width). Дополнительно показаны минимальные скорости частиц (cut-off velocity) и доля потока эрозионного факела (fraction of ablated material), прошедших через окно фильтра к подложке. Крупный квадратный символ указывает скорость напыления без фильтра.

окон в диске и менялась в разных экспериментах от 4.5 до 33 Hz. Увеличение частоты фильтрации в условиях эксперимента соответствовало увеличению скорости фильтрующего отверстия, а значит и минимальной скорости частиц потока, пропускаемых фильтрующим диском, далее называемой скоростью отсечки. Скорость отсечки, для диска с отверстием шириной 4 mm при частоте фильтрации 20 Hz составляла $3.5 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Если считать за 100% долю факела, пропущенного в направлении подложки при отсутствии фильтра, то фильтр шириной 4 mm пропускал 33% потока факела (рис. 1).

Подробное изучение рельефа поверхности проводили в АСМ с оптической схемой контроля изгиба кантилевера (схемой регистрации смещения отраженного луча света (beam deflection)), а также в СЭМ JEOL JSM-840A и EVO-50. Диаметр острия кремневой иглы кантилевера составлял величину менее 40–50 nm. АСМ калибровали на чешуйках графена. После сканирования поверхности рассчитывали численные характеристики рельефа: среднее квадратичное отклонение шероховатости (R_q), размах шероховатости и, затем, строилась кривая шероховатости вдоль выбранного направления. Температурную зависимость сопротивления пленок измеряли на чипах размером $5 \times 10 \text{ mm}^2$ четырехконтактным методом. Для этого после напыления пленки на нее наносили контакты в виде четырех полосок серебра шириной 0.5 mm поперек длинной стороны чипа. Расстояние между внутренними полосками составляло 7 mm. На зависимости сопротив-

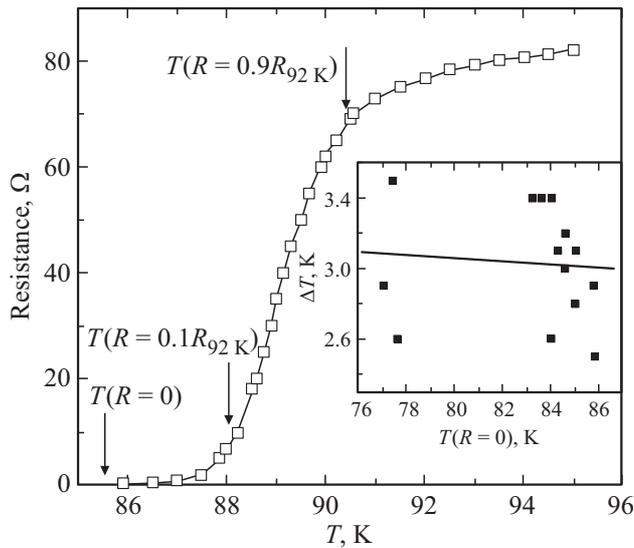


Рис. 2. Зависимость $R(T)$ и измеренные для каждого образца значения: $T(R=0)$, $T(R=0.9R_{92K})$, $T(R=0.1R_{92K})$ (R_{92K} — сопротивление пленки перед переходом при 92 К). На вставке показано распределение $\Delta T = T(R=0.9 \cdot R_{92K}) - T(R=0.1 \cdot R_{92K})$ от $T(R=0)$.

ления от температуры $R(T)$ для каждого образца определяли значения: R_{92K} — сопротивление в нормальном состоянии перед переходом, $T(R=0)$ — температуру полного перехода, $T(R=0.9 \cdot R_{92K})$, $T(R=0.1 \cdot R_{92K})$ — температуры перехода при значениях 0.9 и 0.1 от R_{92K} соответственно (рис. 2).

3. Результаты

Толщина пленки за один импульс в одинаковых условиях напыления, плотности энергии в импульсе $1.72 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ и температуре подложки $\sim 740^\circ\text{C}$, увеличивалась приблизительно пропорционально ширине отверстия фильтра, составив $3 \cdot 10^{-2} \text{ nm/pulse}$ при напылении без фильтра (рис. 1). Для всех пленок, полученных с фильтрацией факела, величина $T(R=0.9 \cdot R_{92K}) - T(R=0.1 \cdot R_{92K}) = \Delta T$ находилась в интервале 3.5–2.3 К при среднем значении 3 К (рис. 2, вставка). Для пленок толщиной 100–150 и 150–200 nm $T(R=0)$ возрастала не одинаково в зависимости от величины фильтрации, что на графике рис. 3 представлено прямыми с разным наклоном. Сопоставимые $T(R=0)$ для тонких пленок достигались при скорости частиц в 1.5–2 раза большей, чем для толстых. Скорости отсечки $0.5\text{--}1 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ соответствовала температура $T(R=0)$ около 77 К. С увеличением скорости напыления происходило увеличение $T(R=0)$, более медленное при плотности энергии лазерного импульса 1.72, чем при $2.32 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ (рис. 4). В интервале плотности энергии импульса $1.47\text{--}2.04 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ и скоростях напыления

порядка $0.1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ всегда формировались пленки с $T(R=0)$ около 77 К (рис. 4).

Поверхность пленок, полученных из компонентов факела со скоростями отсечки $0.5\text{--}1.0 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (рис. 3) или скоростях напыления около $0.1 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ (рис. 4), состояла из пирамид с многогранным основанием при усеченных вершинах и размахом шероховатости до 80 nm (рис. 5). Наибольший размах шероховатости был получен при ширине фильтра 4 mm. Поверхность большинства пирамид состояла из террас, образованных спиралью. Расстояние между ступеньками спиралей составляло в среднем 20–30 nm. Кроме пирамид, присутствовали округлые, не ограниченные частицы размером до 500 nm. Кристаллы на своих боковых гранях

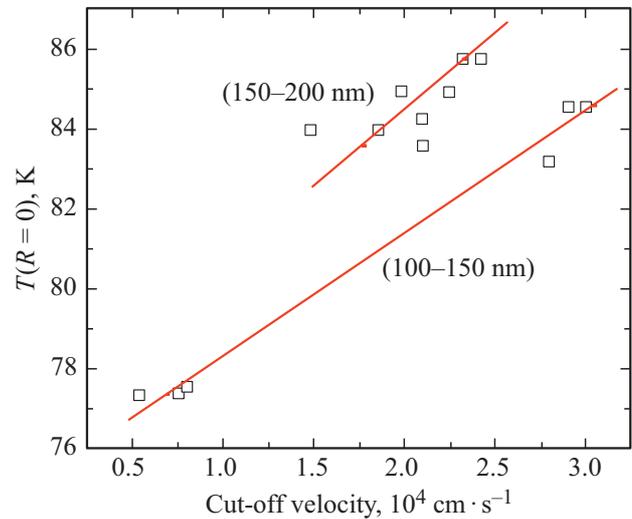


Рис. 3. Значения $T(R=0)$ для пленок разной толщины в зависимости от минимальной скорости частиц эрозонного факела, прошедших через фильтр.

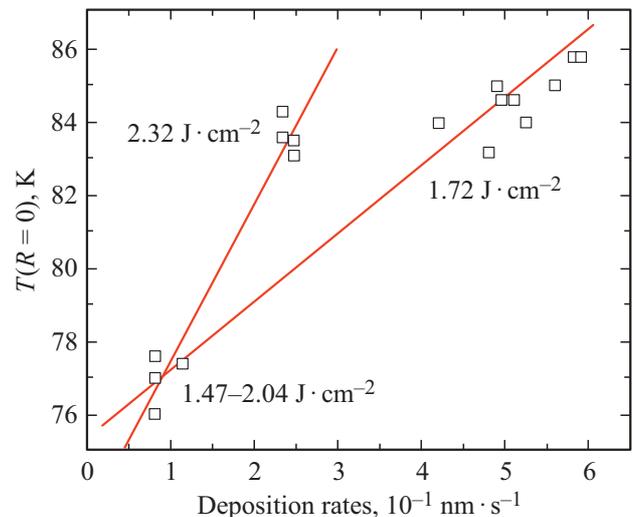


Рис. 4. Значения $T(R=0)$ при разной плотности энергии лазерного импульса в зависимости от скорости напыления пленок.

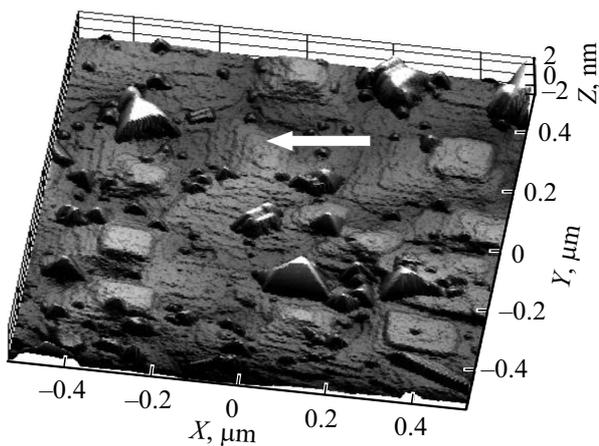


Рис. 5. АСМ-пленки с пирамидами в форме спиралей после напыления со скоростью $0.08 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ через фильтр шириной 4 мм с частотой фильтрации 5 Hz. Стрелка указывает на одну из ступенек на пирамиде.

показывали структуру в виде пакета ограненных стержней, перпендикулярных подложке с шириной стержней до 10 нм как и в работе [6]. Минимальный размер таких кристаллов в основании составил около 30 нм, т. е. соответствовал ширине 2–3 стержней.

При плотности энергии в импульсе $1.72 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ и без фильтрации эрозийного факела пленки толщиной 300 нм имели неровную поверхность с размахом шероховатости более 100 нм и размером частиц в среднем 1 μм при $R_q = 40\text{--}50 \text{ nm}$ (рис. 6). Рельеф определяли крупные и мелкие частицы и, в небольшой доле, ограненные кристаллы. На АСМ-изображении относительно ровные площадки чередуются с глубокими впадинами и округлыми или ограненными кристаллами. Минимальная величина округлых частиц, которые разрешалась с использованием нашей иглы, составила величину чуть менее 50 нм. После фильтрации факела через отверстие

шириной 10 мм (на рис. 4. скорости напыления больше $0.3 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$) формируется поверхность пленки без резких перепадов рельефа, состоящая из пирамид высотой до 30–40 нм с округлыми основаниями диаметром до 1500 нм и боковой поверхностью из нерегулярных террас высотой преимущественно 1 или 2 нм. Поэтому на склонах зерен R_q составляла 1–2 нм (рис. 7). Расстояние между террасами было в среднем 100 нм. Размах шероховатости на площади в несколько квадратных микрометров не превышал 40 нм. Уменьшение размера фильтра до 8 мм не изменяло характера рельефа, но привело к появлению кристаллов высотой до 60 нм. Увеличение скорости напыления за счет возрастания частоты фильтрации на 30% до 32 Hz (одновременно возрастает и скорость отсечки) повысило размах шероховатости до 80 нм, а R_q до 12 нм. Ограниченные кристаллы стали крупнее, а диаметр пирамид с округлыми основаниями уменьшился с 1500 до 200–500 нм. Высокая плотность энергии импульса (до $2.44 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$) при частоте напыления 18 Hz увеличивала количество, размер и высоту ограненных кристаллов свыше 100 нм, привело к появлению кратеров (рис. 8).

4. Обсуждение

Исследование рельефа поверхности пленок, как и в работе [6], позволяет приблизительно оценить размеры прошедших через фильтр частиц лазерного факела при частоте напыления 20 Hz следующим образом: фильтрация через отверстие шириной 8 мм из процесса формирования пленок исключает частицы с размерами более 500 нм. Эти частицы разлетаются со скоростями менее $1.7 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (рис. 1). После напыления через фильтры 6 и 4 мм на поверхности отсутствовали округлые частицы с размером 50–70 нм, дающие размах шероховатости до 20–40 нм, которые наблюдали при напылении без фильтрации и с фильтрацией через отверстие более 8 мм. Эти частицы при сферической форме

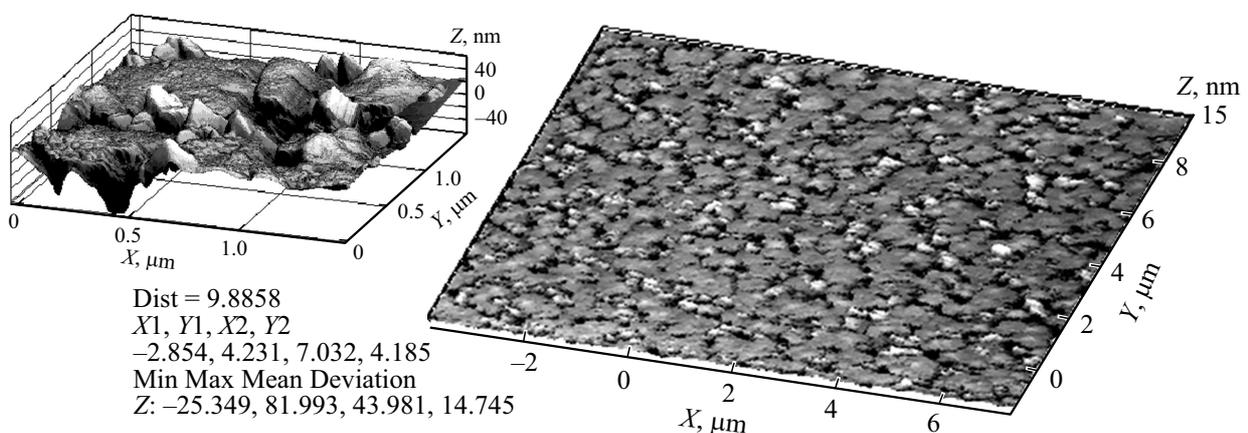


Рис. 6. АСМ-пленки после напыления без фильтра. На вставках представлен увеличенный фрагмент поверхности в изометрии и численная характеристика высот рельефа на случайной линии.

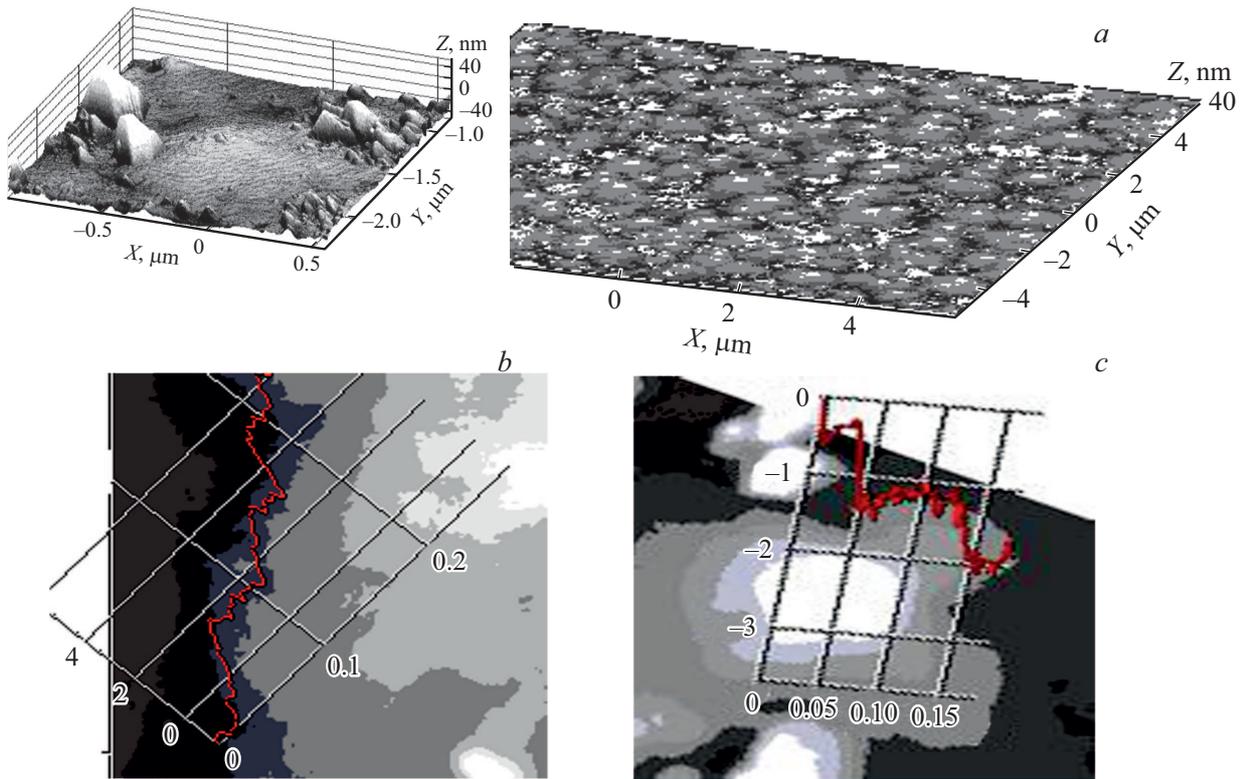


Рис. 7. АСМ-пленок, полученных фильтрацией с частотой 21 Hz через фильтр шириной 10 mm лазерного факела с плотностью энергии в импульсе $1.72 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$: *a* — общий вид поверхности (на вставке в изометрии представлен увеличенный фрагмент); *b, c* — топология пирамид с кривыми рельефа на ступеньках 2 nm и 1 nm соответственно. Игла АСМ двигалась по оси абсцисс координатной сетки (ось *X* — в μm , ось *Y* — в nm).

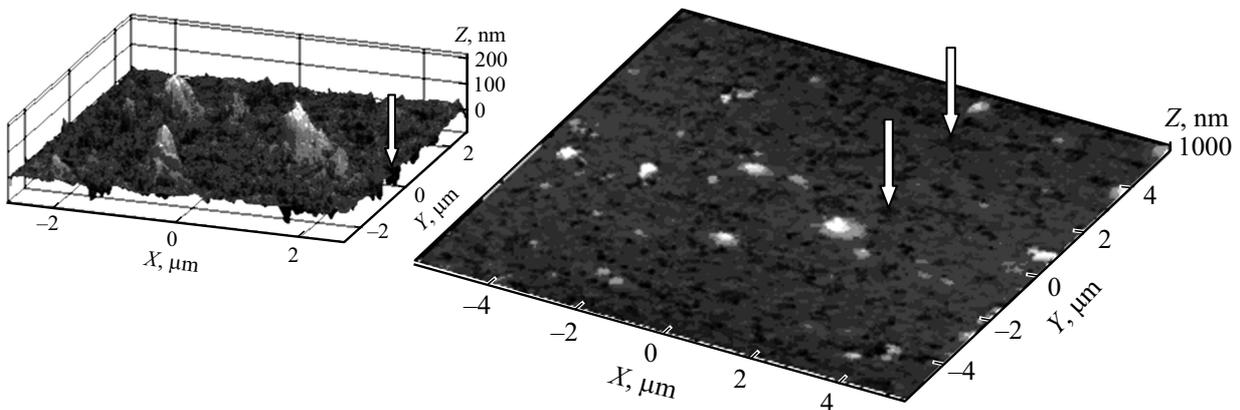


Рис. 8. АСМ поверхности пленок после фильтрации с частотой 18 Hz через фильтр шириной 6 mm при плотности энергии в импульсе $2.5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. На вставке показан фрагмент поверхности крупным планом. Стрелки указывают на кратеры.

имели бы диаметр около 40 nm. Частицы меньшего размера со скоростью разлета более $2.4 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ не дают существенного вклада в шероховатость, т.к. на наиболее гладких участках она составляла 1.2 nm. Таким образом, на рис. 3 все пленки с $T(R=0)$ более 82 K были получены из атомов, ионов или частиц диаметром меньше 40 nm, а с $T(R=0)$ порядка 77 K — из частиц размером меньше 1 μm .

Поверхности пленок с $T(R=0)$ около 77 K и с $T(R=0)$ более 82 K имеют существенные отличия. Поверхность пленок с $T(R=0)$ около 77 K состоит из пирамид в форме спиралей высотой до 80 nm с прямоугольными основаниями и высотой террас 1–2 nm (рис. 5). Такой же рельеф образуется как при магнетронном, так и лазерном напылении [4–5]. Особенностью поверхности наших пленок является наличие

округлых кристаллов без огранки размером до 500 nm. Такие кристаллы могут стать основой для образования следующего слоя пленки с измененной структурой, как это происходило в пленках Al [9]. Частицы меньших размеров, прошедшие через фильтр, в результате кристаллизации и поверхностной диффузии организуются в спиральные пирамиды. Четкая огранка с правильными прямоугольниками в основании пирамид характеризуют равновесное кристаллографическое состояние пленки, вероятно, с равновесным числом носителей заряда и вакансий.

При скоростях напыления выше $0.2\text{--}0.3\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ $T(R=0)$ достигает 86 К. Поверхность после напыления через фильтр представлена пирамидами с округлыми основаниями диаметром до 1500 nm с высотой до 30–40 nm и нерегулярными террасами высотой 1–2 nm (рис. 7). На поверхности присутствует небольшое количество ограненных кристаллов высотой 20–30 nm с многоугольниками в основании, не имеющих террас и расположенных преимущественно по границам округлых пирамид. На гранях пирамид центр стержней (плоскость (001)) выше их краев, поэтому подвижность атомов в центре меньше, чем по границам. Диффузия по границам стержней обеспечивает сток атомов к основаниям округлых пирамид и рост ограненных монокристаллов. Разная диффузия по плоскости (001) пленки ВТСП и по границам, формирует холмистый рельеф с ограненными кристаллами на границах и тройных стыках пирамид с округлыми основаниями. Ограненные кристаллы могут стать следующим слоем пленки с более равновесной кристаллической структурой. Получаемая же холмистая поверхность из пирамид с округлыми основаниями представляется менее равновесной, чем образованная из пирамид с огранкой при медленном напылении пленок.

В обоих случаях рост пленок, напыленных через фильтр, наиболее соответствует механизму Вольмера–Вебера, когда атомы и мелкие кластеры сильнее связываются между собой, чем с подложкой, а трёхмерные островки зарождаются и растут на подложке, образуя пирамиды текстурованной пленки. Возможно, что при этом когерентные границы между отдельными островками, как в висмуте [10–11], почти не влияют на сопротивление пленок. Сильная связь между атомами распыляемого материала (характерная для механизма роста Вольмера–Вебера) при увеличении плотности энергии в импульсе (и возрастании подвижности атомов на поверхности) закономерно приводит к образованию каверн при одновременном появлении высоких неровностей (рис. 8). Рост пирамид по спирали позволяет оценить плотность винтовых дислокаций, однако отсутствие пирамид в форме спиралей не исключает наличия винтовых дислокаций. Скорее следует, что при быстром напылении поток распыленного материала не успевает повторить рельеф винтовых дислокаций подложки. После объединения островков рельеф определяется ростом

вдоль кристаллографической оси c (001) и в плоскости (001). Поступающий на подложку с температурой 740°C поток атомов, ионов и частиц формирует при медленном напылении поверхность из пирамид в форме спиралей прямоугольными основаниями и большой шероховатостью, что означает более быстрый рост вдоль оси c , чем в плоскости пленки, что характеризует высокая шероховатость. При высоких скоростях напыления равновесного распределения потока вещества факела между импульсами не достигается и происходит более равномерный рост вдоль оси c с образованием пирамид с округлыми основаниями диаметром до 1500 nm и шероховатостью (R_q) 2–4 nm. Неравновесной структуре пленки должно соответствовать большее количество пор и вакансий. Таким образом, при частоте фильтрации 4–5 Hz за время между импульсами происходит организация частиц размером около и менее 500 nm в спиральные пирамиды. Процесс организации стимулируется плотностью энергии в импульсе близком к порогу абляции ($1.2\text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$).

Повышение $T(R=0)$ как при увеличении скорости напыления, так и при увеличении скорости частиц лазерного факела не зависит от шероховатости поверхности, поскольку наиболее высокие значения температуры перехода равные 87 К соответствуют большой шероховатости после напыления без фильтра. Получение сопоставимых значений $T(R=0)$ для пленок толщиной 100–150 nm происходит при более высокой скорости частиц лазерного факела, чем для толстых (рис.3), из-за разрушительного действия атмосферы и паров воды [12] или меньшей концентрации носителей заряда (дырок). Для соединений на основе купратов типа $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ известна зависимость концентрации дырок от температуры сверхпроводящего перехода [13–15]. Этот факт доказан в работах [13–14], для массивных ВТСП, где концентрацию дырок изменяли путем замены катионов с различными валентностями на Sr или Ca с последующими обработками при 430°C в атмосфере кислорода 250 bar. Если принять, что скорость частиц лазерного факела или скорость напыления влияют на концентрацию дырок, то для наших экспериментов значения $T(R=0)/(T_{\text{max}} = 92\text{ K})$ при разных условиях напыления изменялись от 0.82 до 0.93. Этим значениям отношений массивных образцов соответствуют концентрации дырок от 0.11 до 0.13 на ячейку CuO_2 . Величине отношения 0.93 соответствует максимум $T(R=0)$ как для массивных образцов, так и наших пленок.

5. Заключение

Пленки, полученные со скоростями напыления около $0.1\text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ имеют $T(R=0)$ 77 К и ниже. Поверхность таких пленок состоит из пирамид в форме спиралей с преимущественно прямоугольными основаниями и высотой ступенек спиралей около 1–2 nm. Общий рельеф представлен холмистыми неровностям

высотой до 80 nm. Режимы напыления тонких пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ со скоростями более $0.3 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$ компонентами эрозионного факела со скоростями отсечки $2 \cdot 10^4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ обеспечивают получение $T(R=0)$ выше 82 K. Поверхность таких пленок представлена преимущественно пирамидами высотой до 45 nm с округлыми основаниями диаметром до 1500 nm и поверхностью, состоящей из нерегулярных террас высотой 1–2 nm. На склонах пирамид R_q составляла 1–2 nm с расстоянием между террасами около 100 nm. Пленка имеет холмистый рельеф с шероховатостью около 2–4 nm на площади в несколько квадратных микрометров. Значение $T(R=0)$ выше 82 K может быть вызвано неравновесной структурой пленок с большим количеством носителей дырочного типа, образующихся за счет скорости напыления и скорости компонентов лазерного факела при высокой частоте импульсов и плотности энергии в импульсе. При медленном и быстром напылении преимущественно по границам оснований пирамид вырастают монокристаллы правильной ограненной формы в виде пирамид без террас и ступенек. По данным АСМ такие пирамиды состоят из стержней диаметром до 10 nm, перпендикулярных подложке. Эти пирамиды могут стать при увеличении толщины пленки причиной изменения токовых и температурных характеристик ВТСП пленок толщиной 100–200 nm, полученных при быстром напылении. Таким образом, при уменьшении частоты фильтрации с 18–20 Hz до 4–5 Hz за время между импульсами за счет поверхностной диффузии происходит организация частиц небольшого размера в спиральные пирамиды. Процесс организации происходит лучше при плотности энергии в импульсе, близкой к порогу абляции. При увеличении энергии в импульсе в 1.5 раза (до $1.7 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$) и частоты в 4–5 раз в тонких пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ формируется неравновесная структура с более низкой шероховатостью и высокими значениями $T(R=0)$.

Финансирование

Работы выполнены по государственному заданию № 075-00920-20-00.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B. Dam, J. Rector, M.F. Chang, S. Kars, D.G. de Groot, R., Appl. Phys. Lett. **65**, 1581 (1994).
- [2] Pulsed Laser Deposition of Thin Films / Ed. Douglas B. Chrisey, Graham K. Hubler. John Wiley & Sons Inc. N.Y. (1994).
- [3] K.H. Wu, S.P. Chen, J.Y. Juang, T.M. Uen, Y.S., Physica C, **289**, 230 (1997).
- [4] C. Gerger, D. Anslemetti, J.G. Bednorz, J. Mannhart, D.G. Schlom. Nature **350**, 279 (1991).
- [5] B. Dam, J.H. Rector, J.M. Huijbregtse, R. Griessen. Physica C **305**, 1 (1998).
- [6] A.I. Il'in, A.A. Ivanov, O.V. Trofimov, A.A. Firsov, A.V. Nikulov, A.V. Zotov. Rus. Microelectron. **48**, 119 (2019).
- [7] R. Arpaia, D. Golubev, R. Baghdadi, R. Ciancio, G. Drazic, P. Orgiani, D. Montemurro, T. Bauch, F. Lombardi. Phys. Rev. B **96**, 064525 (2017).
- [8] E.V. Pechen, A.V. Varlashkin, S.I. Krasnosvobodtsev, B. Brunner, K.F. Renk. Appl. Phys. Lett. **66**, 2292 (1998).
- [9] А.И. Ильин, Гликман Е.Е., И.Ю. Борисенко, Н.Д. Захаров, В.В. Старков. Поверхность. Физика, химия, механика **94**, 77 (1991).
- [10] A.I. Il'in, A.V. Andreeva, B.N. Tolkunov. Mater. Sci. Forum. **207-209**, 625 (1996).
- [11] А.И. Ильин, А.В. Андреева. Физика металлов и металлосведение **80**, 132 (1995).
- [12] M. Truchlya, T. Plecenika, O. Krsko, M. Gregora, L. Satrapinskyya, T. Rocha, B. Granc, M. Mikulaa, A. Dujavovab, S. Chromikb, P. Kusa, A. Plecenika. Physica C **483**, 61 (2012).
- [13] Y. Koike, Y. Iwabuchi, S. Hosoya, N. Kobayashit, T. Fukase. Physica C **159**, 105 (1989).
- [14] C.N.R. Rao, J. Gopalakrishnan, A.K. Santra, V. Manivannan. Physica C **174**, 11 (1991).
- [15] А.И. Головашкин. Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Препринт. 10. 1-32, (2005).

Редактор К.В. Емцев