

05

## Ультратонкие слои оксида церия для формирования субмикронных YBCO-структур

© Е.А. Архипова, М.В. Зорина, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: parafin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 17 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 17 ноября 2025 г.

Принято к публикации 10 декабря 2025 г.

Исследованы нанометровые слои оксида церия ( $\text{CeO}_2$ ) на сапфире и характеристики осажденных на них слоев YBCO в зависимости от температуры роста  $\text{CeO}_2$ . Показано, что использование ультратонких слоев  $\text{CeO}_2$ , полученных при пониженной температуре роста, открывает возможность формирования методом задающей маски сверхпроводящих эпитаксиальных YBCO-структур с субмикронными размерами элементов.

**Ключевые слова:** тонкие пленки, формирование топологии структуры, YBCO, оксид церия.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62524.20575

В настоящее время криогенная электроника на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП)  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) имеет обширный спектр приложений. На основе джозефсоновских переходов были созданы массивы контактов [1], разработаны стандарты напряжения [2], генераторы терагерцевых сигналов [3], детекторы [4,5], маломощные усилители и смесители [6,7]. Вследствие низкого поверхностного сопротивления ВТСП-пленки используются в высокочастотных устройствах [8]. В силовой электронике также применяются пленочные ВТСП-ограничители тока [9].

Методы исследования и технология изготовления структур на основе пленок YBCO достигли высокого уровня [10]. При этом топология сверхпроводящей схемы создается травлением или ионной имплантацией функциональной пленки сверхпроводника. И здесь высокая чувствительность пленок YBCO к внешним воздействиям приводит к тому, что используемые технологические операции ухудшают конечные параметры формируемых структур и приборов.

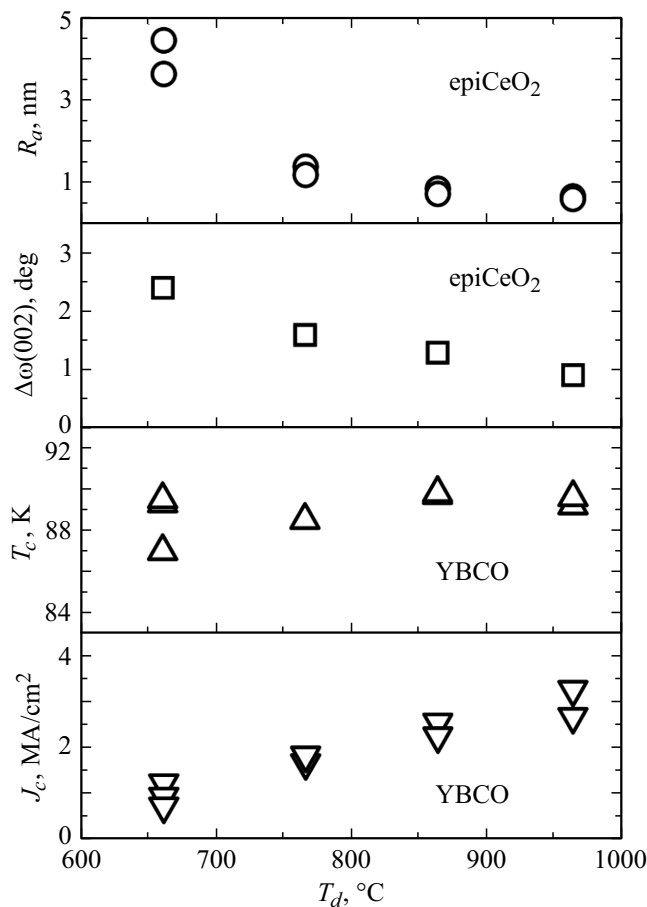
Ранее нами был предложен альтернативный способ формирования планарных сверхпроводящих структур — метод задающей маски (ЗМ) на фиаците [3] и сапфире [11], при котором топология задается предростовой локальной модификацией подложки до процесса осаждения YBCO, а рисунок схемы формируется в процессе осаждения YBCO на модифицированную подложку. При этом используются следующие особенности роста YBCO:

— на  $r$ -срезе сапфира ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) с подслоем эпитаксиального оксида церия ( $\text{epiCeO}_2$ ) в стандартном режиме роста YBCO формируется высококачественная сверхпроводящая эпитаксиальная пленка [12,13];

— слой YBCO, осажденный в том же режиме роста на специальным образом модифицированную подложку, является несверхпроводящим и формирует разделительные области сверхпроводящей схемы.

Модификация подложки проводится следующим образом. Из аморфного оксида церия ( $\text{coldCeO}_2$ ), осажденного лазерным распылением без нагрева подложки, формируется маска, определяющая рисунок схемы. Далее на подложку осаждается оксид церия в режиме эпитаксиального роста ( $\text{hotCeO}_2$ ). В окнах маски на сапфире формируется эпитаксиальный слой  $\text{epiCeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Вне окон маски слой  $\text{coldCeO}_2$  препятствует эпитаксии, и на нем формируется неэпитаксиальная область  $\text{hotCeO}_2/\text{coldCeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Затем при магнетронном осаждении YBCO в областях  $\text{hotCeO}_2/\text{coldCeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  YBCO растет неэпитаксиально, формируя разделительную изолирующую область, а на поверхности эпитаксиального оксида церия, т.е. в областях  $\text{epiCeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , растет эпитаксиальная пленка YBCO, формирующая сверхпроводящую область. Так как аморфный оксид церия осаждается без нагрева подложки, для формирования рисунка используется простая взрывная литография (по оптическому резисту для микронных размеров или электронному для субмикронных). Важно, что формальных ограничений на толщину функциональной пленки YBCO, осаждаемой на подложку с уже созданной топологией, здесь нет. Преимущество метода ЗМ заключается в том, что из технологического процесса исключается постростовая обработка „толстой“ пленки YBCO, а формирование элементов схемы задается рисунком аморфного оксида церия.

Формирование методом ЗМ структур YBCO с минимальными размерами требует одновременного выполнения следующих условий: низкая шероховатость слоя  $\text{epiCeO}_2$ ; минимальная толщина  $\text{epiCeO}_2$ , при которой сохраняются высокие характеристики пленки YBCO; минимальная толщина слоя  $\text{coldCeO}_2$ , при которой образуется разделительная несверхпроводящая область YBCO/ $\text{hotCeO}_2/\text{coldCeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Для решения этой задачи были изготовлены три серии структур.



**Рис. 1.** Шероховатость  $R_a$  epiCeO<sub>2</sub>, разориентация блоков мозаики  $\Delta\omega(002)$  epiCeO<sub>2</sub> для слоев толщиной 50 nm и характеристики ( $T_c$  и  $J_c$ ) пленок YBCO, выращенных на этих слоях, в зависимости от температуры роста слоя epiCeO<sub>2</sub>.

В первой серии исследовались свойства структур YBCO/epiCeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в зависимости от температуры осаждения слоя epiCeO<sub>2</sub> толщиной 50 nm, которые использовались для сравнения с ультратонкими слоями. Условия осаждения YBCO не менялись, толщина пленки 70 nm. Результаты приведены на рис. 1: шероховатость поверхности  $R_a$  epiCeO<sub>2</sub> (среднеарифметическое отклонение высот поверхности в скане размером  $2 \times 2 \mu\text{m}$ , измеренное методом атомно-силовой микроскопии), полуширина кривой качания рентгеновского отражения  $\Delta\omega(002)$  epiCeO<sub>2</sub>, характеризующая разориентацию блоков мозаики слоя оксида церия, критическая температура  $T_c$  и плотность критического тока  $J_c$  (при 77 K) пленки YBCO. Значения  $\Delta\omega(005)$  YBCO составили менее  $1^\circ$ .

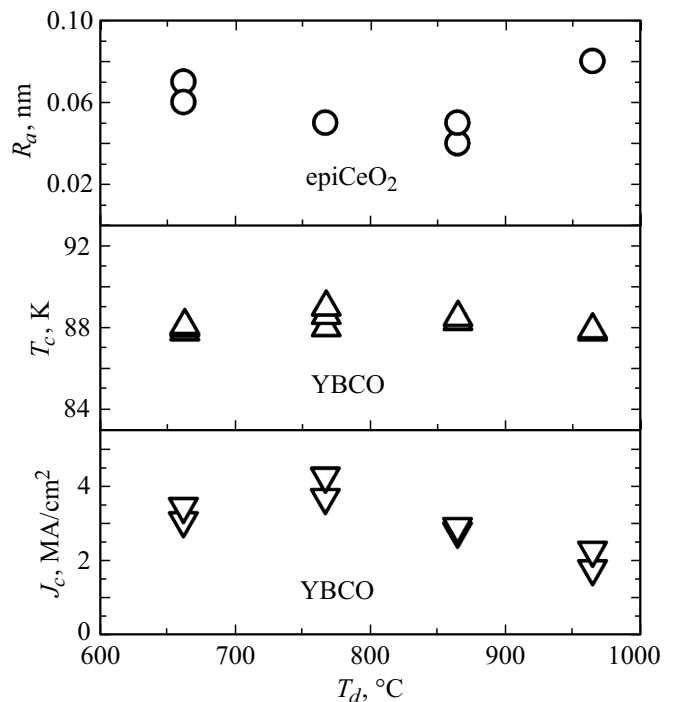
Вторая серия структур отличалась только толщиной epiCeO<sub>2</sub>. Ультратонкий (3 nm) слой epiCeO<sub>2</sub> был выбран по результатам работы [14], где показано, что на таком слое возможно получение высококачественных YBCO-пленок. Результаты приведены на рис. 2: шероховатость  $R_a$  epiCeO<sub>2</sub>,  $T_c$  и  $J_c$  (77 K) пленки YBCO. Измерения  $\Delta\omega(002)$  ультратонких слоев epiCeO<sub>2</sub> не

проводятся ввиду очень слабого сигнала от слоев такой малой толщины. Величины  $\Delta\omega(005)$  YBCO для этой серии составили также менее  $1^\circ$ .

Для слоя epiCeO<sub>2</sub> толщиной 50 nm шероховатость поверхности и разориентация блоков мозаики существенно уменьшаются при увеличении температуры роста  $T_d$ . Минимальные значения достигаются при  $T_d = 960^\circ\text{C}$ : для epiCeO<sub>2</sub>  $R_a = 0.7\text{--}0.8\text{ nm}$  и  $\Delta\omega(002) = 0.9^\circ$ , что свидетельствует о хорошем кристаллическом качестве слоя epiCeO<sub>2</sub>, возможном только в случае эпитаксиального роста. Значение  $T_c$  пленок YBCO слабо меняется в зависимости от температуры роста epiCeO<sub>2</sub>. Наибольшее значение  $J_c = 3\text{ MA/cm}^2$  получено при максимальной в данном исследовании температуре роста  $960^\circ\text{C}$ .

Для слоя epiCeO<sub>2</sub> толщиной 3 nm шероховатость поверхности в отличие от „толстого“ (50 nm) слоя мала во всем диапазоне ростовых температур. Величина  $R_a$  для epiCeO<sub>2</sub> в этом случае составляет  $0.05\text{--}0.08\text{ nm}$ , что сравнимо с шероховатостью исходной сапфировой подложки  $R_a = 0.05\text{ nm}$ . Эпитаксиальный рост слоев оксида церия здесь косвенно подтверждается хорошими сверхпроводящими свойствами выращенных на них эпитаксиальных пленок YBCO. Интересно, что в отличие от „толстого“ слоя epiCeO<sub>2</sub> на ультратонких слоях критическая плотность тока  $J_c$  пленок YBCO максимальна (превышает  $3\text{ MA/cm}^2$ ) при низких температурах осаждения ( $660\text{--}760^\circ\text{C}$ ) и слабо уменьшается с ростом температуры осаждения epiCeO<sub>2</sub>.

Для оценки сопротивления изолирующей области была изготовлена третья серия структур — обла-



**Рис. 2.** Шероховатость  $R_a$  epiCeO<sub>2</sub> для слоев толщиной 3 nm и характеристики ( $T_c$  и  $J_c$ ) пленок YBCO, выращенных на этих слоях, в зависимости от температуры роста слоя epiCeO<sub>2</sub>.

сти YBCO/epiCeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, разделенные промежутком YBCO/hotCeO<sub>2</sub>/coldCeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> шириной 10 μm. Толщина слоев аморфного coldCeO<sub>2</sub> была выбрана в диапазоне от 3 до 24 nm по условию ограничения толщины, приемлемой для взрывной литографии по электронному резисту. Толщина epiCeO<sub>2</sub>, так же как и во второй серии, составляла 3 nm. После осаждения YBCO измерялось сопротивление разделительной области при  $T = 77$  K. Полученные величины сопротивлений имели значительный разброс и возрастали по мере увеличения времени хранения структур. Поэтому в таблице для наглядности результаты рассортированы по трем группам: с сопротивлением меньше или больше 3 kΩ/sq и возникновением сверхпроводящих утечек. Величина 3 kΩ/sq значительно больше сопротивления пленки YBCO в нормальном состоянии, т.е. является достаточной для формирования разделительной области. Данные, приведенные в таблице, показывают, что при температуре роста epiCeO<sub>2</sub> 660 °C для формирования разделительной области с высоким сопротивлением достаточно слоя coldCeO<sub>2</sub> толщиной 6 nm. При увеличении  $T_d$  epiCeO<sub>2</sub> свойства изолирующей области ухудшаются.

Таким образом, в работе показано, что в диапазоне ростовых температур epiCeO<sub>2</sub> 660–960 °C характеристики YBCO/epiCeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ведут себя по-разному в зависимости от толщины epiCeO<sub>2</sub>:

— для подслоя epiCeO<sub>2</sub> толщиной 50 nm оптимальная температура равна 960 °C;

— ультратонкий (3 nm) подслоя epiCeO<sub>2</sub> имеет более низкую шероховатость, а оптимум характеристик пленки YBCO сдвигается вниз по температуре до 660–760 °C.

Показано, что снижение до 660 °C температуры роста ультратонкого (3 nm) подслоя epiCeO<sub>2</sub> в структуре YBCO/epiCeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> позволяет одновременно сохранить высокие параметры сверхпроводящей пленки YBCO и снизить толщину аморфного оксида церия в изолирующей области YBCO/hotCeO<sub>2</sub>/coldCeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до значений всего 6 nm.

Таким образом, при столь низких толщинах слоев оксида церия открывается возможность формирования методом задающей маски YBCO-структур с субмикронными размерами сверхпроводящих элементов и изолирующих областей.

Характеристика разделительной области структуры со слоями coldCeO<sub>2</sub> разной толщины  $t$  (0 — сверхпроводящая область, прочерк (—) — сопротивление менее 3 kΩ/sq,  $N$  — сопротивление более 3 kΩ/sq,  $T_d$  — температура роста epiCeO<sub>2</sub>)

| $t$ , nm | $T_d$ , °C |      |     |      |
|----------|------------|------|-----|------|
|          | 660        | 760  | 860 | 960  |
| 3        | 0          | 0    | —   | 0    |
| 6        | $N$        | 0, — | —   | 0    |
| 12       | $N$        | $N$  | $N$ | 0, — |
| 24       | $N$        | $N$  | $N$ | —    |

## Благодарности

В работе использовалось оборудование ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00824, <https://rscf.ru/project/24-29-00824/>.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] R. Kandari, S. Kumar, N. Khare, Appl. Phys. A, **131**, 545 (2025). DOI: 10.1007/s00339-025-08666-w
- [2] A.M. Klushin, J. Lesueur, M. Kampik, F. Raso, A. Soso, S.K. Khorshev, N. Bergeal, F. Couëdo, C. Feuillet-Palma, P. Durandetto, M. Grzenik, K. Kubiczek, K. Musiol, A. Skorkowski, IEEE Instrum. Meas. Mag., **23** (2), 4 (2020). DOI: 10.1109/MIM.2020.9062678
- [3] L.S. Revin, D.A. Pimanov, A.V. Chiginev, A.V. Blagodatkina, V.O. Zbrozhek, A.V. Samartsev, A.N. Orlova, D.V. Masterov, A.E. Parafin, V.Yu. Safonova, A.V. Gordeeva, A.L. Pankratov, L.S. Kuzmin, A.S. Sidorenko, S. Masi, P. de Bernardis, Beilstein J. Nanotechnol., **15**, 26 (2024). DOI: 10.3762/bjnano.15.3
- [4] E.I. Glushkov, A.V. Chiginev, L.S. Kuzmin, L.S. Revin, Beilstein J. Nanotechnol., **13**, 325 (2022). DOI: 10.3762/bjnano.13.27
- [5] O. Volkov, V. Pavlovskiy, I. Gundareva, R. Khabibullin, Y. Divin, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **11** (3), 330 (2021). DOI: 10.1109/TTHZ.2020.3034815
- [6] T. Zhang, J. Du, Y.J. Guo, IEEE J. Microwaves, **2** (3), 374 (2022). DOI: 10.1109/JMW.2022.3171675
- [7] M. Malnou, C. Feuillet-Palma, C. Ulysse, G. Faini, P. Febvre, M. Sirena, L. Olanier, J. Lesueur, N. Bergeal, J. Appl. Phys., **116**, 074505 (2014). DOI: 10.48550/arXiv.1405.5998v1
- [8] S. Ariyoshi, H. Mikami, A. Ebata, S. Ohnishi, T. Hizawa, S. Tanaka, K. Nakajima, Mater. Res. Express, **8**, 116001 (2021). DOI: 10.1088/2053-1591/ac3693
- [9] L. Liang, Y. Wang, P. Pang, Z. Yan, Z. Deng, J. Magn. Magn. Mater., **604**, 172283 (2024). DOI: 10.1016/j.jmmm.2024.172283
- [10] Yu. Divin, Appl. Sci., **13** (9), 5766 (2023). DOI: 10.3390/app13095766
- [11] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин, Письма в ЖТФ, **42** (11), 82 (2016). <https://journals.ioffe.ru/articles/43278> [D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A.E. Parafin, P.A. Yunin, Tech. Phys. Lett., **42** (6), 594 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016060110].

- [12] S. Bevilacqua, S. Cherednichenco, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **4** (6), 653 (2014).  
DOI: 10.1134/S0021364007230075
- [13] М. Тарасов, Е. Степанцов, А. Калабухов, М.Ю. Куприянов, Д. Винклер, Письма в ЖЭТФ, **86** (11), 828 (2007).  
[M. Tarasov, E. Stepantsov, A. Kalabukhov, M. Kupriyanov, D. Winkler, JETP Lett., **86** (11), 718 (2008).  
DOI: 10.1134/S0021364007230075].
- [14] А.В. Боряков, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин, ФТТ, **66** (6), 848 (2024).  
DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58235.20HH [A.V. Boryakov, D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A.E. Parafin, P.A. Yunin, Phys. Solid State, **66** (6), 818 (2024).  
DOI: 10.61011/PSS.2024.06.58691.20HH].