

05

## Возможности метода задающей маски для исследования характеристик планарных ВТСП-структур в зависимости от толщины сверхпроводящей пленки

© Д.В. Мастеров,<sup>1</sup> С.А. Павлов,<sup>1</sup> А.Е. Парафин,<sup>1,2</sup> П.А. Юнин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: masterov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 11 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 18 марта 2020 г.

Принято к публикации 19 марта 2020 г.

В отличие от традиционных методов создания планарных сверхпроводящих структур на основе пленок YBCO, в которых для формирования топологии используется травление или ионная имплантация, в методе задающей маски (ЗМ) топология задается на начальном этапе процесса изготовления структуры, при формировании ЗМ, а осаждение YBCO является его завершающим этапом. В окнах ЗМ образуются сверхпроводящие элементы структуры, а между ними — изолирующие области. Зафиксировав топологию сверхпроводящих мостиков на этапе формирования ЗМ, измерены их характеристики в зависимости от толщины пленки YBCO, последовательно проводя циклы осаждения. После каждого осаждения YBCO проводились измерения структурных параметров пленки, а также критических температуры и тока на мостиках, в том числе на мостиках с джозефсоновскими контактами, сформированными на бикристаллической подложке.

**Ключевые слова:** пленки YBCO, задающая маска, планарные ВТСП структуры, джозефсоновские контакты.

DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49799.313-19

### Введение

В процессе моделирования и оптимизации параметров сверхпроводящих приборов и структур важно иметь информацию о зависимости их характеристик от толщины сверхпроводящей пленки. При традиционных методах формирования топологии приборов на основе ВТСП травлением или ионной имплантацией [1,2] для получения такой зависимости необходимо для каждого значения толщины пленки сформировать структуру на новой подложке, т.е. провести полный технологический цикл, включающий напыление пленки, фотолитографию, травление пленки, формирование контактов. В настоящей работе для получения зависимости характеристик структуры от толщины сверхпроводящей пленки использовался предложенный нами метод задающей маски (ЗМ) [3,4]. Зафиксировав топологию сверхпроводящих мостиков на этапе формирования ЗМ, мы проводили последовательные циклы осаждения YBCO, пошагово увеличивая толщину пленки на одном образце. После каждого цикла осаждения YBCO измерялись критическая температура  $T_c$  и плотность критического тока  $J_c$  мостиков. Таким образом, были получены зависимости этих параметров от толщины пленки YBCO с использованием только одной подложки.

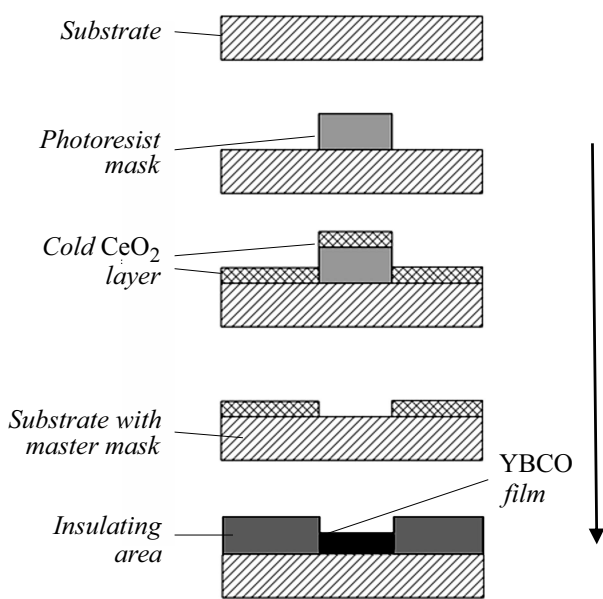
В настоящей работе были использованы монокристаллическая подложка сапфира ориентации (1102)

(*R*-срез) и бикристаллическая подложка фианита ориентации (001) с углом разориентации между направлениями [100] половинок бикристалла в плоскости подложки  $\pm 12^\circ$  относительно границы (т.е. всего  $24^\circ$  между направлениями [100] двух половинок бикристалла), с осажденными на них подслоями эпитаксиального оксида церия ( $\text{epiCeO}_2$ ). Размер подложек  $10 \times 10$  mm. Необходимость  $\text{epiCeO}_2$  обусловлена тем, что выращенные на чистом сапфире пленки YBCO, как правило, не являются сверхпроводящими, а джозефсоновские контакты, сформированные на бикристаллических фианитовых подложках с подслоем  $\text{epiCeO}_2$ , имеют более высокие и воспроизводимые параметры по сравнению с контактами на подложках без такого подслоя.

Последовательность получения сверхпроводниковых структур методом задающей маски [3,4] следующая (рис. 1):

— на подложке (в данном случае на сапфире с  $\text{epiCeO}_2$  и фианите с  $\text{epiCeO}_2$ ) формируется маска из фоторезиста, после чего при комнатной температуре на подложку напыляется слой аморфного оксида церия ( $\text{coldCeO}_2$ );

— фоторезист вместе с напыленной на него пленкой  $\text{coldCeO}_2$  удаляется с подложки в ацетоне в ультразвуковой ванне (lift-off). Таким образом, на подложке образуется ЗМ из аморфной пленки оксида церия, в



**Рис. 1.** Последовательность получения сверхпроводниковых структур методом задающей маски из аморфного оксида церия.

которой вскрыты окна для последующего формирования в них сверхпроводящих элементов;

— в завершение на подложку со сформированной ЗМ осаждается YBCO при температуре эпитаксиального роста. В результате, в окнах маски на поверхности исходной подложки получаются сверхпроводящие элементы заданного рисунка, а между ними на поверхности  $\text{coldCeO}_2$  — разделительные изолирующие области. При последующих осаждениях YBCO в окнах маски доращивается эпитаксиальная пленка YBCO, а разделительные области сохраняют изолирующие свойства.

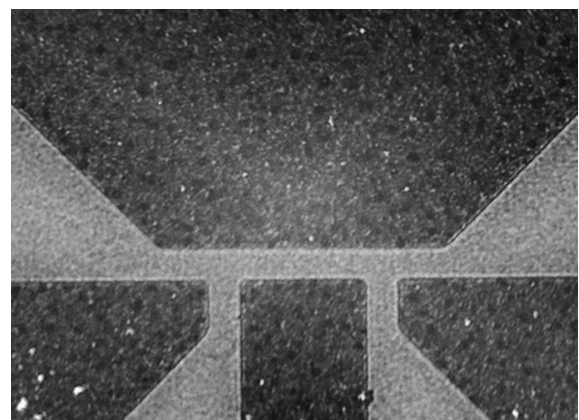
Оксид церия наносился распылением керамической мишени состава  $\text{CeO}_2$  излучением эксимерного лазера LPX 200 (длина волны  $\lambda = 248 \text{ nm}$ ) в атмосфере кислорода при давлении  $P = 20 \text{ Pa}$  без нагрева подложки. Толщина слоя  $\text{coldCeO}_2$ , образующего ЗМ, составляла  $1200 \text{ nm}$  на обеих подложках. Пленки YBCO осаждались методом магнетронного напыления в стандартных условиях для эпитаксиального роста YBCO [5] при температуре подложки  $T_d = 850^\circ\text{C}$  и давлении газовой смеси  $\text{Ar}(50\%)/\text{O}_2$   $P = 75 \text{ Pa}$ .

Задающая маска была сформирована только на одной половине сапфировой подложки, и при осаждении на нее слоя YBCO была получена структура в виде сверхпроводящих мостиков, которые использовались для электрических измерений. На второй половине сапфировой подложки задающей маски не было, и на ней выросла сплошная пленка YBCO, которая использовалась для рентгенодифракционных измерений. На фианитовой бикристаллической подложке ЗМ была сформирована на всей площади. На рис. 2 для иллюстрации топологии структуры приведена фотография мостика шири-

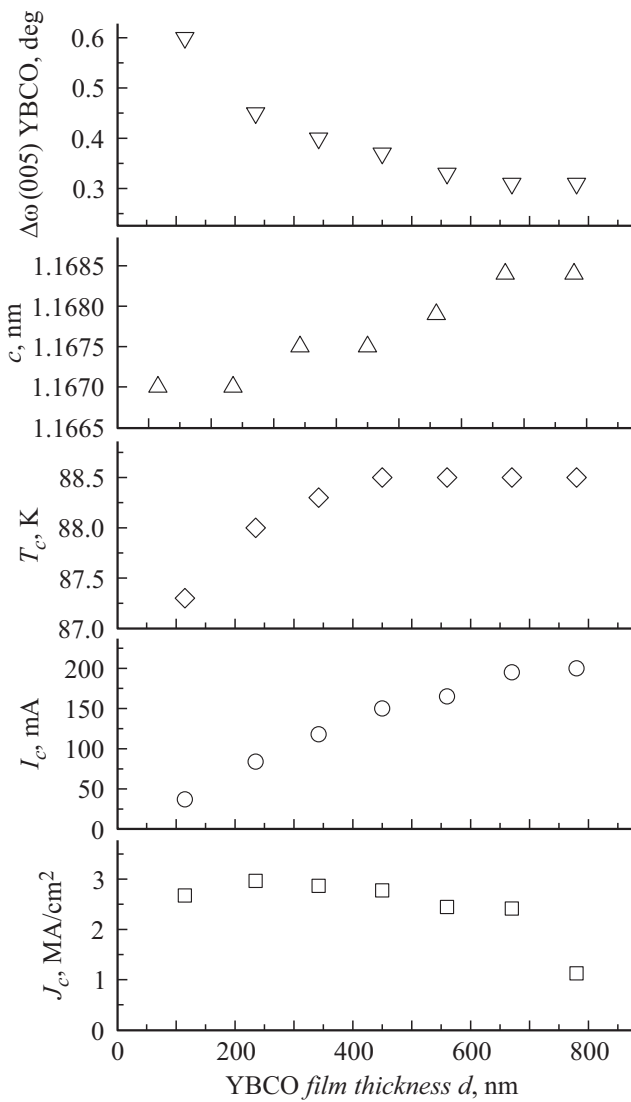
ной  $7 \mu\text{m}$ , сделанная после третьего осаждения YBCO на сапфировую подложку с подслоем  $\text{epiCeO}_2$ .

После каждого цикла осаждения YBCO на полученную структуру термическим напылением наносились серебряные контакты и проводились измерения ее электрофизических и структурных характеристик. Перед следующим осаждением YBCO контакты не стравливались. Отметим, что после очередного осаждения слоя YBCO ранее напыленные серебряные контакты „исчезали“ — не были видны в оптический микроскоп. Измерения критической температуры и критического тока проводились стандартным четырехзондовым методом в сосуде Дьюара с жидким азотом, в качестве зондов использовались прижимные контакты. Критическая температура определялась по уровню  $1 \mu\text{V}$ , измерительный ток равнялся  $100 \mu\text{A}$ . Критический ток фиксировался так же по уровню  $1 \mu\text{V}$ , измерения проводились при температуре жидкого азота  $T = 77 \text{ K}$ . Рентгеноструктурные измерения проводились на дифрактометре Bruker D8 Discover. Измерялась полуширина кривой качания  $\Delta\omega$  рентгеновского отражения (005) YBCO, которая характеризует разориентацию блоков мозаики, и величина оси  $c$  в пленке YBCO.

На сапфировую подложку было проведено семь последовательных осаждений YBCO при одинаковых параметрах процесса. Время каждого напыления составляло  $40 \text{ min}$ , что соответствует толщине осаждаемого на каждом этапе слоя YBCO приблизительно в  $100 \text{ nm}$ . Следует еще раз отметить, что при таких последовательных напылениях YBCO-структура сохраняет заданную топологию, ширина мостов не меняется. Результаты измерений характеристик структуры в зависимости от толщины  $d$  пленки YBCO при последовательном осаждении приведены на рис. 3. Структурные характеристики  $\Delta\omega$  (005) YBCO и величина оси  $c$  — измерялись на половине подложки со сплошной пленкой.



**Рис. 2.** Фотография мостика шириной  $7 \mu\text{m}$ , сделанная после третьего осаждения YBCO на сапфировую подложку с подслоем  $\text{epiCeO}_2$  и задающей маской (светлое поле — эпитаксиальная пленка YBCO, темное поле — разделительная изолирующая область).



**Рис. 3.** Изменение структурных и электрофизических характеристик сверхпроводящих мостиков шириной 12 μm при последовательном осаждении YBCO на сапфировую подложку с подслоем epiCeO<sub>2</sub>.

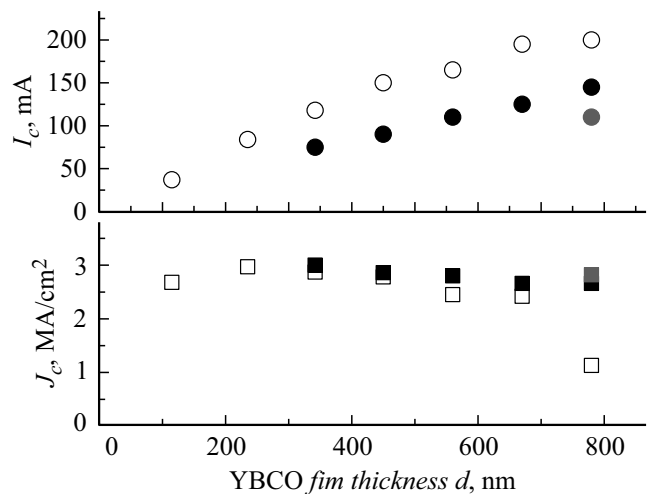
Величины критической температуры  $T_c$ , критического тока  $I_c$  и плотности критического тока  $J_c$  при температуре  $T = 77$  К приведены здесь для мостов шириной  $w = 12 \mu\text{m}$ . На рис. 4 приведены значения плотности критического тока для мостов шириной 12, 7 и 5 μm.

Как видно из представленных графиков, полуширина кривой качания рентгеновского отражения  $\Delta\omega(005)$  YBCO уменьшается от осаждения к осаждению и достигает минимального значения после шестого напыления при толщине пленки 670 nm, при этом величина оси  $c$  пленки возрастает практически линейно. В течение первых четырех осаждений (до толщины YBCO пленки в 450 nm) наблюдался рост критической температуры, затем ее значение стабилизировалось. Величина критического тока, измеренная на мостах шириной 12 μm, возрастала практически линейно до толщины 450 nm,

плотность критического тока до этой толщины была постоянной в пределах ошибки измерений и составила  $2.8 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ . При дальнейшем увеличении толщины измеренная плотность критического тока уменьшалась. На наш взгляд, это может быть связано с разогревом структуры при протекании тока большой величины через прижимные контакты. Разогрев начинает сказываться при токе величиной более 110 mA, что видно из сравнения измеренных критических токов мостиков разной ширины — 12, 7 и 5 μm (рис. 4). Таким образом, из приведенных результатов измерений видно, что реальная плотность критического тока мостов практически постоянна при изменении толщины пленки YBCO от 115 до 730 nm и равна  $2.8 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ .

Размеры контактов сверхпроводящих мостиков равнялись  $400 \times 600 \mu\text{m}$ , расстояние между контактами соседних мостиков — 250 μm. При всех семи значениях толщины пленки YBCO сопротивление между соседними чипами было  $R \approx 10^6 \Omega$  при комнатной температуре и  $R > 10^8 \Omega$  при температуре жидкого азота, что говорит о высоком качестве изолирующих областей, полученных методом ЗМ.

На бикристаллическую фианитовую подложку с подслоем epiCeO<sub>2</sub> было сделано два последовательных осаждения YBCO при одинаковых параметрах процесса. Время каждого процесса составляло 70 min. В таблице приведены результаты измерения плотности критического тока джозефсоновских переходов различной длины и контрольных мостиков, расположенных на „берегах“, т.е. вне бикристаллической границы. Уменьшение плотности критического тока контрольного мостика при увеличении толщины, как обсуждалось выше, связано с разогревом прижимных контактов при протекании тока в 110 mA. Измерение критического тока джозефсоновских переходов проводилось в сосуде Дьюара с жидким



**Рис. 4.** Величины критического тока и его плотности при  $T = 77$  К, измеренные на мостах шириной 12, 7 и 5 μm (соответственно, белые, черные и серые значки) в зависимости от толщины пленки сверхпроводника при последовательном осаждении YBCO на сапфировую подложку с подслоем epiCeO<sub>2</sub>.

Результаты измерения плотности критического тока джозефсоновских переходов различной длины и контрольных мостиков, расположенных вне бикристаллической границы

№ напыления	Объект	Толщина YBCO $d$ , nm	Ширина моста (длина перехода) $w$ , $\mu\text{m}$	Критический ток $I_c$ , mA	Плотность критического тока $J_c$ , A/cm <sup>2</sup>	Критическая температура $T_c$ , K
1	Контрольный мост	150	12	69	$3.8 \cdot 10^6$	88.3
	Джозефсоновские контакты		52	3.9	$5.0 \cdot 10^4$	
			12	1.0	$5.5 \cdot 10^4$	
			9	1.0	$7.4 \cdot 10^4$	
			5	0.85	$11 \cdot 10^4$	
2	Контрольный мост	300	12	110	$2.9 \cdot 10^6$	88.7
	Джозефсоновские контакты		52	10	$6.5 \cdot 10^4$	
			12	3.7	$10 \cdot 10^4$	
			9	2.7	$10 \cdot 10^4$	
			5	2.0	$13 \cdot 10^4$	

азотом без экранирования внешнего магнитного поля. Поэтому в таблице приведено максимальное измеренное значение величины критического тока, полученное при варьировании положения подложки. Плотность критического тока в узких мостах выше, чем в широких для обеих толщин пленки, что связано с неоднородностью протекания тока в широких контактах. Можно отметить, что при удвоении толщины пленки плотность критического тока джозефсоновских переходов увеличилась. Представленные в таблице значения плотности критического тока через бикристаллическую границу соответствуют лучшим образцам, изготовленным традиционными методами [6,7].

Таким образом, в настоящей работе впервые показано, что метод задающей маски дает уникальную возможность, один раз сформировав на единственной подложке топологию исследуемой структуры, последовательно проводить циклы осаждения YBCO и таким образом изучать зависимость ее параметров от толщины пленки сверхпроводника в ситуации, когда местоположение и топология элементов этой структуры остаются фиксированными.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Института физики микроструктур РАН ГЗ 0035-2019-0024-С-01. В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Malnou M., Feuillet-Palma C., Ulysse C., Faini G., Febvre P., Sirena M., Olanier L., Lesueur J., Bergeal N. // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 116. N 7. P. 074505 (1–11). DOI: 10.1063/1.4892940
- [2] Pedarnig J.D., Bodea M.A., Steiger B., Markowitsch W., Lang W. // Phys. Proc. 2012. Vol. 36. P. 508–513. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.06.075
- [3] Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е., Ревин Л.С., Панкратов А.Л. Патент РФ на полезную модель № 188983. Б.И. 2019. № 13. [http://www.1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=188983&TypeFile=html](http://www.1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=188983&TypeFile=html)
- [4] Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е., Скороходов Е.В., Юнин П.А. // ФТТ. 2018. Т. 60. Вып. 11. С. 2100–2104. DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46646.29NN [Masterov D.V., Pavlov S.A., Parafin A. E., Skorokhodov E.V., Yunin P.A. // Phys. Solid State. 2018. Vol. 60. N 11. P. 2139–2144. DOI: 10.1134/S1063783418110215]
- [5] Дроздов Ю.Н., Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е., Юнин П.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 109–116. [Drozdov Yu.N., Masterov D.V., Pavlov S.A., Parafin A.E., Yunin P.A. // Tech. Phys. 2015. Vol. 60. N 11. P. 1682–1688. DOI: 10.1134/S1063784215110080]
- [6] Hilgenkamp H., Mannhart J. // Rev. Mod. Phys. 2002. Vol. 74. N 2. P. 485–549. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.485
- [7] Ivanov Z.G., Nilsson P.A., Winkler D., Alarco J.A., Claeson T., Stepanov E.A., Tzalenchuk A.Ya. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 59. P. 3030–3032. DOI: 10.1063/1.105783