

02,13

Исследование параметров сверхпроводящих и изолирующих элементов структур, получаемых на пленках YBCO методом задающей маски, при уменьшении их размеров

© Д.В. Мастеров., С.А. Павлов, А.Е. Парафин, Е.В. Скороходов

Институт физики микроструктур РАН, ФИЦ Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

E-mail: parafin@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Настоящая работа посвящена исследованию электрофизических параметров сверхпроводящих и изолирующих элементов планарных структур, изготавливаемых методом задающей маски на основе высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$, при уменьшении размеров элементов до значений порядка одного микрометра. С использованием стандартной фотолитографии методом задающей маски получены структуры со сверхпроводящими элементами шириной $2 \mu\text{m}$ и параметрами, достаточными для приборных применений.

Ключевые слова: нано- и микроструктуры, дефекты, рост в локальных областях, YBCO.

DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51241.10H

1. Введение

Формирование топологии схемы является критически важным этапом при изготовлении планарных структур на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ (YBCO), который существенно влияет на их конечные параметры. Это связано с высокой чувствительностью свойств пленок YBCO к внешним воздействиям. Топологию структур на основе пленок YBCO формируют различными способами: ионным травлением [1,2], ионной имплантацией [3,4], химическим травлением. Общим во всех указанных методах, несмотря на большое количество модификаций, является то, что сначала на всю поверхность подложки осаждается сверхпроводящая пленка YBCO, а затем формируется топология сверхпроводящего устройства. Авторами настоящей статьи предложен и развивается метод задающей маски (ЗМ) для изготовления планарных структур на основе пленок YBCO. По сравнению с другими методами получения YBCO-структур данный метод имеет ряд преимуществ [5–8]. Так как рост пленки является завершающим этапом формирования всей структуры, то при формировании структур исключаются операции травления YBCO или ионной имплантации, поэтому негативное воздействие на пленку YBCO в данном случае минимально. Имеется возможность проводить многократные циклы осаждения YBCO, последовательно увеличивая толщину сверхпроводящих элементов, положение и топологию которых фиксированы. Осаждение YBCO происходит в локальные области — окна задающей маски, и узкие элементы структуры могут быть полностью свободны от дефектов, таких как преципитаты CuO и др. В настоящей работе проводится дальнейшее исследование возможностей технологии

на основе ЗМ для создания топологии сверхпроводящих схем. Основная цель работы — определение минимальных размеров сверхпроводящих элементов и изолирующих областей, воспроизводимо получаемых методом ЗМ.

2. Исследование возможности получения методом ЗМ сверхпроводящих YBCO-мостиков микронных размеров

Тестовые структуры на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника YBCO изготавливались на подложках двух типов. В первом случае использовались сапфировые подложки без подслоя. В этом случае применялась т.н. двухслойная ЗМ: на подложку с маской из тонкого, толщиной около 100 nm , аморфного оксида церия, осажденного без нагрева подложки (coldCeO₂), при температуре эпитаксиального роста осаждается оксид церия толщиной 50 nm . В результате подслоя эпитаксиального оксида церия (epiCeO₂) образуется только в окнах рисунка coldCeO₂, в которых далее формируются сверхпроводящие элементы, в областях вне окон с подслоем epiCeO₂ формируются изолирующие области.

Во втором случае использовались сапфировые подложки с предварительно нанесенным подслоем эпитаксиального оксида церия (ALO + epiCeO₂). В отличие от чистого сапфира, такие подложки сходны с другими стандартными подложками для структур на основе YBCO. В этом случае применялась т.н. однослойная ЗМ, состоящая из толстого, около $1.5 \mu\text{m}$, слоя аморфного оксида церия coldCeO₂ [9].

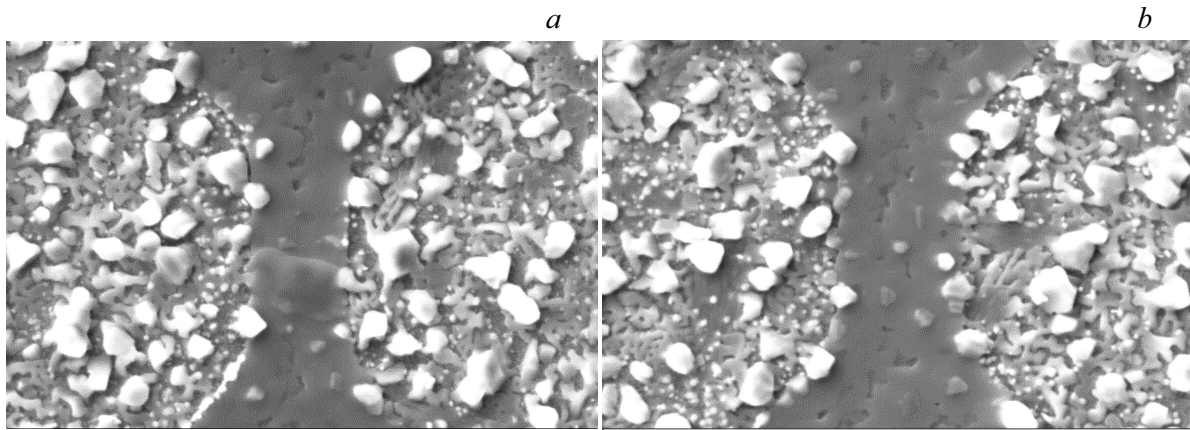


Рис. 1. Изображение во вторичных электронах мостиков, изготовленных методом двухслойной задающей маски (образец № МР 3.347). Ширина мостиков на фотографии: (а) $1.88\ \mu\text{m}$, (б) $2.4\ \mu\text{m}$; увеличение 80 000. Дефект на более узком мостике — результат пробоя при измерении электрических параметров.

В обоих случаях формирование маски из аморфного оксида церия проводилось методом взрывной фотолитографии (lift-off). Для проведения фотолитографии использовалась установка совмещения и экспонирования МJB4 с оптикой UV400 ($\lambda = 350\text{--}400\ \text{nm}$). Уход размеров относительно фотошаблона составил $0.3\text{--}0.5\ \mu\text{m}$ в одну сторону. В нашем случае уход размеров происходит уже на фоторезисте на этапе получения рисунка для формирования ЗМ и связан с особенностью формирования рисунка на прозрачных подложках.

После формирования ЗМ на подложку осаждается слой YBCO при температуре эпитаксиального роста. В результате в окнах маски, т.е. на эпитаксиальном CeO_2 , формируются сверхпроводящие элементы заданного рисунка, а между ними — разделительные области.

В таблице представлены параметры тестовых сверхпроводящих мостиков различной ширины — от 2.0 до $10.5\ \mu\text{m}$, изготовленных методом двухслойной ЗМ. Измерения ширины мостиков проводились на оптическом микроскопе, погрешность измерения составляла не более $0.2\ \mu\text{m}$. Электрофизические измерения выполнялись

Параметры тестовых сверхпроводящих элементов микронной ширины (двухслойная ЗМ, образец № МР 3.347, толщина пленки YBCO $110\ \text{nm}$): w — измеренная ширина мостика, T_c — температура, при которой напряжение на мостике обращается в ноль, I_c — критический ток сверхпроводящего мостика при температуре $T = 77\ \text{K}$, J_c — плотность критического тока мостика при $T = 77\ \text{K}$, γ — отношение измеренных сопротивлений мостиков при $T = 300\ \text{K}$ и $T = 100\ \text{K}$

$w, \mu\text{m}$	T_c, K	I_c, mA	$J_c, \text{MA/cm}^2$	γ
2.0	87.6	7.3	3.3	2.92
2.7	87.7	8.6	2.9	2.92
4.8	88.3	14.7	2.8	2.92
10.5	88.9	38	3.3	2.93

четырёхзондовым методом в жидком азоте. Характерные фотографии мостиков, полученные на электронном микроскопе, приведены на рис. 1. Изображения поверхности структур были получены на электронных микроскопах SUPRA 50VP и EVO-10.

Параметры мостиков, изготовленных с использованием однослойной маски, в пределах ошибки измерений совпадают с представленными в таблице.

Как видно из таблицы, критическая температура для всех мостиков составляет $\sim 88\ \text{K}$, плотность критического тока — приблизительно $3\ \text{MA/cm}^2$ при $T = 77\ \text{K}$. Разброс плотности критического тока для тестовых мостиков шириной от 2 до $10\ \mu\text{m}$ составляет величину меньше чем 10% , а разброс температуры сверхпроводящего перехода — меньше $0.5\ \text{K}$. Это свидетельствует о высоком качестве сверхпроводящей области и воспроизводимости характеристик структур микронных размеров, получаемых методом ЗМ, при использовании стандартной оптической фотолитографии.

3. Изолирующие области в YBCO-структурах, получаемые методом однослойной задающей маски

В работе [9] нами была проведена оценка изолирующих свойств разделительных областей, полученных методом задающей маски, по измерениям сопротивления между соседними чипами сверхпроводящей структуры. Расстояние между чипами составляло $200\ \mu\text{m}$. В настоящей работе мы рассмотрели возможность формирования методом ЗМ изолирующих разделительных областей микронных размеров. Для этого были изготовлены структуры со сверхпроводящими мостиками, пересеченными изолирующими полосками с шириной вплоть до $1\ \mu\text{m}$.

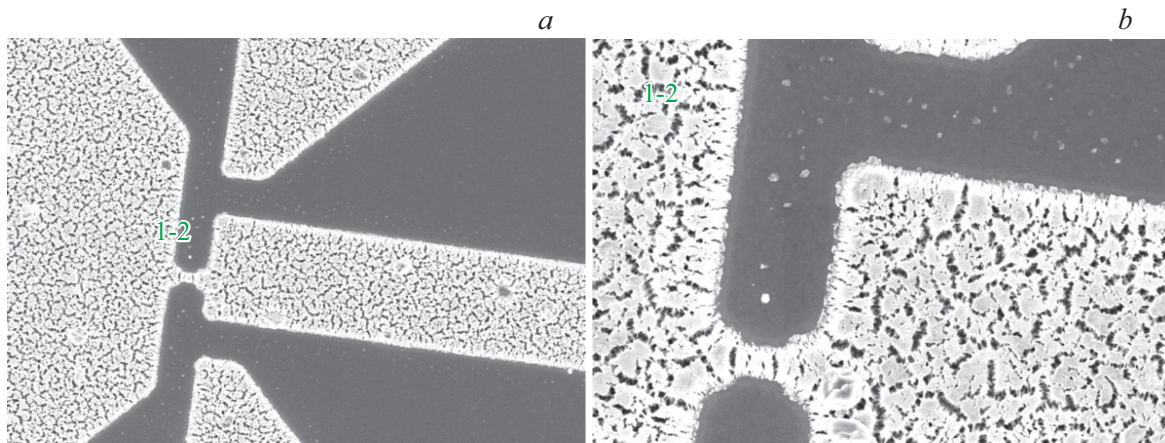


Рис. 2. Изображение во вторичных электронах изолирующей области (однослойная маска, образец № МР 3.267, чип № 1-2). Ширина мостика $4\ \mu\text{m}$, ширина изолирующей полоски, пересекающей мостик, $1.4\ \mu\text{m}$; (а) увеличение 5 000, (б) увеличение 15 500.

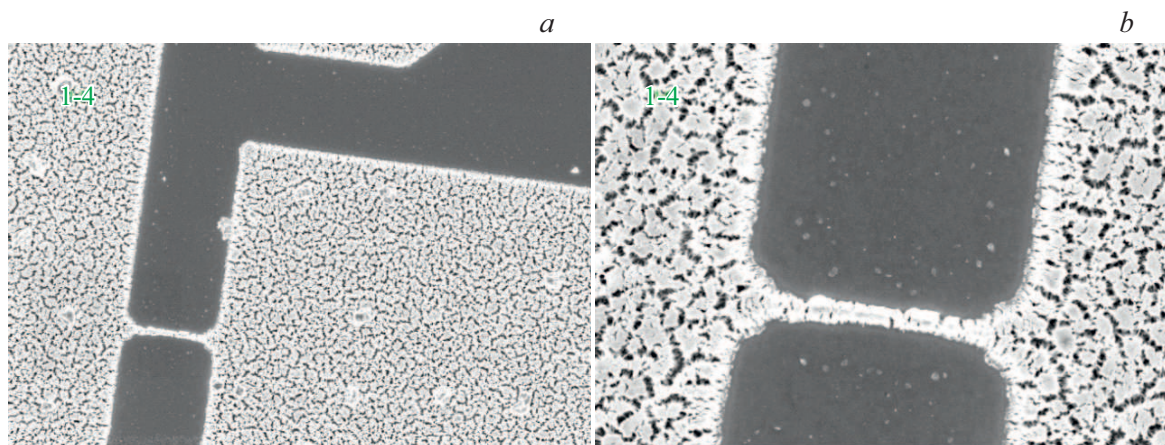


Рис. 3. Изображение во вторичных электронах изолирующей области (однослойная маска, образец № МР 3.267, чип № 1-4). Ширина мостика $10\ \mu\text{m}$, ширина изолирующей полоски, пересекающей мостик, $1\ \mu\text{m}$; (а) увеличение 5 000, (б) увеличение 15 500.

Характерные изображения узкой изолирующей области (однослойная ЗМ), пересекающей мостик на образце № МР 3.267 (толщина YBCO $130\ \text{nm}$), полученные на электронном микроскопе, приведены на рис. 2 (чип № 1-2) и на рис. 3 (чип № 1-4).

Измеренное на чипе № 1-2 сопротивление между двумя частями сверхпроводящего мостика, разделенными изолирующей полоской составило при комнатной температуре величину $550\ \text{k}\Omega$, при температуре жидкого азота — $150\ \text{M}\Omega$ (предельная величина, доступная нашей измерительной системе). Так как измеренное сопротивление представляет собой параллельно включенные сопротивление изолирующей полоски, пересекающей мост, и сопротивление утечки по изолирующей области, окружающей чип, можно констатировать, что сопротивление изолирующей полоски выше измеренных значений сопротивления. Количество квадратов изолирующей области шириной $1.4\ \mu\text{m}$ на чипе № 1-2 оценим как 1 квадрат. В результате получим оценку сопротивления узкого участка изолирующей области не менее

чем $550\ \text{k}\Omega$ на квадрат при комнатной температуре и не менее чем $150\ \text{M}\Omega$ на квадрат при $T = 77\ \text{K}$.

Измеренное на чипе № 1-4 сопротивление между областями сверхпроводящего мостика, разделенными изолирующей полоской составило при комнатной температуре величину $250\ \text{k}\Omega$ и при температуре жидкого азота — $150\ \text{M}\Omega$. Количество квадратов изолирующей области шириной $1\ \mu\text{m}$ оценим (см. рис. 3), как $1/8$ квадрата. В результате получим оценку сопротивления узкого участка изолирующей области не менее чем $4\ \text{M}\Omega$ на квадрат при комнатной температуре и $1.2\ \text{G}\Omega$ на квадрат при $T = 77\ \text{K}$.

На основании изложенного можно констатировать, что сопротивление изолирующей области шириной вплоть до $1\ \mu\text{m}$, получаемой в структуре YBCO с использованием однослойной задающей маски из аморфного оксида церия толщиной $1.5\ \mu\text{m}$, составляет минимум $550\ \text{k}\Omega$ на квадрат при комнатной температуре и минимум $150\ \text{M}\Omega$ на квадрат при $T = 77\ \text{K}$.

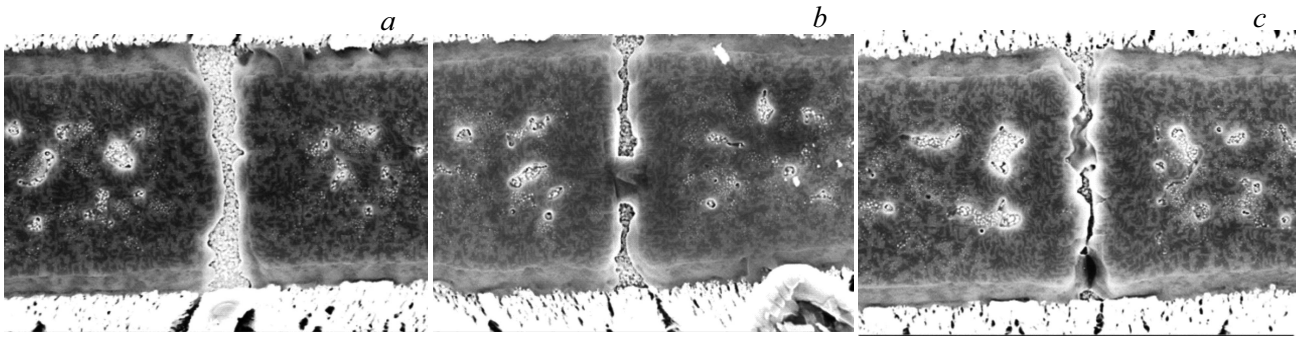


Рис. 4. Изображение во вторичных электронах изолирующей области на образце № МР 3.268 (двухслойная маска) с первым слоем аморфного оксида церия 100 нм (а), 30 нм (b), 10 нм (с). Ширина мостика 4 мкм, ширина изолирующей полоски менее 1 мкм. Увеличение 50 000.

4. Изолирующие области в YBCO-структурах, получаемые методом двухслойной задающей маски

Для определения характеристик изолирующей области, получаемой при использовании двухслойной задающей маски, была изготовлена структура № МР 3.268. Особенностью данной структуры является то, что для ее формирования использовались как двухслойная, так и однослойная задающие маски. Сначала методом двухслойной (с первым слоем coldCeO_2) задающей маски были сформированы узкие полоски шириной 1 мкм, в которых при напылении YBCO образуется исследуемая изолирующая область. Причем на одном образце на разных участках толщина слоя coldCeO_2 составила 10, 30 и 100 нм. Для формирования топологии моста использовалась однослойная маска coldCeO_2 толщиной 1.5 мкм. Далее на полученную структуру было проведено осаждение YBCO в режиме эпитаксиального роста толщиной сначала 130 нм, а затем еще 100 нм. После каждого осаждения YBCO проводились электрофизические измерения структуры.

Характерные фотографии узких изолирующих областей (двухслойная ЗМ) с разной толщиной первого слоя coldCeO_2 , пересекающих мостики шириной 4 мкм на образце № МР 3.268, полученные в электронном микроскопе, приведены на рис. 4.

При толщине слоя YBCO 130 нм на образце № МР 3.268 сопротивление мостиков, пересеченных изолирующей полоской, полученной с использованием двухслойной маски с первым слоем из аморфного оксида церия толщиной 100 нм, при комнатной температуре составило величину от 910 до 3.4 МΩ (корреляции с шириной мостика не обнаружено), при $T = 77$ К величину не менее чем 150 МΩ. Для толщины слоя аморфного оксида церия 30 нм сопротивление при комнатной температуре было от 120 до 290 Ω, а при $T = 77$ К на одном из мостиков появилась сверхпроводящая „закорotka“. При минимальной толщине аморфного оксида

церия — 10 нм — сопротивление мостиков при комнатной температуре составило 110–660 Ω, при $T = 77$ К сопротивление мостика шириной 7 мкм составило 4.4 Ω.

После допыления слоя YBCO на структуру № МР 3.268 его толщина составила 230 нм. При этом сопротивление всех пересеченных мостиков на образце при комнатной температуре уменьшилось. При $T = 77$ К и толщинах аморфного оксида церия 10 и 30 нм в мостиках появились сверхпроводящие „закоротки“, а при толщине аморфного оксида церия 100 нм сопротивление пересеченных мостиков в жидком азоте составило величину не менее чем 150 МΩ. Возникновение сверхпроводящих „закороток“ в мостике связано, возможно, со срастанием YBCO через изолирующую полоску, когда высота слоя YBCO превышает высоту двухслойной задающей маски (см. рис. 4, b).

С учетом того, что размер изолирующей области полученной на двухслойной задающей маске толщиной 100 нм составил 1–4 мкм, т.е. 1/4 квадрата, а её сопротивление при $T = 77$ К не менее 150 МΩ, можно констатировать, что сопротивление полученной изолирующей области составляет величину не менее чем 600 МΩ на квадрат.

Таким образом, в YBCO-структурах, полученных методом ЗМ с использованием однослойной маски из аморфного оксида церия толщиной 1.5 мкм или двухслойной маски с толщиной первого аморфного слоя 100 нм, сопротивление изолирующих областей микронных размеров составляет не менее чем 150 МΩ на квадрат при $T = 77$ К, что является достаточным для приборных применений таких структур, в частности, в схемах с большим числом элементов [10].

5. Заключение

Метод ЗМ позволяет с использованием стандартной фотолитографии уверенно изготавливать сверхпроводящие элементы на основе пленок YBCO с шириной полоска 2 мкм и электрофизическими параметрами, достаточными для приборных применений. При этом раз-

брос плотности критического тока тестовых мостиков шириной от 2 до $10\ \mu\text{m}$ не превышает 10%, а разброс температуры сверхпроводящего перехода — 0.5 К.

Сопротивление изолирующих областей микронных размеров, полученных методом задающей маски из аморфного оксида церия, составляет величину не менее чем $150\ \text{M}\Omega$ на квадрат при $T = 77\ \text{K}$ и является достаточным для приборных применений таких структур.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01006. В работе использовалось оборудование ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. P'ichev, L. Dörrer, F. Schmidl, V. Zakosarenko, P. Seidel, G. Hildebrandt. *Appl. Phys. Lett.* **68**, 708 (1996).
- [2] M.I. Faley, U. Poppe, K. Urban, V.Yu. Slobodchikov, Yu.V. Maslennikov, A. Gapelyuk, B. Sawitzki, A. Schirdewan. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 2406 (2002).
- [3] W. Lang, M. Marksteiner, M.A. Bodea, K. Siraj, J.D. Pedarnig, R. Kolarova, P. Bauer, K. Haselgrübler, C. Hasenfuss, I. Beinik, C. Teichert. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **272**, 300 (2012).
- [4] 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).
- [5] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин. *ПЖТФ* **42**, 11, 82 (2016).
- [6] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, Л.С. Ревин, А.Л. Панкратов. Патент РФ на полезную модель № 188983 (2019).
- [7] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, Е.В. Скороходов. *ФТТ* **62**, 9, 1398 (2020).
- [8] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин. *ЖТФ* **90**, 10, 1677 (2020).
- [9] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, Е.В. Скороходов, П.А. Юнин. *ФТТ* **60**, 11, 2100 (2018).
- [10] A.M. Klushin, M. He, M.Yu. Levitchev, V.V. Kurin, N. Klein. *J. Phys. Conf. Ser.* **97**, 012268 (2008).

Редактор Е.Ю. Флегонтова