

УДК 537.311.3, 538.945, 537.9

Каланда Н. А.¹, Ярмолич М. В.¹, Петров А. В.¹, Сонных А. Д.², Голосов Д. А.³,
Завадский С. М.³, Свито И. А.²

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИН ТРАНСПОРТНЫХ ТОКОВ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ
 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01 Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12-\delta}$ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь

В работе приведены исследования по изучению влияния величин транспортных токов на электротранспортные характеристики двухфазных композитов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ в низкотемпературной области. Установлено, что с увеличением времени отжига сверхпроводящие свойства композитов ухудшаются из-за изменений в кристаллической структуре и взаимодействия магнитных частиц с матрицей $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Обнаружено, что транспортный ток проявляет резистивное и сверхпроводящее поведение, но вблизи критических плотностей тока зависимость $J=f(U)$ нелинейна, и скорость роста тока определяется временем синтеза композита.

Малые значения длины когерентности $\xi \sim 10^{-7}$ м в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ снижают предельное значение ширины потенциального барьера для куперовских пар, что делает даже незначительные примеси других фаз на межзеренных границах ведущими себя как слабые (джозефсоновские) контакты между сверхпроводящими зёрнами [1]. Особенно технологичными являются двухфазные композиты на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с магнитными добавками, такими как $Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$. Широкие возможности экспериментального исследования протекания тока через слабые связи двухфазных композитов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ делают их привлекательными для исследователей.

Двухфазные композиты на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ являются моделью сети слабых связей с заранее заданными параметрами. Изучение особенностей протекания сверхпроводящего тока по слабым связям, формируемым "искусственными" границами в этих композитах, предоставляет возможность в сравнении с "естественными" межкристаллитными границами установить их природу [2]. Сопоставление результатов исследований композитов с существующими теориями в литературе позволяет определить физические процессы, определяющие протекание тока через эти материалы, что является важной научной задачей. Таким образом, актуальность вызвана исследованием новых композитных материалов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ в материаловедческом и прикладном плане, как материалов, обладающих ценными для практического применения свойствами.

Для синтеза соединений $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ использовались оксиды Y_2O_3 , Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , CuO и карбонат $BaCO_3$ марки "ОСЧ". Электротранспортные характеристики измеряли четырехзондовым методом

Известно, что из-за низкой кинетики химического взаимодействия между $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ появляется возможность изготовления композита $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Bi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ по режиму быстрого спекания, который позволяет приготовить композиты с четкими границами между гранулами ингредиентов, что приводит к реализации в образце сети слабых связей с атомарно резкими границами. Критическая температура начала перехода в сверхпроводящее состояние исследуемых композитов $T_c \sim 92,1$ К совпадает с T_c однофазной керамики $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (рисунок 1). Установлено, что скорость деградации сверхпроводящих свойств композитов существенным образом зависит от продолжительности синтеза. С увеличением времени отжига при $T=1260$ К от 10 минут (№1), 30 минут (№2) до 50 минут (№3) все образцы композитов демонстрируют металлический тип проводимости и значения

ширины перехода в сверхпроводящее состояние возрастают от $\Delta T_1 = 3$ К до $\Delta T_3 = 15$ К (рисунок 2).

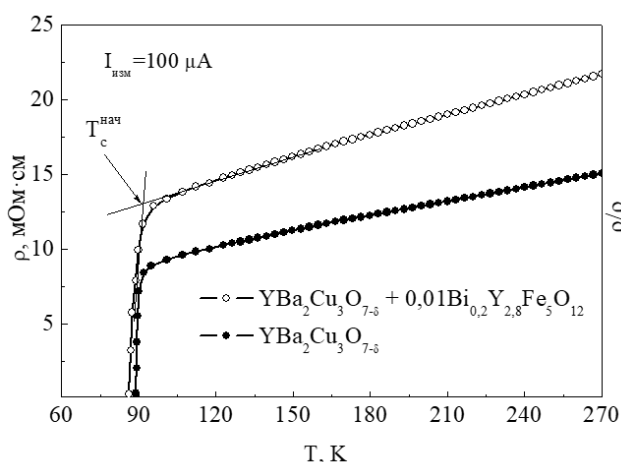


Рисунок 1 – Температурные зависимости удельного сопротивления композита $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и однофазной керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

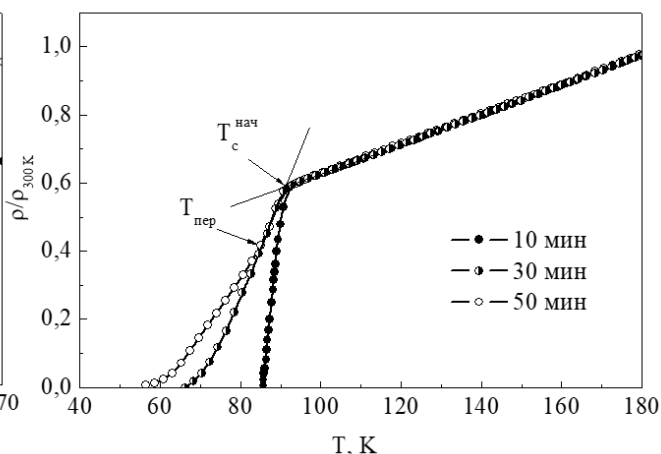


Рисунок 2 – Температурные зависимости нормализованного удельного сопротивления композитов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, отожженных в течение 10, 30, 50 мин.

Постоянное значение $T_c = 92,1$ К и увеличение ΔT с ростом t для всех образцов №1-3 связано с неизменностью сверхпроводящих характеристик зерен $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и уменьшением прозрачности магнитной прослойки фазы $\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Это происходит из-за увеличения толщины слабой связи и снижения длины свободного пробега свободных носителей заряда в ней. Увеличение времени отжига до 50 минут способствует химическим процессам и увеличению фазовой неоднородности на межзеренных границах сверхпроводника. Также важную роль играют тепловые флуктуации из-за высокой анизотропии проводимости и малой длины когерентности, особенно при температурах близких к температуре перехода в сверхпроводящее состояние. Эти флуктуации разрушают фазовую когерентность между сверхпроводящими границами зерен купрата иттрия бария, вызывая проскальзывание фазы на 2π и возникновение разности потенциалов на слабой связи.

Для изучения влияния слабых связей на электротранспортные характеристики композитов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ были исследованы их вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рисунок 3). Сравнение ВАХ и политермических зависимостей электросопротивления $\rho=f(T)$ композитов (рисунок 2) позволяет предположить, что транспортный ток в этих композитах протекает по сверхпроводящим каналам типа S-J-S, и с увеличением времени отжига до 50 минут межзеренные связи начинают оказывать более значительное влияние на уширение перехода в сверхпроводящее состояние. Данные ВАХ также показывают, что степень деградации сверхпроводящих свойств возрастает при увеличении времени отжига. Это, на наш взгляд, обусловлено малой прозрачностью межзеренных границ S-M-S, где S - сверхпроводящее зерно $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, M – ферромагнетик, что приводит к уменьшению критических плотностей тока бездиссипативно проходимых по композиту, а также малой длиной свободного пробега свободных носителей заряда. Эти данные ВАХ указывают на увеличивающееся влияние слабых связей на электротранспортные характеристики композитов (рисунок 4).

Увеличение времени отжига приводит к снижению диссипативных токов через слабые связи и к существенному снижению критических плотностей тока J_c в системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. При плотностях тока выше 28 А/см² для образца №3 наблюдается появление тока и его увеличение до значения $U=45$ мВ. При дальнейшем увеличении напряжения в интервале 45-135 мВ, рост тока происходит более быстро и почти линейно зависит от напряжения. Обнаружено, что изменение напряжения ΔU быстро увеличивается с увеличением времени синтеза композита (рисунок 4).

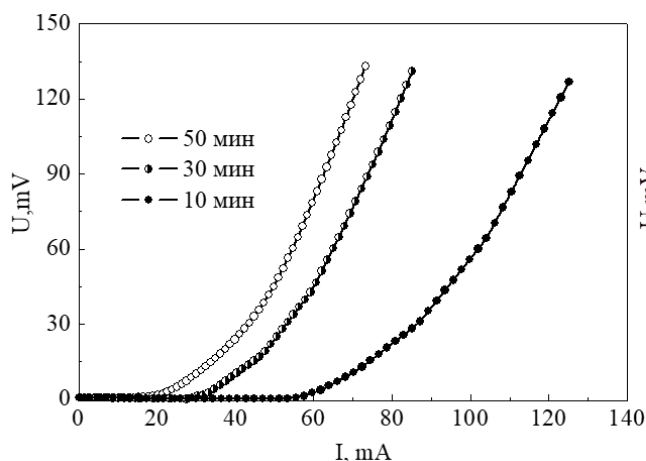


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики композитов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, отожженных в течение 10, 30, 50 мин.

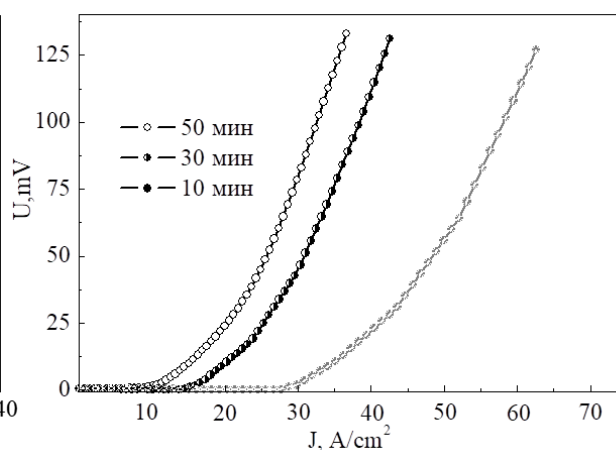


Рисунок 4 – Корреляционные зависимости между плотностью измерительного тока и напряженностью на потенциальных зондах композитов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, отожженных в течение 10, 30, 50 мин.

Из экспериментальных результатов следует, что в исследуемой системе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12-\delta}$ вольт-амперные характеристики имеют джозефсоновский вид [1]. При определенных плотностях тока, близких к критическим значениям, поведение зависимости тока от напряжения не является линейным и определяется временем синтеза. Это связано с тем, что купратные композиты представляют собой перколяционный кластер, состоящий из сверхпроводящей матрицы с включениями нормальной фазы, где течет и резистивный, и сверхпроводящий токи. При прохождении электрического тока через композиты на основе купратов происходит индукция электрического поля и движение вихрей, что может вызвать разрушение слабых связей. При превышении критических значений тока на слабых связях происходит распад матрицы на сверхпроводящие кластеры, что влияет на характер вольт-амперных характеристик из-за рассеяния энергии и неоднородного выделения джоулевого тепла.

Таким образом, исследования влияния транспортных токов на вольт-амперные характеристики двухфазных композитов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01 \text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ при низких температурах показали, что при совместном отжиге в течение 10 минут низкая кинетика химического взаимодействия между $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и $\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ позволяет получить композиты с $T_c \sim 92,1 \text{ K}$ и атомарно резкими границами сети слабых связей. Однако, с увеличением времени отжига происходит существенное ухудшение сверхпроводящих свойств композитов из-за изменения кристаллической структуры и взаимодействия магнитных частиц со сверхпроводящей матрицей $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. В соответствии с данными вольт-амперных характеристик и политермическими зависимостями электросопротивления композитов, транспортный ток, протекающий по композиту, проявляет резистивное и сверхпроводящее поведение. Однако, вблизи критических плотностей тока зависимость $J = f(U)$ нелинейна, и скорость роста транспортного тока определяется временем синтеза композита.

Список литературы

1. Chevriaux, D. Theory of a Josephson junction parallel array detector sensitive to very weak signals/ D. Cherviaux, R. Khomeriki, J. Leon // Physical Review B. – 2006. - Vol.73. – P.214516.
2. Sokhi, R. S. Investigation of films of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ using Rutherford backscattering spectrometry Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 1990. – Vol. 50. – P.140-144.