

Андреевское отражение и экспериментальные температурные зависимости критического тока гетерогенных ВТСП (поликристаллы и композиты на их основе)

© М.И. Петров, Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, 660036 Красноярск, Россия

E-mail: smp@iph.krasn.ru

(Поступила в Редакцию 4 апреля 2006 г.
В окончательной редакции 13 июня 2006 г.)

Приведены результаты измерения температурных зависимостей критического тока поликристаллических ВТСП $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7$ с различным временем обжига и композитов $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + BaPbO_3$. Полученные результаты проанализированы в рамках теории Гунзенхаймера–Шусслера–Кюммеля, рассматривающей андреевское отражение носителей в $S-N-S$ -переходе (где S — сверхпроводник, N — нормальный металл). Хорошее согласие экспериментальных и теоретических зависимостей критического тока в широком интервале температур для поликристаллов как с естественными, так и с искусственно созданными границами (композиты) позволило оценить эффективную протяженность межкристаллитных границ в исследованных ВТСП. Наблюдается экспоненциальная зависимость плотности критического тока при 4.2 К от величины эффективной протяженности межкристаллитных границ в образцах обоих типов.

Работа выполнена в рамках комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.4, программы РАН „Квантовая макрофизика“, а также частично в рамках Лавреневского конкурса молодежных проектов СО РАН 2006 г. (проект № 52), гранта Президента РФ МК-7414.2006.02 и гранта Красноярского краевого фонда науки 16G065.

PACS: 74.81.Fa, 74.50.+r

Транспортные свойства поликристаллических ВТСП во многом определяются качеством границ между кристаллитами, которые являются основным фактором, ограничивающим критический ток ВТСП. Эти границы являются слабыми связями джозефсоновского типа, для которых критический ток тем меньше, чем больше геометрическая протяженность. Транспортные свойства гранулярных ВТСП определяются перколяционной структурой образца, разориентацией кристаллитов [1] и внутренними физическими механизмами, влияющими на эффекты Джозефсона в структуре сверхпроводящий кристаллит–межкристаллитная граница–сверхпроводящий кристаллит [2]. Эффекты Джозефсона в свою очередь зависят от характера межкристаллитных границ (металл, диэлектрик и т.п.), что в конечном счете определяет величину плотности критического тока и его специфическую температурную зависимость [2–6]. В настоящей работе анализируются экспериментальные температурные зависимости критического тока $I_c(T)$ поликристаллов ВТСП с различным временем отжига и композитов ВТСП + нормальный металл $BaPbO_3$. Показано, что теория [7], развитая для джозефсоновских переходов $S-N-S$ (где S — сверхпроводник, N — нормальный металл), хорошо описывает экспериментальные зависимости $I_c(T)$ и дает разумные оценки эффективной протяженности N -границ между сверхпроводящими кристаллитами.

Ранее на основании анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) поликристаллических ВТСП иттриевой

системы было установлено [8,9], что в них реализуются межкристаллитные границы металлического характера. В данной работе исследуются образцы, приготовленные по той же технологии, что и в работах [8,9], что дает основание использовать при анализе экспериментальных зависимостей $I_c(T)$ теории, построенные для джозефсоновских переходов типа $S-N-S$. В композитах на основе ВТСП несверхпроводящий компонент выполняет роль прослойки, разделяющих ВТСП-кристаллиты [4,5,10–13], что позволяет искусственно задать тип слабой связи. Известно, что металлооксид $BaPbO_3$ проявляет металлические свойства [14,15]. Поэтому для анализа экспериментальных результатов, полученных на композитах ВТСП + $BaPbO_3$, допустимо рассматривать теории, разработанные для $S-N-S$ -переходов.

Джозефсоновский ток в $S-N-S$ -контактах рассматривался в ряде работ [7,16–18], в которых было показано, что перенос куперовских пар через $S-N-S$ -контакты происходит благодаря андреевскому отражению. Развитые в последние годы теории, рассматривающие андреевское отражение при вычислении критического тока и ВАХ $S-N-S$ -переходов, наиболее полно описывают экспериментально наблюдаемые особенности транспортных свойств этих структур [7,16–28]. Например, в рамках теории [20], разработанной для описания ВАХ $S-N-S$ -структур, объясняются щелевые особенности, избыточный ток и участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением на ВАХ. Поэтому при анализе поликристаллов ВТСП с

межкристаллитными границами металлического характера логично рассмотреть механизм андреевского отражения в структуре ВТСП-кристаллит–граница–ВТСП-кристаллит.

Поликристалл характеризуется функцией распределения межкристаллитных границ по их протяженности. Следовательно, поликристаллический ВТСП является физической моделью хаотической сети джозефсоновских контактов, характеризующейся функцией распределения по энергии связи и по величине критического тока [1,29]. Мы считаем, что поведение критического тока сети джозефсоновских переходов в первом приближении адекватно поведению критического тока одиночного перехода с некоторой эффективной геометрической протяженностью. Как показано далее, результаты расчета в рамках теории [7] объясняют экспериментально наблюдаемую смену знака кривизны зависимости $I_c(T)$ исследованных образцов. Учет распределения переходов по геометрическим размерам с использованием результатов микроскопических теорий эффекта Джозефсона дает более адекватную картину протекания тока через ВТСП-поликристалл. Но это представляет самостоятельную задачу.

Ранее в работе [11] для анализа экспериментальных зависимостей $I_c(T)$ композитов из ВТСП и металлооксида BaPbO_3 были использованы теоретические зависимости $I_c(T)$, рассчитанные авторами [7] для $S-N-S$ -перехода на основе классического низкотемпературного сверхпроводника. Исходя из согласия теоретических кривых, рассчитанных в [7] для протяженностей N -прослоек $2a = 1.57\xi_0$ и $5.23\xi_0$ (где ξ_0 — длина когерентности), с экспериментальными зависимостями $I_c(T)$ и предположения, что $2a \sim V^{1/3}$ (где V — объемная концентрация металла в композите), была получена грубая оценка эффективной протяженности межгранульных прослоек в композите. Более корректное сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей $I_c(T)$ и оценка эффективной толщины межгранульных границ требуют вычисления $I_c(T)$ с использованием микроскопических параметров ВТСП и тщательной подгонки теоретических и экспериментальных зависимостей. Результаты сравнения и определения эффективной толщины межгранульных границ из условия наилучшего совпадения теории [7] и эксперимента представлены в настоящей работе.

1. Эксперимент

Поликристаллический ВТСП состава $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ был синтезирован по стандартной технологии твердофазного синтеза. Дебаграммы показали наличие рефлексов только от структуры 1-2-3. На последней стадии приготовления образцы прошли различный по длительности окончательный обжиг при температуре 930°C . Время спекания варьировалось от экстремально малого (5 min) до 150 h. Обозначим далее

образцы согласно времени их обжига: YBCO-5 min , YBCO-5 h , YBCO-30 h , YBCO-150 h . Электронная микроскопия образцов, прошедших обжиг в течение 5 и 150 h, показала, что длительный обжиг приводит к увеличению среднего размера кристаллитов от ~ 2 до $10 \mu\text{m}$ [30].

Несверхпроводящий компонент композитов BaPbO_3 был синтезирован методом твердофазного синтеза из BaO_2 и PbO при $650-700^\circ\text{C}$ с тремя промежуточными помолами в течение 20 h. Дебаграммы показали наличие рефлексов только от структуры перовскита.

Композиты $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ и BaPbO_3 были приготовлены по методике быстрого спекания, описанной ранее [11]. Температурный режим был следующим: 5 min при 930°C , затем 6 h при 400°C . Дебаграммы полученных композитов содержат рефлекс только от двух фаз исходных ингредиентов. Электронная микроскопия композитов показала, что средний размер ВТСП-кристаллитов в композите составляет величину $\sim 1.5 \mu\text{m}$. Обозначим далее композитные образцы как $\text{YBCO} + V \text{BaPbO}_3$. Здесь V — объемное содержание (в %) металлооксида BaPbO_3 ; объемное содержание ВТСП (YBCO) соответственно равно $100\% - V$.

Электрические измерения проводились стандартным четырехзондовым методом. Образец выпиливался в форме параллелепипеда размером $1 \times 1 \times 10 \text{ mm}$. Затем образец приклеивался на сапфировую подложку. Центральная часть образца, к которой затем прижимались золоченые потенциальные контакты, сошлифовывалась до толщины $\sim 200 \mu\text{m}$. Массивные серебряные токовые контакты механически прижимались к площадкам образца, покрытым In-Ga эвтектикой. В случае ВТСП с наибольшей плотностью критического тока в токоподводящие площадки образца вжигалась мелкодисперсная серебряная паста. Во время измерений образец находился в гелиевой теплообменной атмосфере. Указанные меры позволили уменьшить выделение тепла на токовых контактах. В том случае, когда величина транспортного критического тока при гелиевой температуре достигала $\sim 4.5 \text{ A}$ (образец YBCO-5 h), наблюдался разогрев образца (не более $\sim 2 \text{ K}$). Были измерены начальные участки ВАХ при различных температурах. Значение критического тока I_c определялось из начального участка ВАХ по стандартному критерию $1 \mu\text{V/cm}$ [31]. Значение I_c при 4.2 K дополнительно перепроверялось путем измерения ВАХ образца, погруженного непосредственно в жидкий гелий. Таким образом были измерены температурные зависимости критического тока композитов и ВТСП без добавок.

Температура сверхпроводящего перехода композитов, определенная на основе магнитных измерений, составила 93.5 K , что соответствует T_C исходного $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Зависимости $R(T)$ композитов $\text{YBCO} + V \text{BaPbO}_3$ приведены в работе [11]. Они имеют характерную для гранулярных сверхпроводников [32] двухступенчатую структуру: резкий скачок при 93.5 K ,

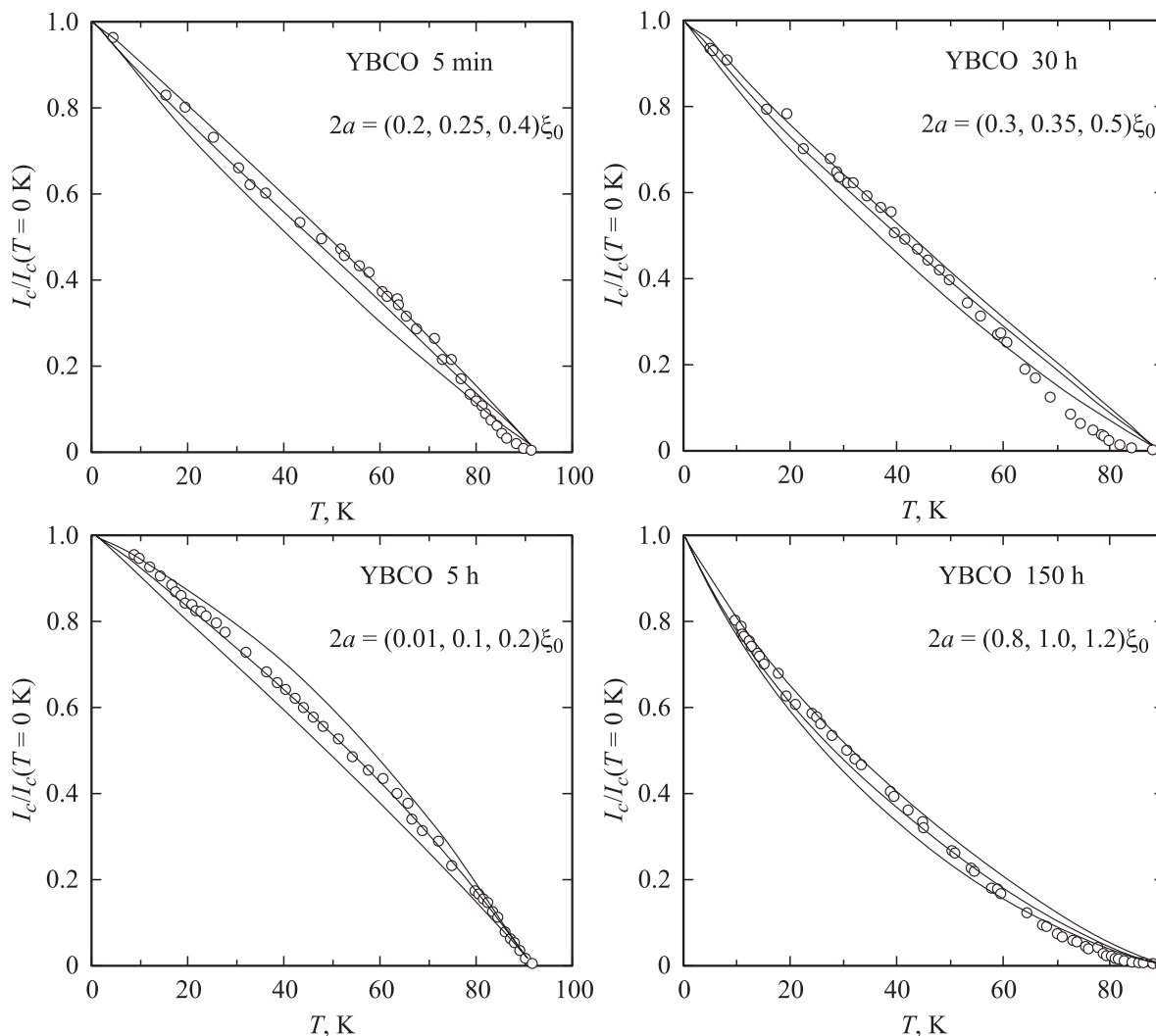


Рис. 1. Температурные зависимости плотности критического тока поликристаллических ВТСП с различным временем обжига (точки) и теоретические зависимости $I_c(T)$ для $S-N-S$ -перехода [7] (сплошные кривые), нормированные на значение $I_c(T = 0 \text{ K})$. Значения $2a$ для теоретических зависимостей указаны на рисунке. Меньшему значению $2a$ соответствует верхняя теоретическая кривая.

соответствующий переходу гранул ВТСП в сверхпроводящее состояние, и плавный затянутый переход в состояние с $R = 0$ от межкристаллитных границ.

2. Теория Гунзенхаймера–Шусслера–Кюммеля для критического тока $S-N-S$ -переходов. Оценка пределов ее применимости к ВТСП-поликристаллам

Из всех перечисленных выше работ, посвященных вычислению джозефсоновского тока, только теории [7,16] позволяют рассчитать температурную зависимость критического тока $S-N-S$ -контактов с различной толщиной металлического слоя. Обе модели предсказывают изме-

нение знака кривизны зависимости критического тока от температуры с ростом толщины металлического слоя. Теория [16] также предсказывает существование плато на зависимости $I_c(T)$ в диапазоне низких температур (вблизи 0 K). Поскольку в известных экспериментах для $S-N-S$ -контактов такая особенность не наблюдается, мы использовали теорию [7] для описания полученных экспериментальных данных.

В теории [7] рассматривается перенос куперовских пар через $S-N-S$ -контакт посредством андреевского отражения и рассчитывается критический ток „чистых“ $S-N-S$ -переходов (длина свободного пробега носителей l в N -прослойке больше протяженности N -прослойки, $l > 2a$ [33]) для всей области температур ниже T_C и произвольных значений $2a$. Зависимость плотности тока $S-N-S$ -переходов от разности фаз Φ сверхпроводящих берегов определяется следующим вы-

ражением [7]:

$$j(\Phi) = e_z - \frac{e}{L_x L_y} \left\{ \sum_k^{E \leq \Delta} \frac{\hbar k_h}{2ma^*} \left[\tanh(E_k^+ / 2k_B T) \frac{a^*}{a^* + \lambda_k^+} - \tanh(E_k^- / 2k_B T) \frac{a^*}{a^* + \lambda_k^-} \right] + \sum_k^{E > \Delta} \frac{\hbar k_h}{mD} \tanh(E / 2k_B T) [|\eta^+|^2 - |\eta^-|^2] \right\}, \quad (1)$$

где $L_x L_y$ — площадь нормальной области, $2a^*$ — эффективная длина нормальной области, $2D$ — длина $S-N-S$ -перехода, Δ — энергетическая щель сверхпроводника, λ_k — глубина проникновения, e, m — заряд и эффективная масса электрона, k_B — постоянная Больцмана, \hbar — постоянная Планка, η^+ и η^- — компоненты волновых функций квазичастиц, энергия квазичастиц E_k определяется из уравнения $E = \hbar^2 k_{zF}^2 / (2a^* m) [n\pi + \arccos(E/\Delta) \pm \Phi]$, k_{zF} — проекция волнового вектора квазичастиц на направление протекания тока z , $n = 0, 1, 2, \dots$. Плотность критического тока j_c определяется как максимум зависимости $j(\Phi)$. Для получения температурной зависимости критического тока необходимо вычислять выражение (1) для разных температур с учетом зависимости $\Delta(T)$. Нами была использована зависимость $\Delta(T)$ из теории БКШ при значении $\Delta(0) = 17.5 \text{ meV}$ и $m = 5m_e$, $E_F = 0.323 \text{ eV}$ [34,35]. Отметим, что при $2a/\xi_0 \rightarrow 0$ теория [7] повторяет известный результат Кулика и Омелянчука [36] для „коротких“ микромостиков в „чистом“ пределе и результат Куприянова [37] для чистых $S-N-S$ -сандвичей.

Различные оценки протяженности межкристаллитных границ показывают, что ее величина для разных ВТСП-поликристаллов составляет единицы-десятки \AA [3,9,38,39]. В работе [38] приведено значение длины свободного пробега l для ВТСП иттриевой системы 6.5 nm . По-видимому, в межкристаллитных границах этот параметр будет несколько меньше, чем в кристаллитах. Тем не менее в большинстве случаев условие „чистого“ предела (неравенство $l > 2a$) для „естественных“ границ иттриевых ВТСП-поликристаллов должно выполняться. В композитах с BaPbO_3 эффективная протяженность N -границ больше, чем в чистых поликристаллах, однако и длина свободного пробега носителей в материале N -прослойка также больше. По данным работы [14], для BaPbO_3 $l \approx 220 \text{ \AA}$ в области низких температур. Таким образом, мы считаем, что условие „чистого“ предела в композите ВТСП + BaPbO_3 также выполняется и применение теории [7] оправдано.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Поликристаллические ВТСП $\text{Y}_{3/4}\text{Lu}_{1/4}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ с различным временем обжига. На рис. 1 приведены нормированные экспериментальные зависимости $I_c(T)$ ВТСП с различным време-

нем обжига. Обращает на себя внимание трансформация зависимости $I_c(T)$. При увеличении времени спекания до 150 h знак кривизны зависимости $I_c(T)$ изменяется. Мы вычисляли теоретические зависимости $I_c(T)$ по теории [7]. Используя толщину N -прослойка $2a$ (в единицах длины когерентности ξ_0) как подгоночный параметр, мы добивались наилучшего согласия экспериментальных и теоретических зависимостей $I_c(T)$ в широком интервале температур, причем за основу брался низкотемпературный диапазон. Сплошные кривые на рис. 1 — теоретические. Средняя из трех кривых — результат наилучшей подгонки. Крайние кривые показывают различие I_c при небольшом варьировании параметра $2a$ и иллюстрируют границы разумной подгонки. Наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и подгоночных зависимостей $I_c(T)$. На рис. 2, a приведена зависимость подгоночного параметра $2a$ от времени обжига ВТСП. Согласно разным источникам, величина ξ_0 варьируется для системы YBCO от 2 до 3 nm [34,35]. Если взять значение $\xi_0 = 24 \text{ \AA}$ [34], получим, что для образцов с временем обжига 5 min и 5 h эффективная протяженность межгранульных границ составляет соответственно 5 ± 1.0 и $2.5 \pm 1.0 \text{ \AA}$. Трудно представить межкристаллитную границу такой малой протяженности. Однако следует учесть, что в теории [7] используется эффективная толщина N -слоя, которая всегда меньше реальной толщины из-за эффекта близости [33]. Также достаточно большие величины плотности критического тока ВТСП-поликристаллов в сильных магнитных полях объясняются наличием

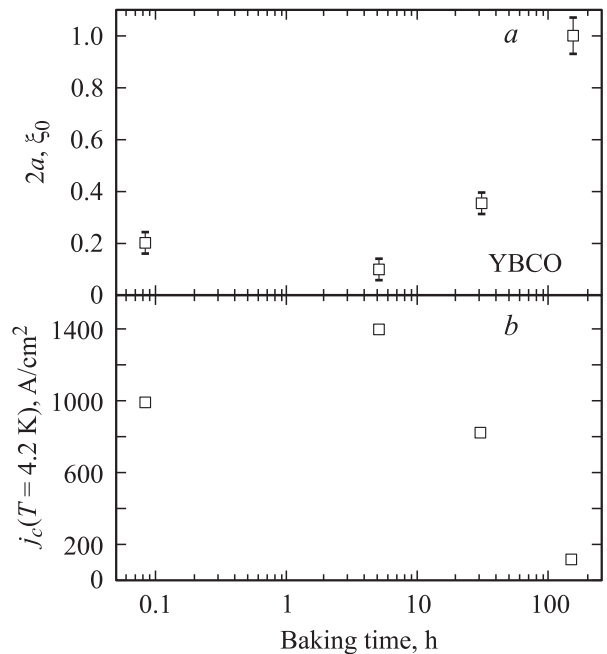


Рис. 2. Эффективная протяженность межгранульных границ $2a$ (в единицах ξ_0) в исследованных ВТСП с различным временем обжига (a) и плотность критического тока j_c при 4.2 K (b) в зависимости от времени обжига поликристаллов (логарифмическая шкала).

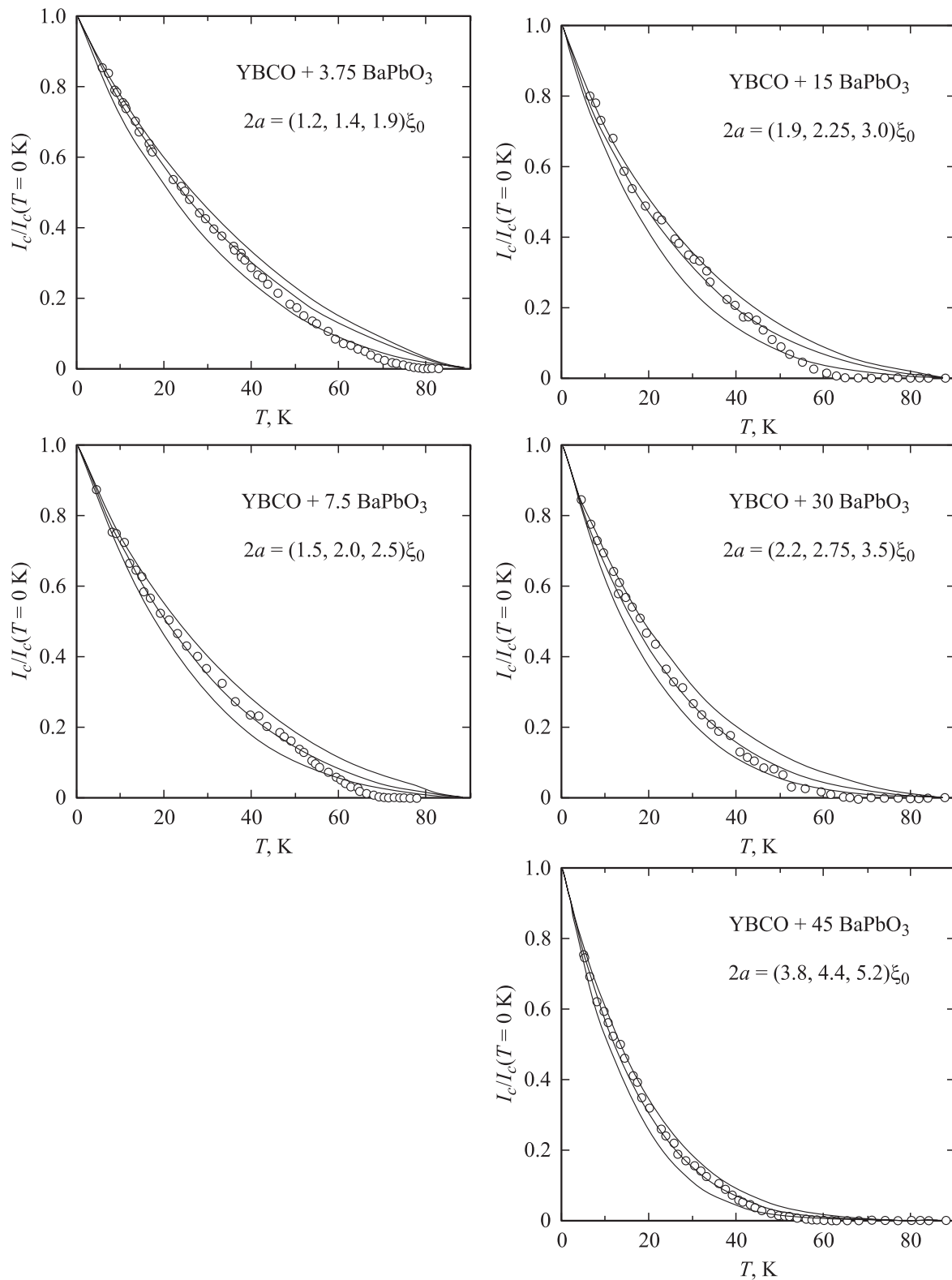


Рис. 3. Температурные зависимости плотности критического тока композитов YBCO + V BaPbO₃ (точки) и теоретические зависимости $I_c(T)$ для S–N–S-перехода [7] (сплошные кривые), нормированные на значение $I_c(T = 0\text{ K})$. Значения $2a$ для теоретических зависимостей указаны на рисунке. Меньшему значению $2a$ соответствует верхняя теоретическая кривая.

„сверхпроводящих закороток“ между кристаллитами [5], т.е. межкристаллитными границами чрезвычайно малой протяженности. Продолжительный обжиг приводит к увеличению эффективной протяженности межгранульных границ до $8.5 \pm 1.0 \text{ \AA}$ (30 h) и $24 \pm 2 \text{ \AA}$ (150 h). Такая трансформация границ вполне вероятна в исследованных поликристаллах, поскольку, как показывают результаты электронной микроскопии [30], продолжительный обжиг приводит к значительному увеличению размеров кристаллитов. На рис. 2, *b* приведена зависимость j_c при 4.2 К от времени обжига ВТСП. Видно, что образцы с меньшей эффективной протяженностью межгранульных границ обладают наибольшими значениями плотности критического тока. Таким образом, результаты проведенной обработки экспериментальных зависимостей $I_c(T)$ показывают, что в поликристаллах ВТСП эффективная протяженность границ в лучших образцах может достигать нескольких ангстрем. Подобные оценки протяженности границ между кристаллитами были получены другими авторами на пленках [3], бикристаллах [40,41], а также нами в ходе анализа экспериментальных ВАХ поликристаллов ВТСП [9,39]. Очевидно, что для получения максимального критического тока нужен оптимальный по продолжительности обжиг. Для исследованной авторами серии образцов ВТСП с различным временем обжига оптимальным режимом является пятичасовой окончательный обжиг.

3.2. Композиты $Y_{3/4}Lu_{1/4}Ba_2Cu_3O_7 + BaPbO_3$. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости $I_c(T)$ композитов $YBCO + V BaPbO_3$. Прежде всего отметим, что все зависимости имеют положительный знак кривизны, подобно чистому ВТСП с продолжительным временем обжига (рис. 1). Температура исчезновения критического тока уменьшается с ростом концентрации $BaPbO_3$ в композите. Сплошные кривые на рис. 3 являются результатом наилучшей подгонки (средние кривые) эксперимента к теории [7]. Крайние теоретические зависимости на рис. 3 имеют тот же смысл, что и для рис. 1, т.е. иллюстрируют границы разумной подгонки. Наблюдается хорошее согласие теории и эксперимента в широкой области температур. На рис. 4, *a* приведена зависимость параметра $2a$, полученного при условии наилучшей подгонки эксперимента, от объемной концентрации несверхпроводящего компонента композитов. Получился ожидаемый и логичный результат: эффективная протяженность N -границ между кристаллитами растет с увеличением объемной концентрации $BaPbO_3$. Используя значение $\xi_0 = 24 \text{ \AA}$ [34], получаем, что при возрастании объемной концентрации $BaPbO_3$ в композите с 3.75 до 45% эффективная протяженность межкристаллитных границ из $BaPbO_3$ монотонно возрастает от 35 ± 5 до $105 \pm 7 \text{ \AA}$. На рис. 4, *b* показана зависимость j_c при 4.2 К (логарифмическая шкала) от объемной концентрации $BaPbO_3$. Как и в случае с чистыми ВТСП (рис. 2), уменьшение величины j_c ($T = 4.2 \text{ К}$) происходит из-за увеличения эффективной протяженности межкристаллитных границ.

3.3. Зависимость j_c ($T = 4.2 \text{ К}$) от эффективной протяженности границ. На рис. 5 приведена зависимость j_c при 4.2 К (логарифмическая шкала) от величины $2a$, полученной при условии наилучшей подгонки экспериментальных зависимостей $I_c(T)$. Точки неплохо укладываются на прямую, хотя в обла-

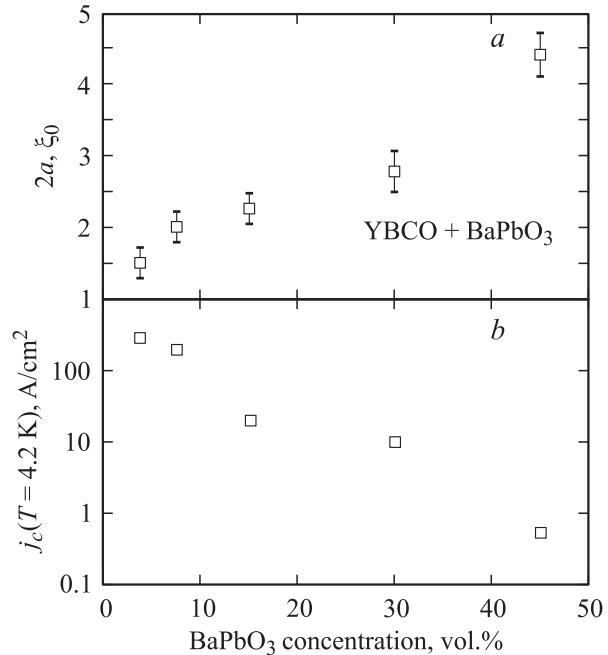


Рис. 4. Значения эффективной протяженности N -прослоек из $BaPbO_3$ $2a$ (в единицах ξ_0) в композитах $YBCO + V BaPbO_3$ (*a*) и плотности критического тока j_c при 4.2 К (*b*) в зависимости от объемной концентрации $BaPbO_3$ в композите.

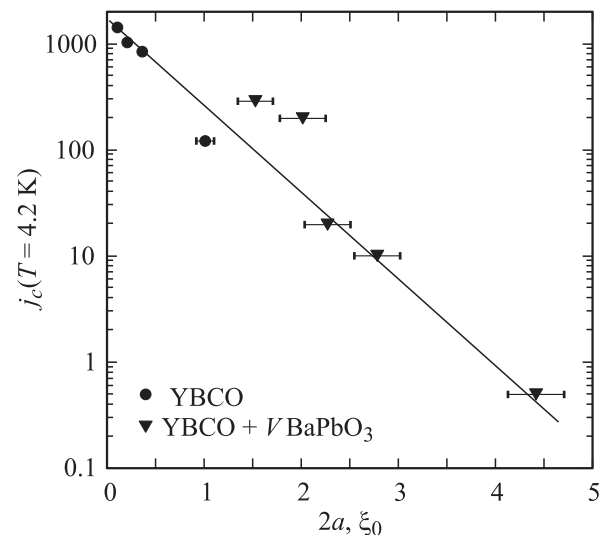


Рис. 5. Зависимость плотности критического тока j_c при 4.2 К (логарифмическая шкала) от эффективной протяженности N -границ (в единицах ξ_0) между ВТСП-кристаллитами для исследованных образцов. Прямая линия — наилучшая подгонка экспоненциальной зависимостью.

сти $2a = (1-2)\xi_0$ (данные для образцов YBCO-150 h, YBCO + 3.75BaPbO₃, YBCO + 7.5BaPbO₃) наблюдается значительный разброс. Тем не менее можно заключить, что зависимость j_c от толщины N -границ между кристаллитами ВТСП имеет вид $j_c \sim \exp(-2a)$, характерный для многих джозефсоновских структур [31,36] на основе как низкотемпературных, так и высокотемпературных сверхпроводников.

Таким образом, авторы провели анализ температурных зависимостей критического тока гетерогенных ВТСП иттриевой системы двух типов: с „естественными“ межгранульными границами и с искусственно созданными N -прослойками из ВаРbO₃. Продемонстрировано хорошее согласие между экспериментом и теорией [7], рассматривающей андреевское отражение в $S-N-S$ -переходах. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей $I_c(T)$ позволило оценить эффективную протяженность металлических границ $2a$ между ВТСП-кристаллитами. Эти значения находятся в разумном согласии с литературными данными: продолжительный отжиг приводит как к укрупнению ВТСП-кристаллитов, так и к увеличению протяженности межкристаллитных границ. В случае композитов ВТСП + ВаРbO₃ имеет место монотонный рост величины $2a$ при увеличении содержания несверхпроводящего компонента. Обнаружено, что величина плотности критического тока объемных ВТСП уменьшается с ростом эффективной протяженности межкристаллитных границ по экспоненциальному закону. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для анализа транспортных свойств поликристаллических сверхпроводников помимо рассмотрения перколяционного характера протекания тока необходим учет внутренних физических процессов в слабых связях. Теория [7], рассматривающая андреевское отражение, позволила не только получить количественные оценки, но и объяснить нетривиальный факт — смену знака кривизны температурной зависимости критического тока при увеличении эффективной протяженности межкристаллитных границ в поликристаллическом ВТСП.

Авторы благодарят Р. Кюммеля (R. Kümmel, Universität Würzburg, Germany) за полезные дискуссии и внимание к работе, А.Д. Васильева и А.Ф. Бовину за рентгеноструктурные исследования, Л.И. Квеглиц за электронную микроскопию образцов, В.В. Валькова, А.Д. Балаева и К.А. Шайхутдинова за обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] Е.З. Мейлихов. УФН **163**, 27 (1993).
- [2] M. Prester. Supercond. Sci. Technol. **11**, 333 (1998).
- [3] J.W.C. De Vries, G.M. Stolmann, M.A.M. Gijjs. Physica C **157**, 406 (1989).
- [4] З. Дамм, Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, В.В. Шпейзман. ФТТ **36**, 2465 (1994).
- [5] J. Jung, M.A.-K. Mohamed, I. Isaak, L. Friedrich. Phys. Rev. B **49**, 12 188 (1994).
- [6] B. Andrzejewski, E. Guilmeau, Ch. Simon. Supercond. Sci. Technol. **14**, 904 (2001).
- [7] U. Gunsenheimer, U. Schüssler, R. Kümmel. Phys. Rev. B **49**, 6111 (1994).
- [8] M.I. Petrov, S.N. Krivomazov, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. Solid State Commun. **82**, 453 (1992).
- [9] М.И. Петров, Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд, К.А. Шайхутдинов, К.С. Александров. ФТТ **44**, 1179 (2002).
- [10] R.J. Soulen, Jr., T.L. Francavilla, W.W. Fuller-Mora, M.M. Miller, C.H. Joshi, W.L. Carter, A.J. Rodenbush, M.D. Manlief, D. Aized. Phys. Rev. B **50**, 478 (1994).
- [11] M.I. Petrov, D.A. Balaev, S.V. Ospishchev, K.A. Shaihtudinov, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. Phys. Lett. A **237**, 85 (1997).
- [12] M.I. Petrov, D.A. Balaev, D.M. Gohfeld, S.V. Ospishchev, K.A. Shaihtudinov, K.S. Aleksandrov. Physica C **314**, 51 (1999).
- [13] М.И. Петров, Д.А. Балаев, К.А. Шайхутдинов, К.С. Александров. ФТТ **41**, 969 (1999).
- [14] K. Kitazawa, A. Katsui, A. Toriumi, S. Tanaka. Solid State Commun. **52**, 459 (1984).
- [15] А.М. Габович, Д.П. Моисеев. УФН **150**, 599 (1986).
- [16] A. Furusaki, M. Tsukada. Phys. Rev. B **43**, 10 164 (1991).
- [17] K. Bottcher, Th. Kopp. Phys. Rev. B **55**, 11 670 (1997).
- [18] A.A. Golubov, M.Yu. Kupriyanov, E. Il'ichev. Rev. Mod. Phys. **76**, 411 (2004).
- [19] T.M. Klapwijk, G.E. Blonder, M. Tinkham. Physica B **109 & 110**, 1657 (1982).
- [20] R. Kümmel, U. Gunsenheimer, R. Nicolsky. Phys. Rev. B **42**, 3992 (1990).
- [21] T.P. Deveraux, P. Fulde. Phys. Rev. B **47**, 14 638 (1993).
- [22] U. Gunsenheimer, A.D. Zaikin. Phys. Rev. B **50**, 6317 (1994).
- [23] D. Averin, A. Bardas. Phys. Rev. Lett. **75**, 1831 (1995).
- [24] H.X. Tang, Z.D. Wang, J.X. Zhu. Phys. Rev. B **54**, 12 509 (1996).
- [25] R.A. Riedel, Li-Fu Chang, P.F. Bagwell. Phys. Rev. B **54**, 16 082 (1996).
- [26] E.N. Bratus', V.S. Shumeiko, E.V. Bezuglyi, G. Wendin. Phys. Rev. B **55**, 12 666 (1997).
- [27] E.V. Bezuglyi, E.N. Bratus', V.S. Shumeiko, G. Wendin, H. Takayanagi. Phys. Rev. B **62**, 14 439 (2000).
- [28] L.A.A. Pereira, R. Nicolsky. Physica C **282–287**, 2411 (1997).
- [29] E. Meilikhov, Yu. Gershanov. Physica C **157**, 431 (1989).
- [30] M.I. Petrov, D.A. Balaev, B.P. Khrustalev, K.S. Aleksandrov. Препринт Ин-та физики им. Киренского СО РАН № 752 Ф. Красноярск (1994). 13 с.
- [31] A. Barone, J. Paterno. Physics and application of the Josephson effect. Wiley, N.Y. (1982). [А. Бароне, Дж. Патерно. Эффект Джозефсона. Мир, М. (1984). 639 с.].
- [32] H.S. Gamchi, G.J. Russel, K.N.R. Taylor. Phys. Rev. B **50**, 12 950 (1994).
- [33] К.К. Лихарев. Rev. Mod. Phys. **51**, 101 (1979).
- [34] Л.П. Горьков, Н.Б. Копнин. УФН **156**, 117 (1988).
- [35] D. Larbalestier, A. Gurevich, D.M. Feldmann, A. Polyanskii. Nature **414**, 368 (2001).
- [36] И.О. Кулик, А.Н. Омелянчук. ФНТ **3**, 945 (1977).
- [37] М.Ю. Куприянов. ФНТ **7**, 700 (1981).
- [38] K.A. Delin, A.W. Kleinsasser. Supercond. Sci. Technol. **9**, 227 (1996).
- [39] М.И. Петров, Д.А. Балаев, Д.М. Гохфельд, К.А. Шайхутдинов. ФТТ **45**, 1164 (2003).
- [40] J. Manhart, P. Chaudhary, D. Dimos, C.C. Tsuei, T.R. McGuire. Phys. Rev. Lett. **61**, 2476 (1988).
- [41] S. Benacka, V. Strbik, S. Chromik, R. Adam, M. Darula, S. Gazi. ФНТ **24**, 621 (1998).