

PACS: 74.50.+r, 74.62.-c, 74.80.Dm, 74.80.Fp

Н.А. Каланда¹, Л.И. Гурский², К.И. Янушкевич¹, Н.А. Шишонок¹,
И.М. Колесова¹

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА КРИТИЧЕСКУЮ ПЛОТНОСТЬ ТОКА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОЗИТАХ

¹ГНУ Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси
ул. П. Бровки, 17, г. Минск, 220072, Беларусь

²Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники»
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220072, Беларусь

Исследовано влияние структурных неоднородностей вблизи межзеренных границ на величины критических плотностей тока в композитах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + xCuO$, полученных как при высоких давлениях, так и методом диффузионных пар, с целью увеличения токонесущей способности композитных материалов при их использовании в устройствах микроэлектроники. Установлено, что вследствие изменения свойств поверхностного слоя зерен происходит уменьшение величины энергетической щели вблизи границы зерна, увеличение которой возможно путем окисления композитов и наложения давления до 5 GPa. Неравновесные условия синтеза композита способствуют загрязнению поверхности зерен, диффузии примесей в глубь зерна при их отжигах и, как следствие, уменьшению величин J_c без возможности их дальнейшего восстановления.

Контакты Джозефсона на основе слабосвязанных высокотемпературных сверхпроводников широко исследуются для создания изделий криоэлектроники – магнитометров, гальванометров, СВЧ-детекторов, перестраиваемых СВЧ-генераторов, приборов спинэлектроники и других устройств, а также микромощных микросхем логики и памяти с высоким быстродействием. Использование контактов Джозефсона в цифровых устройствах при создании логических элементов и ячеек памяти основано на представлении информации электрическим током, управляемым контактом Джозефсона за счет генерации, уничтожения или переключения направления тока. Поэтому исследования свойств и электрических характеристик контактов в слабосвязанных высокотемпературных сверхпроводниках являются актуальными [1–3].

Джозефсоновские контакты в ВТСП-материалах могут быть образованы: межзеренными границами, искусственными барьерами из материалов различной проводимости, обладающих и не обладающих сверхпроводящими

свойствами и т.д. [1,3]. Наибольший интерес представляют композиты $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + x\text{CuO}$, изготовленные по технологии быстрого спекания [4,5]. Короткое время отжига, не приводящее к химическому взаимодействию во время синтеза, обеспечивает получение композитов с атомарно резкими границами между зёрнами. Простота изготовления слабой связи с различной эффективной протяженностью является привлекательной для технологической реализации [5]. Однако двухфазные композиты $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + x\text{CuO}$, полученные в режиме кратковременного ($\sim 3\text{--}5$ min при $1173\text{--}1223$ К) спекания, имеют низкие значения критических плотностей тока ($J_c < 300$ А/см²) и недостаточную механическую прочность. Ввиду слабой токонесущей способности композитных материалов при их использовании в устройствах создаётся возможность разрушения сверхпроводящих элементов при больших плотностях тока. Поэтому исследование влияния структурных неоднородностей вблизи межзёренных границ на величины критических плотностей тока в композитах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + x\text{CuO}$, полученных как при высоких давлениях, так и методом диффузионных пар, представляет значительный интерес.

Измерения сверхпроводящих характеристик и температурных зависимостей критических плотностей тока в температурном интервале $77\text{--}300$ К проводили на композитах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + x\text{CuO}$, где $x = 0.03, 0.07, 0.12, 0.20$, полученных в системе диффузионных пар $\{3\text{BaCuO}_2 + y\text{CuO}\}/\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$, где $0 < y < 3$ (композиты № 1), и спрессованных под давлением $3\text{--}5$ ГПа (композиты № 2) (рис. 1) [6].

Установлено, что композиты № 1, синтезированные методом диффузионных пар на воздухе при $1170\text{--}1190$ К в течение 17 h, имели значения

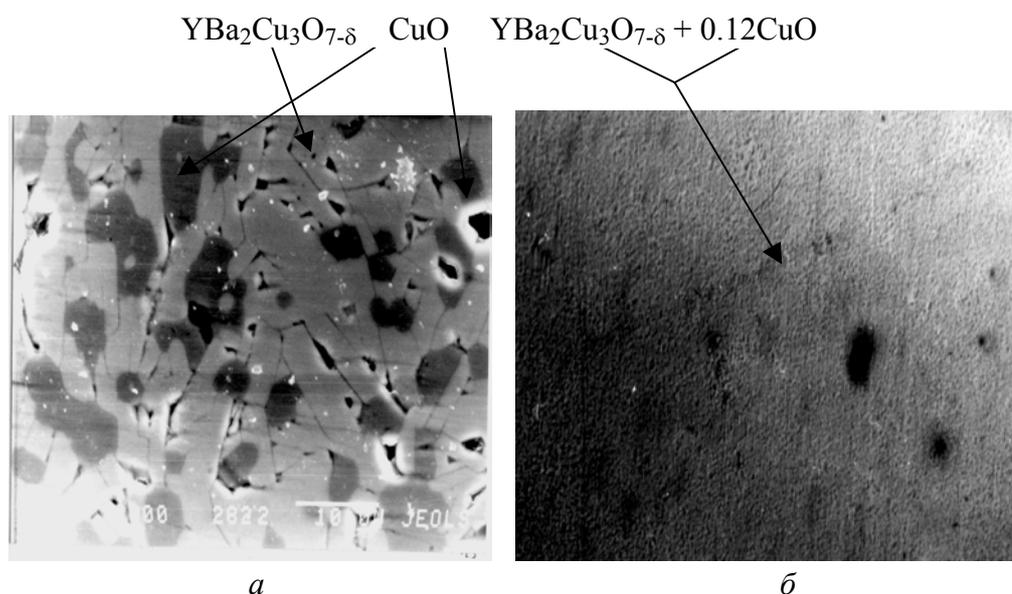


Рис. 1. Микроструктура композита $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0.12\text{CuO}$: *a* – полученного в системе диффузионных пар $\{3\text{BaCuO}_2 + x\text{CuO}\}/\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$, *б* – спрессованного под давлением 4 ГПа

$J_c(77\text{ К}) \sim 180\text{--}200\text{ А/см}^2$, а температурная зависимость критических плотностей тока в интервале 77–300 К имела вид $J_c(T) \sim (T_c - T)^n$, где T_c – критическая температура начала перехода в сверхпроводящее состояние. Значения показателя степени n лежат в интервале $1 < n < 1.2$, что указывает на наличие между сверхпроводящими зёрнами S преимущественно слабой связи с диэлектрической прослойкой в виде структуры $S\text{--}J\text{--}S$ [4]. Дополнительный отжиг композита № 1 при 770 К и давлении кислорода $p_{\text{O}_2} = 10^5\text{ Па}$ в течение 20 ч повышал значения $J_c(77\text{ К})$ до $320\text{--}360\text{ А/см}^2$, при этом изменялся диапазон для показателя степени n : $1.4 < n < 1.6$. В этом случае межзеренную связь представляли в виде $SN\text{--}J\text{--}NS$, где N – нормальная фаза. При более длительном отжиге образцов (до 200 ч) значения J_c уменьшались до $220\text{--}250\text{ А/см}^2$, а значения ширины перехода в сверхпроводящее состояние ΔT увеличивались, и на зависимости $(dp/dT)/(dp/dT)_{\text{max}} = f(T)$ наблюдался второй максимум (рис. 2). При рассмотрении зависимости $J_c(T) \sim (T_c - T)^n$ обнаружено уменьшение значений показателя степени ($1 < n < 1.1$), что указывает на реализацию межзеренной связи в виде $S\text{--}J\text{--}S$.

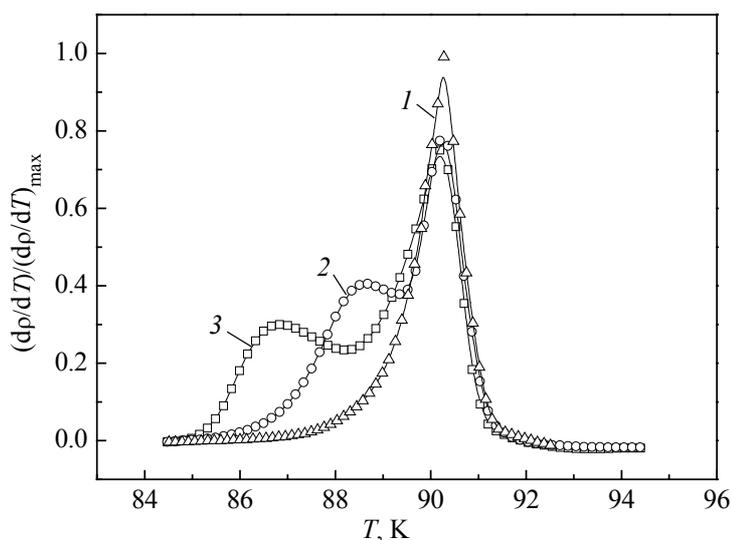


Рис. 2. Температурные зависимости нормированной производной удельного сопротивления композитов № 1, отожженных при 770 К и $p_{\text{O}_2} = 10^5\text{ Па}$ в течение 20 (1), 100 (2) и 200 (3) ч

При измерении политермических зависимостей критических плотностей тока композитов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + x\text{CuO}$, спрессованных под давлением 3–5 ГПа, установлены диапазоны $260 \leq J_c(77\text{ К}) \leq 280\text{ А/см}^2$ при $0.03 \leq x \leq 0.07$ и $140 \leq J_c(77\text{ К}) \leq 180\text{ А/см}^2$ при $0.12 \leq x \leq 0.2$, а между сверхпроводящими зёрнами преимущественно реализовались связи в виде $S\text{--}J\text{--}S$. Дополнительные отжиги при 770 К и $p_{\text{O}_2} = 10^5\text{ Па}$ в течение 20–200 ч к существенным изменениям $J_c(T)$ не привели.

Для увеличения содержания кислорода и его упорядочения в цепочечных слоях $\text{Cu}_1\text{O}_{1-\delta}$ вдоль оси \mathbf{b} сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ использовали термообработку при разных температурах в среде кислорода. Режимы отжигов были определены в [7] и проведены в три этапа при $p_{\text{O}_2} = 5 \cdot 10^5\text{ Па}$: 1) композиты № 2 отжигали при 820 К в течение 25 ч; 2) температуру отжи-

га поднимали до 1020 К и образцы выдерживали в течение 2 h; 3) осуществляли ступенчатое охлаждение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ до 720 К: в интервале 1020–870 К со скоростью 50–40 К/h, а в интервале 870–720 К со скоростью 5–1 К/h. После трехэтапной термообработки композитов установлено значительное увеличение J_c до 650–780 А/см² при $0.03 \leq x \leq 0.07$ и слабое увеличение J_c до 350–380 А/см² при $0.12 \leq x \leq 0.2$. В этом случае показатель степени n в $J_c(T) \sim (T_c - T)^n$ при $0.03 \leq x \leq 0.07$ увеличивался до $1.6 < n < 1.8$, что обусловлено появлением прослойки с нормальной N (омической) проводимостью между зернами в виде $S-N-S$, тогда как значения n при $0.12 \leq x \leq 0.20$ практически постоянны.

Для объяснения полученных результатов рассмотрим выражение для J_c , которое имеет вид

$$J_c \sim (T_c - T) \left[\sqrt{\left(\sqrt{2}\xi(T)/b \right)^2 + 4} - \sqrt{2}\xi(T)/b \right]^2 / \rho_n d, \quad (1)$$

где ΔT – ширина энергетической щели, b – «экстраполяционная длина», d – размер зерна, T_c – температура начала перехода в сверхпроводящее состояние, ρ_n – омическое сопротивление контакта при данной температуре (ρ_n при $T < T_c$ может быть определено путем подавления сверхпроводимости) [8]. Из выражения (1) следует, что в композитах № 1 и 2 реализуются межзеренные контакты нескольких типов с различными значениями $\sqrt{2}\xi(T)/b$. Деградация значений критических плотностей тока в композитах № 1 обусловлена уменьшением энергетической щели на межзеренных границах. Вероятнее всего, подобное поведение, связанное с нарушением структуры межзеренных границ, обусловлено неравновесностью условий получения диффузионных слоев. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ образуется в условиях пересыщения системы ионами Cu на фазовых границах. В связи с этим дефектность поверхности зерен в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ реализуется за счет растворения ионов Cu в кристаллической решетке и локализации их в междоузельных позициях вблизи межзеренных границ. Полученные таким образом диффузионные слои находятся в метастабильном состоянии. Дополнительные отжиги приводят к диффузии ионов Cu по границам зерен, при этом толщина несверхпроводящей межзеренной прослойки увеличивается. Отжиги композитов № 2 при $0.03 \leq x \leq 0.07$, проведенные в окислительной среде, частично устраняют химическую неоднородность на межзеренных границах, обусловленную обеднением их кислородом, увеличивая значения $\sqrt{2}\xi(T)/b$ и соответственно J_c . Кроме того, использование давления до 5 GPa при прессовании композитов способствует увеличению значений критических плотностей тока. Из выражения $J_c \sim \exp(-l/\xi_N)$ (где l – толщина слабой связи, ξ_N – длина когерентности в слабой связи) следует, что J_c растет за счет уменьшения толщины слабой связи [9].

Таким образом, вследствие изменения свойств поверхностного слоя зерен происходит уменьшение величины энергетической щели вблизи границы зерна, увеличение которой возможно путем окисления композитов и наложения давления до 5 GPa. Неравновесные условия синтеза композита способствуют загрязнению поверхности зерен, диффузии примесей в глубь зерна при их отжигах и, как следствие, уменьшению величин J_c без возможности их дальнейшего восстановления.

1. А.А. Киселев, *Высокотемпературная сверхпроводимость*, Ленинград (1990).
2. А.Г. Мержанов, А.В. Макаров, Г.В. Романов, Е.Н. Верхотуров, В.И. Горшков, И.П. Боровинская, М.Д. Нерсесян, А.Г. Пересада, Ю.Н. Баринов, Ю.Г. Морозов, *Письма в ЖТФ* **15**, № 11, 4 (1989).
3. I.A. Devyatov, D.V. Goncharov, M.Ya. Kupriyanov, *Physica* **C350**, 249 (2001).
4. Д. Нелсон, *Высокотемпературные сверхпроводники*, Москва (1990).
5. М.И. Петров, Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд, К.А. Шайхутдинов, К.С. Александров, *ФТТ* **44**, 1179 (2002).
6. Н.А. Каланда, В.М. Трухан, В.А. Кецко, *Инженерная физика* № 3, 39 (2002).
7. Н.А. Каланда, В.М. Трухан, В.А. Кецко, *Неорган. материалы* **38**, 210 (2002).
8. В. Dwir, *Physica* **C168**, 109 (1990).
9. Л. Солимар, *Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение*, Мир, Москва (1974).

N.A. Kalanda, L.I. Gurskii, K.I. Janushkevich, N.A. Shishonok, I.M. Kolesova

INFLUENCE OF PRESSURE ON THE CRITICAL DENSITIES OF CURRENT IN COMPOSITES

The influence of structural heterogeneities near the intergranular boundaries on values of the critical densities of current in the $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + xCuO$ composites obtained at high pressures and by the method of diffusion couples has been investigated for the purpose of an increase in the current carrying capacity of composite materials to be used in devices of microelectronics. It is established that as a result of a change in the properties of the surface layer of grains, the decrease of the value of energy gap near the grain boundary occurs, and it can be increased by oxidizing the composites and application of pressure to 5 GPa. The nonequilibrium conditions of the synthesis of composite contribute to the surface contamination of grains, the diffusion of admixtures into the depths of the grain with their annealings and, as consequence, to the decrease of J_c values without a possibility of their further restoration.

Fig. 1. Microstructure of the $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.12CuO$ composite: *a* – obtained in the system of $\{3BaCuO_2 + xCuO\}/Y_2BaCuO_5$ diffusion couples, *b* – pressed under the pressure of 4 GPa

Fig. 2. Temperature dependences of the standardized derivative of the specific resistance of the composites № 1, annealed with 770 K and $pO_2 = 10^5$ Pa during 20 (1), 100 (2) and 200 (3) h