

05.5;06.5

Исследование планарных структур, полученных на модифицированных подложках Al_2O_3 , определяющих топологию сверхпроводящих элементов в процессе осаждения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$

© Д.В. Мастеров¹, С.А. Павлов¹, А.Е. Парафин^{1,2}, П.А. Юнин^{1,2}¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

E-mail: masterov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 22 октября 2015 г.

Исследованы структурные и электрофизические свойства планарных сверхпроводящих структур на основе эпитаксиальных пленок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ (YBCO), полученных посредством предварительной модификации поверхности подложки. На подложках формировалась специальная „задающая“ маска, так что при стандартном напылении пленки YBCO на такую подложку в модифицированных областях рос слой изолятора, а в немодифицированных — сверхпроводящая пленка. В результате формировалась заданная топология планарной сверхпроводящей структуры, причем напыление YBCO являлось завершающим этапом этого процесса. Таким методом были изготовлены мостики YBCO шириной 4, 10 и 50 μm на пленках различной толщины, а также планарная катушка индуктивности. Температура перехода мостиков в сверхпроводящее состояние составила около 90 К, плотность критического тока — до 3 MA/cm^2 при температуре 77 К. Добротность планарной катушки индуктивности на частоте 85 МГц составила 53 000 при температуре 77 К.

Формирование топологии 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 обусловлено очень высокой чувствительностью свойств пленок YBCO к внешним воздействиям. При традиционном методе получения структур на основе пленок YBCO в готовой пленке химическим или ионным травлением [1,2], или же ионной имплантацией создаются изолирующие области [3–5],

разделяющие сверхпроводящие элементы. В настоящей работе был использован альтернативный метод формирования топологии, в котором напыление пленки YBCO является завершающим этапом изготовления структуры. В данном методе поверхность подложки, пригодной для эпитаксиального роста пленок YBCO, модифицируется путем формирования на ней специальной „задающей“ маски, которая определяет топологию создаваемой структуры непосредственно в процессе роста пленки YBCO. В окнах маски, где открыта исходная поверхность подложки, во время напыления YBCO формируются сверхпроводящие элементы, а в других частях подложки, покрытой маскирующей пленкой, — изолирующие области. Важно отметить, что при формировании топологии рисунка таким способом края сверхпроводящих элементов не подвергаются деградирующему воздействию, как это происходит при травлении или ионной имплантации. Таким образом, цель данной работы состояла в исследовании возможностей метода задающей маски для формирования из пленок YBCO планарных структур с заданной топологией.

В качестве материала задающей маски в работе была использована аморфная пленка оксида церия CeO_2 . Порядок изготовления структуры следующий. На сапфировой подложке формировалась маска из фоторезиста, после чего при комнатной температуре на подложку напылялся оксид церия. Затем фоторезист вместе с напыленной на него пленкой оксида церия удалялся с подложки в ацетоне в ультразвуковой ванне. Таким образом, на подложке создавалась маска из аморфной пленки оксида церия, в которой вскрыты окна для последующего формирования в них сверхпроводящих элементов. После изготовления задающей маски на подложку осаждался оксид церия CeO_2 при температуре $T_d = 900^\circ\text{C}$, и в завершении выращивалась пленка YBCO при температуре $T_d = 800^\circ\text{C}$. В результате в окнах, на подслое эпитаксиального оксида церия формировались сверхпроводящие элементы заданного рисунка, а между ними, там где подложка была покрыта пленкой аморфного оксида церия, — диэлектрические 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 [6] при температуре подложки $T_d = 800\text{--}850^\circ\text{C}$ и давлении газовой смеси $\text{Ar}(50\%)/\text{O}_2$ $P = 75\text{ Pa}$.

Исследование структуры и фазового состава сверхпроводящей и изолирующей областей, сформированных описанным методом, было проведено методом рентгеновской дифрактометрии. Рентгеноструктурный анализ был выполнен на контрольных образцах, результаты приведены на рис. 1. На рис. 1, *a* показана рентгенограмма образца со структурой $\text{YBCO}/\text{CeO}_2/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(10-12)$, аналогичной структуре сверхпроводящих элементов, формируемых в окнах задающей маски. На рис. 1, *b* приведена рентгенограмма образца, имеющего такую же структуру, которая формируется в области, маскированной пленкой аморфного оксида церия.

Дифрактограммы получены $2\theta/\omega$ -сканированием с отстройкой по углу ω от слишком интенсивного пика подложки. На рис. 1, *a* видны характерные пики эпитаксиальных фаз CeO_2 и YBCO . Пики подложки Al_2O_3 не видны из-за отстройки по ω . Характерные ширины кривых качания отражений $\text{CeO}_2(002)$ и $\text{YBCO}(005)$ составляют 0.41° и 0.42° соответственно для толщин пленок 50 nm CeO_2 и 80 nm YBCO . Пиков дополнительных фаз помимо оксида церия и YBCO не наблюдается. На дифрактограмме, приведенной на рис. 1, *b*, кроме пиков подложки и ориентированной фазы YBCO наблюдается множество дополнительных пиков, которые идентифицируются как поликристаллические соединения $\text{Ce}-\text{Y}-\text{Ba}-\text{O}$ с различной стехиометрией. Высокий уровень фона и наличие слабого широкого пика в области $20-30^\circ$ по 2θ могут свидетельствовать также о присутствии в образце аморфизованных фаз. Ширина пика на кривой качания для отражения $\text{YBCO}(005)$ имеет величину более 10° , что свидетельствует об очень слабом текстурировании фазы YBCO без формирования эпитаксиальной пленки.

Методом задающей маски были изготовлены образцы с толщинами пленки YBCO 80 , 200 и 400 nm . Топология образцов представляла собой мостики шириной 4 , 10 и $50\text{ }\mu\text{m}$ с контактными площадками для четырехзондовых измерений. Контакты изготавливались термическим напылением серебра через металлическую маску. На рис. 2 представлены фотографии центральной части полученных структур с мостиками шириной $4\text{ }\mu\text{m}$. Фотографии сделаны на оптическом микроскопе в отраженном свете. Пленка YBCO , выращенная в окнах задающей маски, гладкая, ее шероховатость порядка 3 nm при толщине 400 nm . Видно, что область диэлектрика представляет собой гранулированную структуру, причем плотность и размер гранул возрастают при увеличении толщины пленки YBCO . На подложке с пленкой 400 nm высота гранул

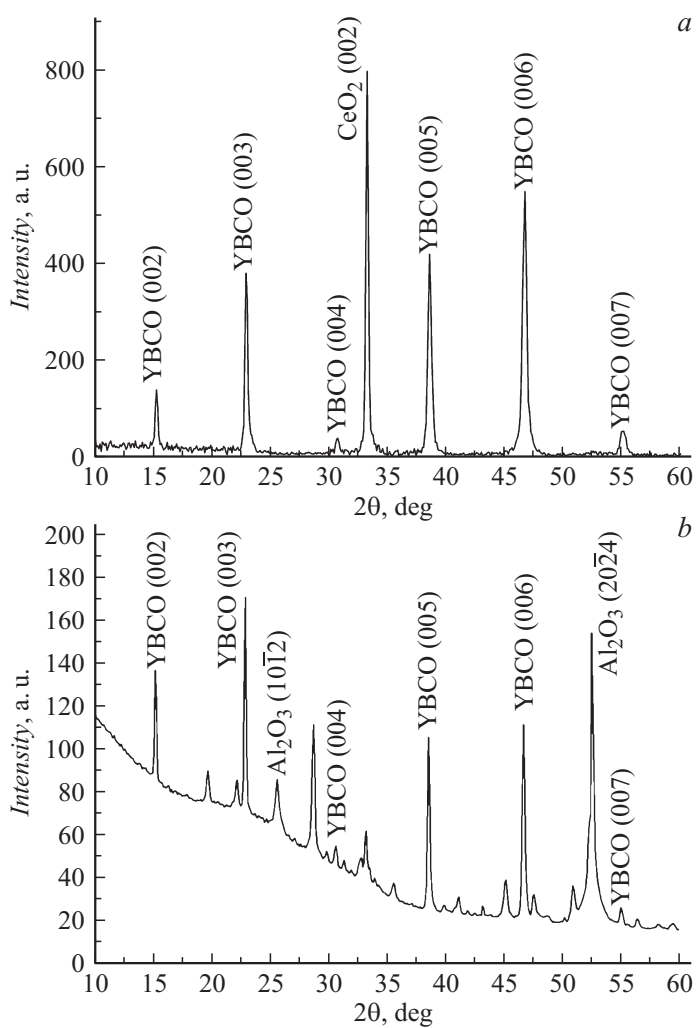


Рис. 1. Дифрактограммы контрольных образцов: *a* — дифрактограмма образца, моделирующего структуру сверхпроводящих элементов; *b* — дифрактограмма образца, моделирующего изолирующие области. Отмечены пики слабо ориентированной фазы YBCO и подложки $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

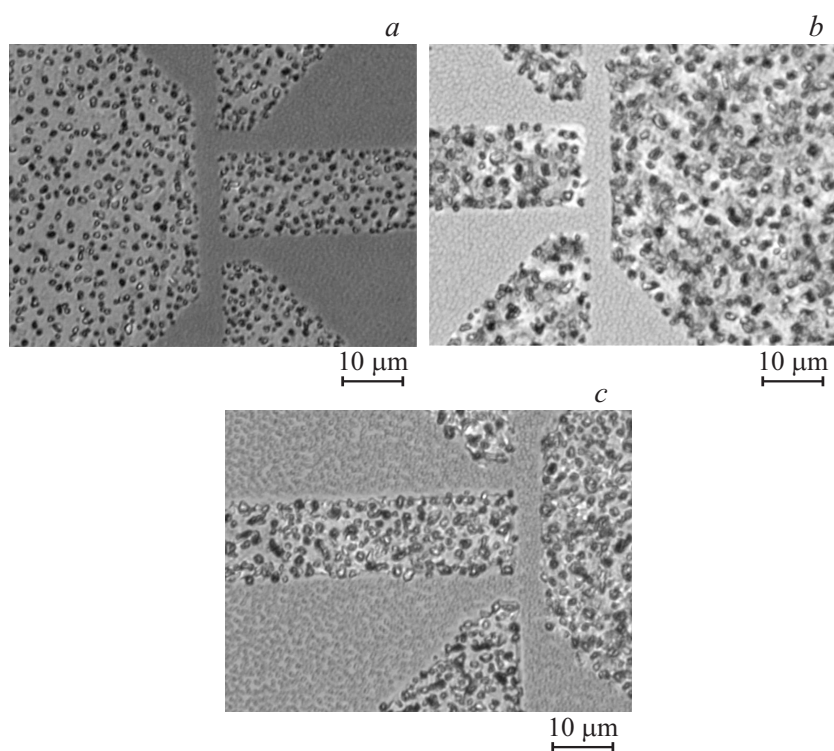


Рис. 2. Фотографии мостиков шириной $4\mu\text{m}$, сформированных из пленок YBCO различной толщины на задающей маске из аморфного оксида церия. Толщина пленки YBCO, nm: a — 80, b — 200, c — 400. Метка — $10\mu\text{m}$.

достигает $0.5\mu\text{m}$, а их латеральные размеры — $2\mu\text{m}$. Неровность края рисунка при этой толщине пленки менее $0.5\mu\text{m}$. Критическая температура T_c и плотность критического тока j_c при температуре $T = 77\text{K}$ измерялись на мостиках шириной 4, 10 и $50\mu\text{m}$ четырехзондовым методом и составили $T_c = 89\text{--}90\text{K}$, $j_c = 2\text{--}3\text{MA/cm}^2$ независимо от толщины пленки и ширины мостика. Эти характеристики соответствуют высококачественным пленкам YBCO. Причем равенство величин плотности критического тока на мостиках шириной 4, 10

и $50 \mu\text{m}$ позволяет сделать вывод, что у сформированных таким образом сверхпроводящих элементов отсутствуют какие-либо краевые неоднородности или повреждения, которые могли бы повлиять на латеральное распределение тока в них.

Оценка потерь в изолирующей области на постоянном токе была выполнена по сопротивлению между сверхпроводящими элементами, а на ВЧ — по добротности планарной катушки индуктивности. Все измерения проводились при температуре $T = 77 \text{ K}$. Величина поверхностного сопротивления изолирующей области на постоянном токе составила более $10^8 \Omega/\square$.

Для оценки потерь в изолирующем слое на ВЧ, на подложке из сапфира была изготовлена и измерена планарная катушка индуктивности. При изготовлении катушки толщина аморфного оксида церия, осажденного при комнатной температуре, составила 80 nm , толщина эпитаксиального оксида церия равнялась 50 nm , толщина пленки YBCO — 200 nm . Катушка состоит из квадратных витков, а также внешней и внутренней площадок (рис. 3). Размер внешнего витка катушки $D_{\text{max}} = 8.6 \text{ mm}$, размер внутреннего витка $D_{\text{min}} = 4.6 \text{ mm}$, ширина полоска $60 \mu\text{m}$, зазор между витками $40 \mu\text{m}$, количество витков 20. Индуктивность катушки была измерена на измерителе LCR E7-12 и составила $L = 3.5 \mu\text{H}$ [7].

Планарная катушка индуктивности обладает межвитковой емкостью и, таким образом, представляет собой колебательный контур. Резонансная частота и добротность катушки определялись по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ). Связь с контуром осуществлялась при помощи индуктивных элементов связи (рис. 3). Резонансная частота контура составила $f = 85 \text{ MHz}$, величина собственной добротности $Q_0 = 53\,000$. Эти параметры получены при слабой связи — коэффициент передачи -35 dB , поэтому можно считать, что измеренная добротность равна собственной. Собственная добротность контура определяется следующими механизмами потерь: потери, связанные с поверхностным сопротивлением сверхпроводника; тангенс потерь подложки; потери на излучение; утечка по изолирующему слою между витками. Предположим, что первые три вида потерь малы. В этом случае эквивалентную схему планарной катушки индуктивности можно представить как параллельно включенные индуктивность, межвитковую емкость и сопротивление утечки по изолирующему слою. Тогда сопротивление утечки определяется выражением $R = Q_0 \cdot 2\pi f L = 1.2 \cdot 10^6 \Omega$.

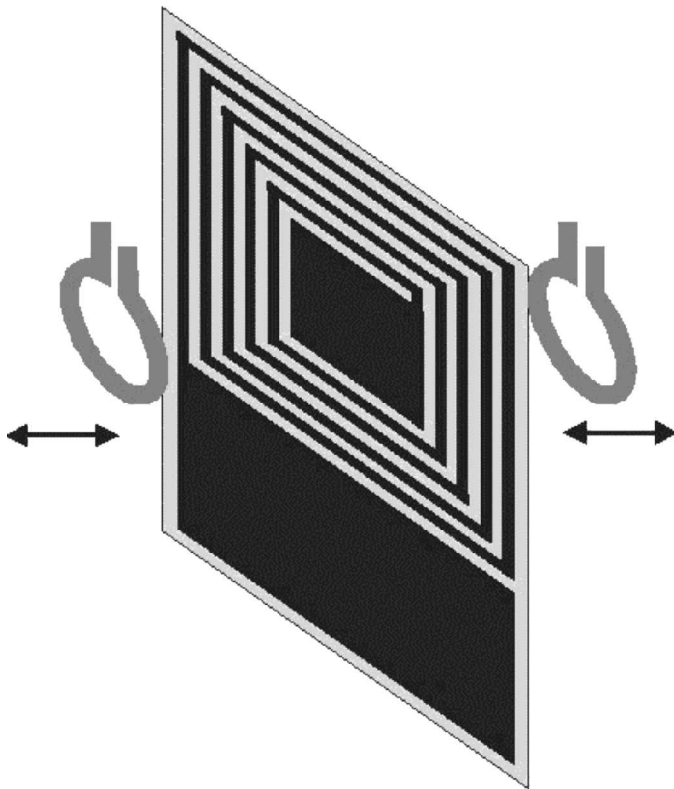


Рис. 3. Схематическое изображение планарной катушки индуктивности с индуктивными элементами связи.

Поскольку мы пренебрегли другими видами потерь, полученная величина сопротивления утечки по изолирующему слою является оценкой снизу. Считая для оценки, что ток утечки протекает по области, ширина которой равна длине среднего витка катушки индуктивности $l = 50 \text{ mm}$, а длина — сумме зазоров между витками катушки $w = 0.8 \text{ mm}$ (20 витков с зазором $40 \mu\text{m}$), по формуле

$$R_s = R \frac{l}{w},$$

получим оценку снизу для величины сопротивления изолирующей области на квадрат $R_s = 10^8 \Omega/\square$, что совпадает с результатом измерений на постоянном токе.

Таким образом, по результатам работы можно сделать вывод о возможности формирования на подложках из сапфира сверхпроводниковых структур YBCO, минуя операцию травления пленки ВТСП, путем создания на подложке специальной задающей маски из аморфного оксида церия CeO₂. При этом рост пленки YBCO является завершающим этапом формирования всей структуры. Мостики шириной 4, 10 и 50 μm , изготовленные этим способом на пленках YBCO толщиной 80, 200 и 400 nm, имели высокие электрофизические характеристики независимо от ширины мостика: $T_c = 89\text{--}90\text{ K}$, $j_c = 2\text{--}3\text{ MA/cm}^2$ при $T = 77\text{ K}$, т.е. были получены планарные структуры с резким, неповрежденным краем. Области, разделяющие сверхпроводящие элементы структуры, имели поверхностное сопротивление более чем $10^8 \Omega/\square$ как на постоянном токе, так и в мегагерцовом диапазоне частот. В результате собственная добротность планарной катушки индуктивности, изготовленной с помощью задающей маски, составила $Q_0 = 53\,000$ на частоте 85 MHz при температуре 77 K. Далее метод задающей маски планируется использовать для формирования структур с джозефсоновскими контактами на бикристаллических подложках.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-02-05869, и программы Президиума РАН „Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий“, проект „Микроструктуры металл–полупроводник/сверхпроводник для генерации и детектирования сигналов терагерцового диапазона частот“. В работе использовано оборудование ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Список литературы

- [1] Malnou M., Feuillet-Palma C., Ulysse C., Faini G. et al. // J. Appl. Phys. 2014. V. 116. P. 074 505.
- [2] Obona J.V., Chromik S., Spankova M. et al. // Physica C. 2006. V. 435. Iss. 1–2, P. 37.
- [3] Pedarnig J.D., Bodea M.A., Steiger B. et al. // Phys. Procedia. 2012. V. 36. P. 508.
- [4] Lang W., Marksteiner M., Bodea M.A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2012. V. 272. P. 300–304.

- [5] *Васильев В.К., Королев Д.С., Королев С.А.* и др. // Труды XIX Международного симпозиума „Нанофизика и нанoeлектроника“. Нижний Новгород, 10–14 марта 2015 г. С. 79. (Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, ISBN 978-5-91326-322-3.)
- [6] *Дроздов Ю.Н., Мастеров Д.В., Павлов С.А.* и др. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 11. С. 109.
- [7] *Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 6. С. 73.