

**БИЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ДЖОЗЕФСОНОВСКАЯ СВЯЗЬ
В ПЛЕНКАХ $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ НА ПОДЛОЖКЕ (110) $NdGaO_3$**

© Ю.А.Бойков, З.Г.Иванов*, Т.Клаесон*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия* Chalmers University of Technology & Goteborg University,
S-41296 Goteborg, Sweden

(Поступила в Редакцию 18 сентября 1995 г.)

В окончательной редакции 28 июня 1996 г.)

Исследованы структура и параметры двухслойной эпитаксиальной системы $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}/(Y,Zr)O_2$, выращенной на подложке (110) $NdGaO_3$. Показана возможность использования тонкого промежуточного эпитаксиального слоя $(Y,Zr)O_2$ для формирования биэпитаксиальных джозефсоновских контактов в пленке $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ на подложке из галлата неодима. Исследованы вольт-амперные характеристики биэпитаксиального джозефсоновского контакта при подаче на него СВЧ-сигнала различной мощности.

Разработка новых биэпитаксиальных структур, включающих тонкие пленки $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO), и изучение механизмов, определяющих параметры соответствующих джозефсоновских контактов, имеют существенное значение для использования пленок высокотемпературных сверхпроводников в микроэлектронике.

Для формирования биэпитаксиальных джозефсоновских контактов в отличие от контактов, сформированных на бикристаллических подложках [1] и ступеньках [2], не требуется специально приготовленной подложки, они могут быть расположены на заданном участке подложки, выполненной из полупроводникового материала [3].

До настоящего времени исследовано лишь несколько биэпитаксиальных гетероструктур [4,5]. В литературе имеются весьма немногочисленные данные о параметрах биэпитаксиальных слабых связей, не ясно, в какой степени они определяются действующими в области кристаллографической границы механическими напряжениями, зависят от нарушения стехиометрии, концентрации дефектов и т. д. Для исследованных джозефсоновских контактов на базе 45° кристаллографической границы в пленке YBCO типичны, к сожалению, низкие значения произведения критического тока I_c на нормальное сопротивление R_n ($T = 77$ K) [4].

В [6] рассмотрена возможность использования подложек из галлата неодима $NdGaO_3$ (NGO) для формирования биэпитаксиальных гетероструктур. Монокристаллические пластины NGO успешно используются для выращивания высококачественных пленок YBCO, ориентиро-

ванных осью с перпендикулярно плоскости подложки (ориентация по оси c) [7]. При сопряжении (001)YBCO с (100) или (110)NGO различия в параметрах кристаллических решеток составляют менее 1%. Значения температурного коэффициента линейного расширения YBCO в направлении, перпендикулярном оси c , близки к соответствующим данным для NGO.

1. Эксперимент

Схема двухслойной системы, использованной для формирования биэпитаксиальной кристаллографической границы в YBCO-пленке, представлена на рис. 1. Тонкий ($d = 150 \text{ \AA}$) промежуточный слой $(1-x)\text{ZrO}_2 + x\text{Y}_2\text{O}_3$ (YSZ) был эпитаксиально выращен на поверхности NGO для того, чтобы обеспечить азимутальный разворот на 45° одной части YBCO-пленки относительно другой. Особенности сопряжения кристаллических решеток YBCO и YSZ, YSZ и NGO для случая (001)YBCO//((100)YSZ и (100)YSZ//((110)NGO проанализированы авторами в [6]. Структура и параметры эпитаксиальных пленок YBCO, выращенных на поверхности (110)NGO, исследованы в [7].

Метод лазерного распыления (KrF , $\lambda = 248 \text{ nm}$, $\tau = 30 \text{ ns}$) был использован для выращивания эпитаксиальных пленок YSZ и YBCO. В качестве исходных мишеней использовались прессованные шайбы стехиометрического состава, приготовленные по стандартной керамической технологии. Плотность лазерного излучения на поверхности мишеней равнялась 1.5 J/cm^2 .

Слой YSZ (9.5% Y_2O_3) выращивался на поверхности (110)NGO при температуре $T_n = 800^\circ\text{C}$ и давлении кислорода $P_0 = 10^{-4} \text{ mbar}$. Ионное (Ar) травление использовалось для того, чтобы убрать промежуточный слой с половины поверхности NGO-подложки. Очистка подложки от следов фоторезиста проводилась в кислородной плазме.

Пленки YBCO ($d = 150 \text{ nm}$) формировались при $T_n = 750^\circ\text{C}$ и $P_0 = 0.5 \text{ mbar}$. Температура сверхпроводящего перехода T_c в пленке сверхпроводника определялась как из температурной зависимости сопротивления R , измерявшегося четырехзондовым методом, так и по изменению эффективной магнитной восприимчивости χ [8].

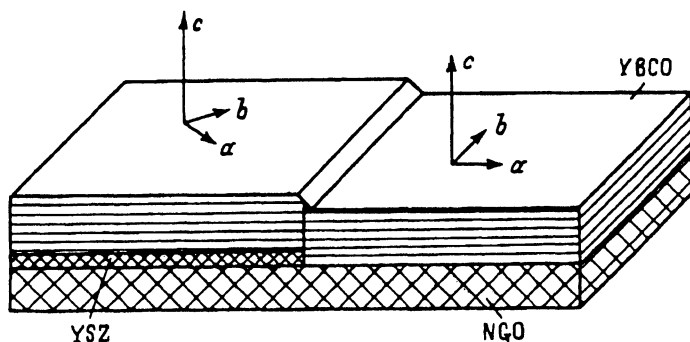


Рис. 1. Схема эпитаксиальной гетероструктуры (001)YBCO//((100)YSZ//((110)NGO, использованной для формирования биэпитаксиального джозефсоновского контакта.

Плотность критического тока J_c в пленках YBCO, выращенных на поверхности промежуточного слоя и на подложке из галлата неодима, определялась на мостиках (длиной $50 \mu\text{m}$, шириной $8 \mu\text{m}$), сформированных с использованием ионного травления. Аналогичные мостики, пересекающие биэпитаксиальную кристаллографическую границу, использовались для исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) слабых джозефсоновских связей в слое сверхпроводника. Для определения R_n по асимптоте зависимости $dV/dI(V)$, которая строилась с использованием численного дифференцирования, ВАХ контакта измерялась до напряжений, соответствующих $(6-10)I_c$.

Контроль за структурой и фазовый анализ двухслойных систем YBCO/YSZ проводились с использованием дифрактометров Philips PW 1710 ($\theta/2\theta$) и Siemens 5000 (φ_1 -сканирование) ($\text{CuK}\alpha$).

2. Результаты

Тонкий промежуточный слой YSZ был выращен эпитаксиально на поверхности (110)NGO, причем $(100)[010]\text{YSZ}/(110)[001]\text{NGO}$ (рис. 2, 3). Ось c в пленке YBCO, сформированной как на (110)NGO, так и на (100)YSZ/(110)NGO, была строго параллельна нормали к плоскости подложки (рис. 2). T_c для YBCO-пленок, выращенных на поверхности промежуточного слоя YSZ и непосредственно на NGO, находилась в пределах 87-90 K, плотность критического тока в обоих случаях превышала $1 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$ (рис. 4).

ВАХ биэпитаксиального джозефсоновского контакта приведена на рис. 5. R_n при 77 K имело величину порядка 1Ω и слабо уменьшалось при понижении температуры. Произведение $I_c R_n (T \sim 77 \text{ K})$ не превышало $1-2 \mu\text{V}$.

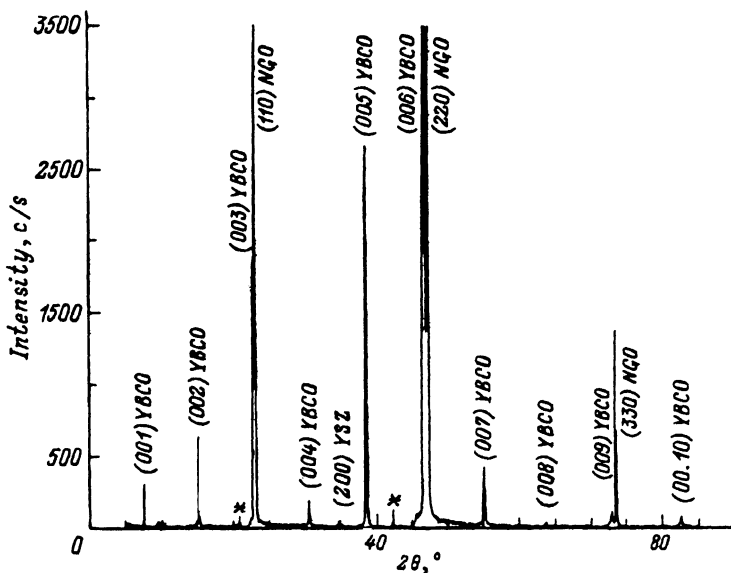


Рис. 2. Дифрактограмма ($\theta/2\theta$) для двухслойной системы YBCO/YSZ, выращенной на поверхности (110)NGO.

3. Обсуждение полученных результатов

При указанных выше условиях конденсации YBCO-пленка, ориентированная по оси c , выростала эпитаксиально как на поверхности промежуточного слоя YSZ, так и на подложке NGO. Пленка YBCO на поверхности слоя YSZ имела следующую азимутальную ориентацию: $[110]YBCO//[010]YSZ//[001]NGO$ (рис. 3). Для ориентированных по оси c пленок YBCO, выращенных эпитаксиально на поверхности $(110)NGO$,

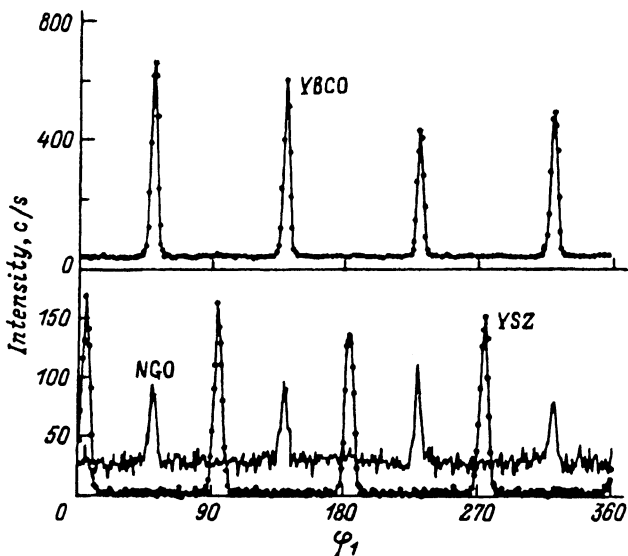


Рис. 3. Рентгеновский ϕ_1 -скан для эпитаксиальной гетероструктуры $(001)YBCO/(100)YSZ/(110)NGO$.

Использованы $(333)NGO$ -, $(117)YSZ$ - и $(113)YBCO$ -рефлексы.

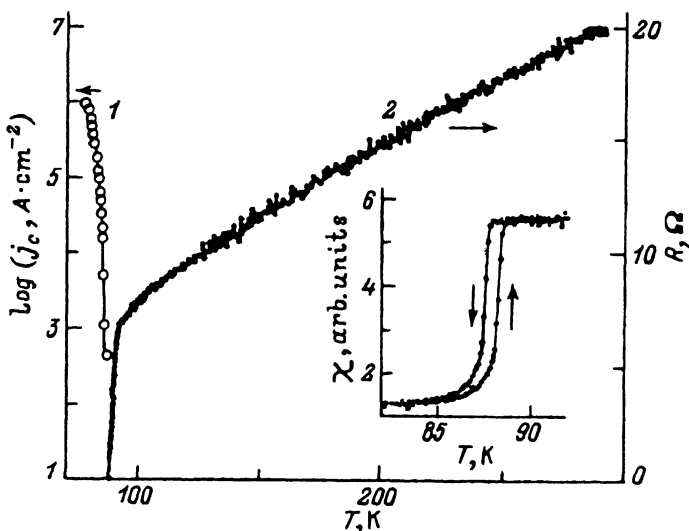


Рис. 4. Температурные зависимости J_c (1), R (2) и χ (на вставке) для пленки YBCO, выращенной эпитаксиально на поверхности YSZ/NGO.

характерной является ориентация $[010]YBCO//[001]NGO$ [7]. Наличие тонкого промежуточного слоя YSZ на поверхности NGO приводило, таким образом, к взаимной азимутальной разориентации на 45° двух соседних участков слоя сверхпроводника.

Структура и морфология поверхности слоя YSZ резко зависели от условий его формирования. Использование высоких температур конденсации и относительно низкого парцильного давления кислорода в процессе формирования слоя YSZ необходимо для обеспечения высокой подвижности конденсируемых частиц, образующихся при распылении мишени YSZ. При $T_n < 750^\circ\text{C}$ и $P_0 > 10^{-2}$ mbar конденсируемые частицы становятся малоподвижными вследствие активного взаимодействия ионов циркония с кислородом. В таких условиях формируется поликристаллический слой YSZ, значительную долю объема кото-

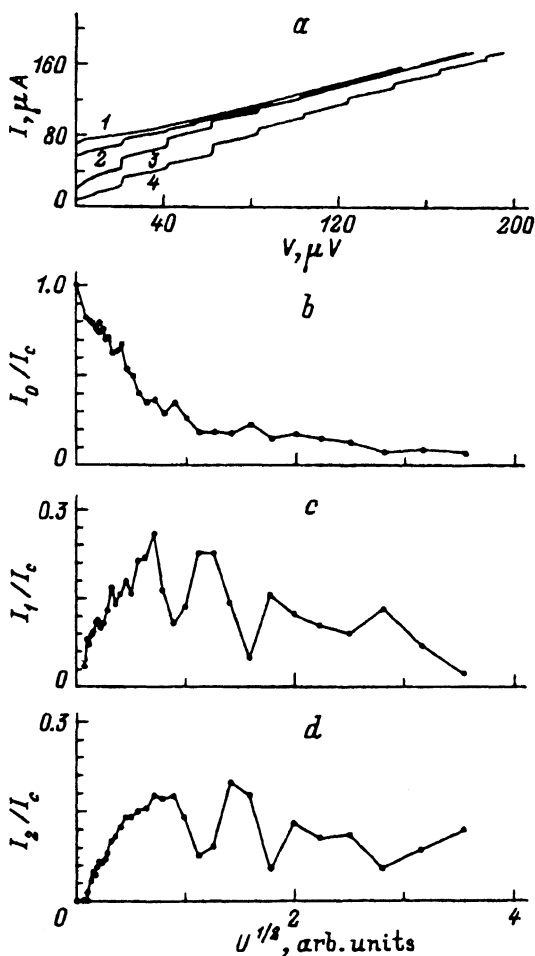


Рис. 5. а — ВАХ для биэпитаксиального джозефсоновского контакта до (1) и после (2-4) подачи на него сигнала СВЧ различной мощности U . Кривые 2-4 — соответствуют ослаблению СВЧ-сигнала на -25 , -15 и -10 Db; $f = 10.04$ GHz; $T = 4.2$ K; б-d — изменение величины критического тока I_c , амплитуды первой I_1 и второй I_2 ступеней тока при увеличении $U^{1/2}$.

рого составляют зерна с ориентацией (110)YSZ// (110)NGO. Причины появления кристаллических зерен с тремя различными азимутальными ориентациями в пленках YBCO на подложках YSZ проанализированы авторами в [7].

Сформированные слои YSZ обладали гладкой свободной поверхностью с характерными ступенями, равными $\sim 5 \text{ \AA}$ (параметр элементарной ячейки YSZ $a = 5.14 \text{ \AA}$). Незначительное число макрочастиц $d \approx 1 \mu\text{m}$, образовавшихся в результате наличия в паровой фазе кластеров из исходной мишени, было обнаружено на поверхности слоя YSZ с помощью микроскопа атомных сил.

Абсолютные значения T_c , полученные из данных по $R(T)$ и χ , хорошо коррелировали между собой. Резкое падение χ при переходе пленки YBCO в сверхпроводящее состояние (см. вставку на рис. 4) указывает на отсутствие в исследованных пленках YBCO, выращенных на YSZ/NGO, включений фазы с пониженной T_c . К деградации сверхпроводящих свойств пленок YBCO, сформированных на YSZ, может приводить химическое взаимодействие между слоем сверхпроводника и подложкой. T_c , измеренная резистивно на мостиках, пересекающих кристаллографическую границу, была на 2–4 К ниже соответствующих данных для мостиков, не пересекающих 45° границу.

На рис. 5, а приведены ВАХ биэпитаксиального контакта при подаче на него СВЧ-сигнала ($f = 10.04 \text{ GHz}$) различной мощности U . При нулевой мощности СВЧ-сигнала ВАХ имеет вид, типичный для резистивной модели джозефсоновского контакта. При U , отличном от нуля, на ВАХ четко видны ступени Шапиро и их высшие гармоники.

Основное уравнение джозефсоновского контакта, обладающего малой емкостью, при воздействии на него внешнего сигнала $i = i_1 + i_2$, где i_1 и i_2 — постоянный и переменный токи, пропускаемые через контакт, может быть представлено в виде [9,10]

$$(\Phi_0/2\pi R_n)d\varphi/dt + I_c \sin \varphi = i_1 + i_2, \quad (1)$$

где Φ_0 — квант магнитного потока, φ — разность фаз в слое сверхпроводника по обе стороны от контакта.

Амплитуда ступеней тока ΔI_n на ВАХ при гармоническом внешнем воздействии ($i_2 = A \cos \omega t$) на джозефсоновский контакт изменяется при изменении амплитуды внешнего сигнала A в соответствии с соотношением [9]

$$\Delta I_n = 2I_c |J_n(A/w)|, \quad (2)$$

где J_n — функция Бесселя. Изменение амплитуды первой I_1 и второй I_2 ступеней тока и величины критического тока для сформированного джозефсоновского контакта при увеличении $U^{1/2}$ показаны на рис. 5, с, d, b. Осцилляции амплитуды ступеней тока затухали с увеличением амплитуды СВЧ-сигнала. Фазы осцилляций соседних ступеней в соответствии с (2) были сдвинуты на $\pi/2$.

Амплитуда ступеней тока, как следует из (2), должна обращаться в нуль при определенных значениях $U^{1/2}$. На экспериментальных кривых, однако, амплитуда первой и второй ступеней уменьшается до некоторой конечной величины. С увеличением мощности внешнего СВЧ-сигнала характер изменения амплитуды ступеней тока заметно

отличался от предсказываемого в рамках резистивной модели джозефсоновского контакта. Указанные расхождения между экспериментально полученными данными и теорией могут быть обусловлены: 1) сложной структурой сформированного джозефсоновского контакта (контакт состоит из двух или более контактов, соединенных параллельно [10]); 2) синхронным движением джозефсоновских вихрей в исследованном достаточно широком контакте [11,12].

В [9] предложен способ определения характерной частоты джозефсоновского контакта $\Omega_c = 2\pi V_c/\Phi_0$, которая является одним из основных параметров резистивной модели. Для оценки Ω_c необходимо определить величину отношения A_n^{k+1}/A_n^k , где A_n^k — амплитуда внешнего сигнала, при котором n -я ступень тока k -ый раз обращается в нуль. Значения характерного напряжения джозефсоновского контакта V_c , определенные по измерениям на постоянном токе $V_c = I_c R_n$ и из данных по осцилляциям ступеней тока равны значения 56 и $38 \mu\text{V}$ соответственно ($T = 4.2 \text{ K}$).

Отклонения в стехиометрии в слое сверхпроводника в области бикристаллической границы, обусловленные взаимодействием YSZ и YBCO, могут оказывать существенное влияние на параметры джозефсоновского контакта, в частности, являются причиной низких значений V_c . Чтобы уменьшить нарушение состава в области 45° кристаллографической границы, при использовании YSZ в качестве материала промежуточного слоя целесообразно использовать антидиффузионный буфер, состоящий из тонких (10 nm/10 nm) эпитаксиальных слоев YBCO и SrTiO_3 [3].

Данная работа финансировалась в рамках проекта № 95-02-04186-а Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

- [1] Z.C. Ivanov, P.A. Nilsson, D. Winkler, J.A. Alarco, T. Claeson. Appl. Phys. Lett. **59**, 23, 3030 (1991).
- [2] K. Herrmann, Y. Zhang, H.-M. Muck, J. Schubert, W. Zander, A.I. Braginski. Supercond. Sci. Technol. **4**, 583 (1991).
- [3] Yu.A. Boikov, Z.G. Ivanov, A.L. Vasilev, T. Claeson. J. Appl. Phys. **77**, 4 1654 (1995).
- [4] K. Char, M.S. Colclough, S.M. Garrison, N. Newman, G. Zaharchuk. Appl. Phys. Lett. **59**, 733 (1991).
- [5] K. Char, M.S. Colclough, L.P. Lee, G. Zaharchuk. Appl. Phys. Lett. **59**, 17, 2177 (1991).
- [6] Yu.A. Boikov, Z.G. Ivanov, G. Brorsson, T. Claeson. Supercond. Sci. Technol. **7**, 281 (1994).
- [7] Ю.А. Бойков, З.Г. Иванов, Е. Олсон, В.А. Данилов, Т. Клаесон, М. Шеглов, Д. Эртс. ФТТ **37**, 3, 880 (1995).
- [8] A.T. Fiory, A.F. Hebard, P.M. Mankevich, R.E. Howard. Appl. Phys. Lett. **52**, 2165 (1988).
- [9] К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих. Системы с джозефсоновскими контактами. Изд-во МГУ. М. (1978). С. 447.
- [10] S.G. Wang, Y.D. Dai, X.H. Zeng, G.C. Xiong, S.Z. Wang, G.J. Lian, Z.Z. Gan. Physica **B194-196**, 135 (1994).
- [11] R.P.J. Jsselsteijn. Laser deposited high T superconducting hetero layered structures and devices. Ph. D. Thesis. University of Twente. Netherlands. (1994). P. 91.
- [12] Yu.A. Boikov, Z.G. Ivanov, E. Olsson, J.A. Alarco, G. Brorsson, T. Claeson. J. Appl. Phys. **72**, 1, 199 (1992).