

02,13

Новый подход к формированию топологии планарных структур на основе высокотемпературного сверхпроводника YBCO

© Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин[¶]

Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, Россия

[¶] E-mail: parafin@ipmras.ru

Представлена новая технология формирования планарных сверхпроводниковых структур на основе пленок YBCO с металлическими контактами, полностью исключая процессы травления. Нужная топология сверхпроводящих элементов из пленки YBCO создается предложенным методом „задающей маски“. Омические контакты к сверхпроводящей структуре изготавливаются методом взрывной фотолитографии. Для исследования возможностей данной технологии были проведены измерения сверхпроводящих мостиков шириной 3, 10 и 50 μm и тестовых структур для измерения контактного сопротивления.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 16-19-10478). В работе использовано оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“.

DOI: 10.21883/FTT.2017.11.45046.05k

1. Введение

При традиционном подходе к изготовлению планарных структур на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника $\text{YB}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) последовательность основных операций следующая. На подложку напыляется YBCO пленка, затем, для дальнейшего формирования омических контактов [1–3], на нее *in situ* или в другой установке, сразу после напыления YBCO, осаждается металлическая пленка. После напыления этих слоев формируется требуемая топология структуры, для чего используется ионное или химическое травление [3–5]. Для получения изолирующих областей, разделяющих сверхпроводящие элементы, может применяться также ионная имплантация [4,6,7]. Формирование топологии является критически важным этапом при изготовлении планарных структур на основе YBCO пленок, существенно влияющим на конечные параметры прибора, что обусловлено высокой чувствительностью свойств YBCO пленок к внешним воздействиям.

При химическом травлении YBCO возникает значительный и плохо контролируемый уход размеров формируемой структуры относительно фоторезистивной маски („подтрав“), связанный с наличием медленно (по сравнению с YBCO) растворимых в травителе вторичных фаз. Кроме того, во время травления край пленки YBCO повреждается на большую, порядка 1 μm , глубину [5]. Сложности, возникающие при ионном травлении YBCO, связаны, прежде всего, с низкой скоростью травления материала пленки, что требует повышения стойкости защитной маски. Кроме того, образец во время травления нагревается и его необходимо охлаждать, чтобы не произошла деградация YBCO пленки. Следует отметить, что поскольку коэффициент диффузии кислорода в пленке YBCO в направлении $a-b$ во много раз больше, чем в направлении оси c , то структуры, полученные травлением, и, следовательно, с открытыми в направлении $a-b$ слоя-

ми YBCO, более подвержены деградации. При создании изолирующих областей методом ионной имплантации возникают сложности с удалением фоторезистивной маски, что связано с задубливанием фоторезиста при воздействии высокоэнергетичных ионов.

При химическом травлении металлических слоев к повреждениям поверхности и края YBCO из-за контакта с травителем добавляется также значительный и плохо контролируемый подтрав под фоторезистивную маску, что связано с низкой адгезией металла к пленке. Удаление металла с поверхности YBCO ионным травлением может приводить к деградации свойств структуры из-за радиационного воздействия ионов на пленку. Травление металла может оказывать повышенное негативное влияние в случаях, когда металлический слой удаляется с YBCO пленок толщиной несколько десятков нанометров, например, при изготовлении болометров, а также в случае структур содержащих слабые связи — джозефсоновские контакты. Для формирования контактов к YBCO пленкам могут быть использованы только благородные металлы. Применение других металлов приводит к тому, что металл взаимодействует с YBCO, „вытягивая“ из пленки кислород. В результате сверхпроводник под слоем металла деградирует, контакт становится нелинейным и имеет большое сопротивление. Обычно для контактов к YBCO используется золото, которое не взаимодействует с пленкой химически и не диффундирует в нее [3]. Серебро так же не взаимодействует химически с YBCO, и, в отличие от золота, может диффундировать в пленку.

С целью получения высоких характеристик получаемых структур за счет минимизации негативных воздействий на пленку YBCO в настоящей работе исследовалась возможность формирования топологии сверхпроводящих элементов и контактов к ним без использования операций травления или ионной имплантации.

Исследования проводились на пленках, выращенных на подложках из сапфира. Топология сверхпроводниковых структур формировалась предложенным нами методом „задающей маски“ [8]. Низкоомные омические контакты со сложным рисунком и размерами в единицы μm формировались методом взрывной фотолитографии. В настоящей работе в качестве материала для изготовления контактов использовалось серебро.

2. Технология изготовления и характеристики структур

В настоящей работе последовательность формирования топологии сверхпроводниковых структур предложенным методом задающей маски была следующей:

1. На сапфировой (Al_2O_3) подложке (использовался r -срез) формируется маска из фоторезиста, после чего при комнатной температуре на подложку напыляется слой аморфного оксида церия (coldCeO_2).

2. Фоторезист вместе с напыленной на него пленкой coldCeO_2 удаляется с подложки в ацетоне в ультразвуковой ванне. Таким образом, на подложке образуется „задающая маска“ из аморфной пленки оксида церия, в которой вскрыты окна для последующего формирования в них сверхпроводящих элементов.

3. На подложку осаждается оксид церия при температуре $T_d = 900^\circ\text{C}$. В результате в окнах маски формируется подслоя эпитаксиального оксида церия (epiCeO_2), а в областях, где на подложке осталась пленка coldCeO_2 — нетекстурированный поликристалл CeO_2 . Для создания задающей маски использовался слой coldCeO_2 толщиной 100 нм. Толщина подслоя epiCeO_2 в окнах маски составляла 50 нм.

4. В завершении на подложку магнетронным распылением осаждается YBCO при температуре $T_d = 800^\circ\text{C}$. В результате, в окнах маски, на сформированной подложке Al_2O_3 — epiCeO_2 , получают сверхпроводящие элементы заданного рисунка, а между ними — изолирующие области.

Оксид церия наносился распылением керамической мишени состава CeO_2 излучением эксимерного лазера LPX 200 ($\lambda = 248\text{ nm}$) в атмосфере кислорода при давлении $P = 20\text{ Pa}$. Пленки YBCO осаждались методом магнетронного напыления в стандартных условиях для эпитаксиального роста YBCO [9] при температуре подложки $T_d = 800$ – 850°C и давлении газовой смеси $\text{Ar}(50\%)/\text{O}_2$ $P = 75\text{ Pa}$. Более подробно этот этап создания сверхпроводящей структуры методом задающей маски рассмотрен в работе [8]. В работе [10] таким методом были изготовлены мостики с джозефсоновскими контактами длиной 6, 50, 100 и 150 μm .

Для завершения изготовления сверхпроводящей структуры необходимо сформировать металлические омические контакты с низким контактным сопротивлением. В наших работах [8,10] омические контакты к мостикам формировались термическим напылением

серебра через маску сразу после напыления пленки YBCO. Возможность напыления контактов через маску на реальные структуры сильно ограничена, так как требуемые размеры контактов малы. В связи с этим, в настоящей работе рассмотрена возможность формирования низкоомных омических контактов со сложным рисунком и размерами в единицы μm методом взрывной фотолитографии.

Как известно, при взрывной фотолитографии после нанесения на подложку фоторезиста и формирования в его слое нужного рисунка, подложка запыляется металлом, затем фоторезист удаляется и уносит слой металла, находящийся на его поверхности. Металл, осажженный в окна фоторезистивной маски, остается на поверхности пленки YBCO. Нанесение фоторезиста на пленку и его последующее удаление в ацетоне не оказывают заметного воздействия на характеристики пленки. Контактное сопротивление сразу после проведения взрывной фотолитографии очень велико, так как в окнах под контакты YBCO пленка подвергается воздействию проявителя, и, кроме того возможно загрязнение поверхности пленки остатками фоторезиста. Нами был определен режим вжигания контактов, позволяющий получить низкое контактное сопротивление, а также обеспечить сплошную структуру пленки серебра и ее хорошую адгезию к пленке YBCO при сохранении высоких параметров пленки. Вжигание контактов проводилось при температуре $T = 500^\circ\text{C}$ в атмосфере кислорода в течение пяти минут. Такой отжиг не ухудшает параметров YBCO пленки, и более того, часто такой режим отжига используется на завершающей стадии роста YBCO пленки для насыщения ее кислородом.

По описанному выше технологическому процессу был изготовлен образец, включающий в себя сверхпроводящие болометры терагерцового диапазона, интегрированные со спиральной металлизированной антенной, тестовую структуру для измерения контактного сопротивления и сверхпроводящие мостики шириной 3, 10 и 50 μm для определения параметров сверхпроводящих элементов. Толщина YBCO составляла 80 нм, толщина пленки серебра — 200 нм.

На рис. 1 приведена фотография центральной части сверхпроводящего болометра терагерцового диапазона, интегрированного со спиральной металлизированной антенной. Показаны три области, формирующие структуру болометра, изготовленного методом задающей маски. Область I — активный элемент болометра, представляющий собой мостик из сверхпроводящей пленки YBCO, его ширина 3 μm , длина 6 μm . Область II — спиральная антенна (она же выполняет функцию омического контакта). В этой области сверхпроводящая пленка YBCO покрыта пленкой серебра. Минимальная ширина полоски антенны — 6 μm . Видно, что пленка серебра сплошная. Область III — изолирующая область. Неровность края рисунка YBCO и серебра составляет менее 0.25 μm .

На рис. 2 показан элемент тестовой структуры для измерения контактного сопротивления четырехзондовым

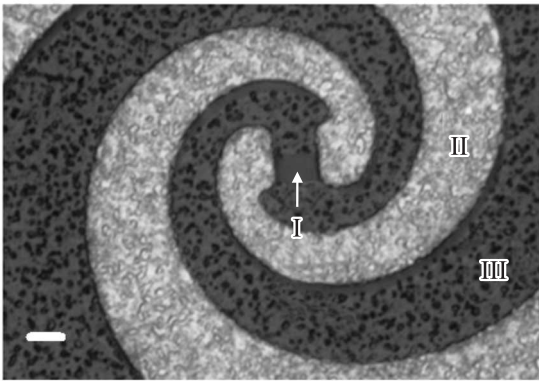


Рис. 1. Фотография центральной части структуры сверхпроводящего болометра терагерцового диапазона, интегрированного со спиральной металлизированной антенной. Метка — 5 μm .

методом. Токовые контакты на рис. 2 обозначены как „I“, потенциальные — как „U“. Тестовая структура содержит три элемента с различной площадью контактной области металл–сверхпроводник. Длина контактов L вдоль протекания тока: 50, 20 и 10 μm . Ширина всех контактов $w = 50 \mu\text{m}$.

Вольт-амперные характеристики тестовой структуры для измерения контактного сопротивления линейны, и их наклон определяет величину контактного сопротивления. Полученные значения контактных сопротивлений для трех элементов структуры с различной длиной контакта L приведены в таблице. Из таблицы видно, что измеренное сопротивление контакта R_c обратно пропорционально его площади.

Плотность критического тока, измеренная на мостиках шириной 3, 10 и 50 μm , независимо от ширины мостика составила $J_c = 4.0 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ при температуре $T = 77 \text{ K}$, что свидетельствует о том, что край мостиков не поврежден. Критическая температура T_c была равна 88 K.

3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим эквивалентную схему исследуемого контакта YBCO–серебро, приведенного на рис. 2. В предположении, что плотность тока в сверхпроводнике и

Полученные значения контактных сопротивлений для изготовленных структур различной длины L

Размер контактной площадки $w \times L, \mu\text{m}$	Измеренное сопротивление контакта $R_c, \text{m}\Omega$	Удельное контактное сопротивление $r_c, \Omega \cdot \text{cm}^2$
50 \times 50	0.87	$2.17 \cdot 10^{-8}$
50 \times 20	1.96	$1.96 \cdot 10^{-8}$
50 \times 10	3.91	$1.96 \cdot 10^{-8}$

металле поперек протекания электрического тока однородна, эквивалентную схему контакта можно представить в виде, показанном на рис. 3. Эквивалентная схема описывает контакт сверхпроводник–металл как распределенную структуру, в которой происходит протекание тока из сверхпроводящего электрода контакта в металлический электрод. Здесь r_{\square} — сопротивление пленки металла на квадрат, r_c — удельное контактное сопротивление между металлом и сверхпроводником, w — ширина контакта, L — длина контакта. $U(x)$ и $I(x)$ — распределение вдоль металлического электрода контакта (по оси „ x “ на эквивалентной схеме) напряжения и силы тока в контакте. Элементы, показанные на эквивалентной схеме, представляют собой: $r_{\square} dx/w$ — сопротивление пленки металла шириной w и длиной dx , $r_c/(w dx)$ — контактное сопротивление сверхпроводник–металл через площадь $w \times dx$.

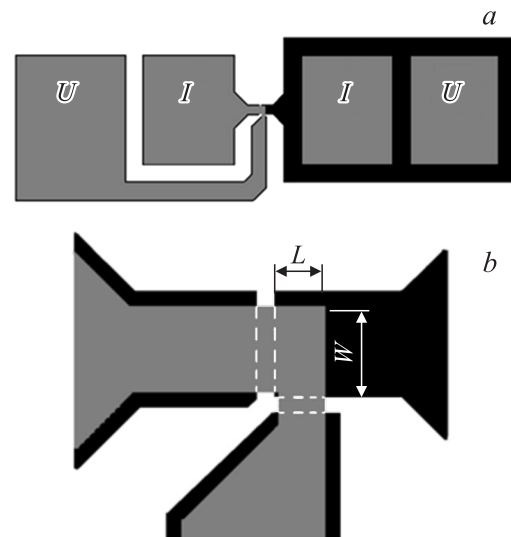


Рис. 2. Элемент тестовой структуры для определения величины контактного сопротивления серебро — YBCO. (a) — общий вид тестового элемента. Структура включает в себя область исследуемого омического контакта (расположена в центре) и четыре контактные площадки. Черное поле на рисунке — пленка YBCO, серое — серебро. (b) — область исследуемого омического контакта (увеличена). L и w — размеры области контакта серебро — YBCO. Белый пунктир показывает границы пленки YBCO.

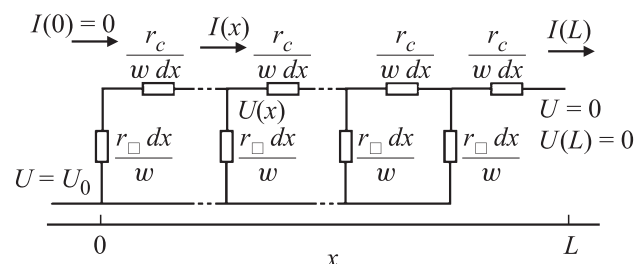


Рис. 3. Эквивалентная схема контакта сверхпроводник–металл.

С учетом того, что $I(0) = 0$ (ток в металлическом электроде при $x = 0$ равен нулю) и $U(L) = 0$ (напряжение при $x = L$ равно нулю) распределение $U(x)$ и $I(x)$ вдоль металлического электрода контакта по оси „ x “ выражается следующими формулами:

$$U(x) = U_0 \left(1 - \frac{\operatorname{ch} \frac{x}{\lambda}}{\operatorname{ch} \frac{L}{\lambda}} \right), \quad (1)$$

$$I(x) = \frac{U_0}{r_{\square}} \frac{w}{\lambda} \frac{\operatorname{sh} \frac{x}{\lambda}}{\operatorname{ch} \frac{L}{\lambda}}, \quad (2)$$

где $\lambda = \sqrt{r_c/r_{\square}}$ — характерная длина растекания тока в контакте. Полный ток через контакт равен

$$I_0 = \frac{U_0}{r_{\square}} \frac{w}{\lambda} \operatorname{th} \frac{L}{\lambda}. \quad (3)$$

Следовательно, измеряемое сопротивление контакта R_C , которое есть отношение измеряемого напряжения на контакте к полному току, равно

$$R_C = r_{\square} \frac{\lambda}{w} \operatorname{cth} \frac{L}{\lambda}. \quad (4)$$

Распределение тока в контакте определяется соотношением длины контакта L и длины растекания λ . В случае длинного контакта, когда $L > \lambda$, распределение тока неоднородно. При коротких, по сравнению с λ , длинах контакта L выражение (4) переходит в

$$R_C = \frac{r_c}{wL}. \quad (5)$$

Отсюда, зная площадь контакта wL , можно вычислить величину удельного контактного сопротивления между металлом и сверхпроводником

$$r_c = R_C \times wL. \quad (6)$$

В этом случае величина измеряемого контактного сопротивления R_C будет обратно пропорциональна площади контакта, что и демонстрируют результаты, приведенные в таблице. Величина удельного контактного сопротивления равна $2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Это величина соответствует лучшим значениям контактного сопротивления, получаемым при напылении металла на пленку YBCO *in situ* [2].

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что взрывная фотолитография в сочетании с отжигом структур дает возможность получать металлические контакты к пленке YBCO размерами в единицы μm и низким удельным контактным сопротивлением: $2 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Такие результаты, совместно с применением метода задающей маски, позволяют говорить о создании новой технологии формирования планарных YBCO структур с параметрами, соответствующими современному передовому уровню, без использования процессов травления.

Список литературы

- [1] Q.Y. Ma, M.T. Schmidt, E.S. Yang, Siu-Wai Chan, D. Bhattacharya, J.P. Zheng, H.S. Kwok. *J. Appl. Phys.* **71**, 4082, (1992).
- [2] J.W. Ekin, S.E. Russek, C.C. Clickner, B. Jeanneret. *Appl. Phys. Lett.* **62**, 369, (1993).
- [3] Ф.В. Комиссинский, Г.А. Овсянников, З.Г. Иванов. *ФТТ* **43**, 769, (2001).
- [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] Е.А. Vopilkin, N.V. Vostokov, А.Е. Parafin. *Phys. Low-Dim. Struct.* *5/7*, 177 (2002).
- [6] G.J. Clark, F.K. LeGoues, A.D. Marwick, R.S. Laibowitz, R. Koch. *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1462 (1987).
- [7] В.К. Васильев, Д.С. Королев, С.А. Королев, Д.В. Мастеров, А.Н. Михайлов, А.И. Охапкин, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин, Е.В. Скороходов, Д.И. Тетельбаум. *Поверхность* **4**, 80 (2016).
- [8] Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин. *Письма в ЖТФ* **42**, 82 (2016).
- [9] Ю.Н. Дроздов, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин, П.А. Юнин. *ЖТФ* **85**, 109 (2015).
- [10] D.V. Masterov, А.Е. Parafin, L.S. Revin, A.V. Chiginev, E.V. Skorokhodov, P.A. Yunin, A.L. Pankratov. *SUST* **30**, 025007 (2017).