

НАПРЯЖЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК ИТТРИЙ-БАРИЕВОВОГО КУПРАТА: ИССЛЕДОВАНИЕ НА СКАНИРУЮЩЕМ ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ

В данной статье, используя метод туннельной микроскопии и спектроскопии, исследуется доменная структура напряженных тонких высокотемпературных сверхпроводящих пленок иттрий-бариевого купрата. Граница между доменами интерпретируется малоуровневым деформационным потенциалом, в котором локализируются электроны. Наличие заряженной границы приводит к резкому снижению плотности критического тока сверхпроводящих пленок.

Введение

Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП) является интенсивно развивающимся разделом физики конденсированного состояния. Несмотря на свою уже 20-летнюю историю, многие вопросы, в частности вопрос о природе ВТСП, остаются до сих пор открытыми [1; 2]. В ряду вопросов, требующих на наш взгляд внимания, является проблема напряженных состояний [3–5] и их влияние на свойства сверхпроводников [6–8], тем более что открываются новые прикладные возможности – создание на основе напряженных ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) пленок сверхчувствительных датчиков слабых магнитных полей СКВИДов (сверхпроводящий квантовый интерферометрический датчик) [9].

Получаемые высококачественные монокристаллические тонкие ВТСП YBCO пленки имеют высокие значения плотности критического тока, достигающие величины 10^7 А/см² [10]. Однако данная величина оказывается слишком большой для изготовления СКВИДов с высокой чувствительностью. Существующие в настоящее время способы подавления плотности критического тока, такие как ступенчатые и бикристаллические переходы [11; 12], сложны в изготовлении. Напряженные пленки, получаемые методом быстрого охлаждения путем замораживания механических напряжений, позволили снизить плот-

ность критического тока до требуемых значений $10^3 \div 10^5$ А/см² [6] и по своим параметрам и свойствам полностью подходят для создания высокочувствительных СКВИДов [9].

Структура напряженных пленок

Напряженные ВТСП YBCO пленки напыляются методом лазерной абляции на подложки $LaAlO_3$ [13]. Напряженное состояние в YBCO пленках формируется методом быстрого охлаждения: при обычном выращивании монокристаллических пленок время остывания после процесса напыления составляет 30 мин, в случае напряженных пленок 3–10 мин, т. е. производится быстрая закалка. Уменьшение времени остывания уменьшает плотность критического тока [6]. Механические напряжения, возникшие в тонкой сверхпроводящей пленке из-за рассогласования параметров кристаллической решетки и коэффициентов термического расширения материалов пленки и подложки, не успевают релаксировать. Напыленная пленка находится в структурно-неоднородном состоянии после процесса напыления. Под воздействием упругого напряжения в структурно-неоднородном материале за счет концентраторов нано- и мезоскопических масштабов формируется неоднородное поле напряжений. На начальной стадии развития пластической деформации

в направлениях максимальных касательных напряжений формируются полосы локализованного сдвига. В областях, ограниченных полосами локализованной деформации внутри структурных элементов деформации, материал оказывается слабо деформированным и по структуре близок к монокристаллическим пленкам. Дальнейшее деформирование приводит к нарастанию локализованной пластической деформации, смещению и повороту блоков материала. Весь материал оказывается фрагментированным. Разрушение материала в дальнейшем происходит по границам сформировавшихся блоков [14]. Таким образом, напряженная пленка состоит из «доменов напряжений» – области с правильной кристаллической структурой. Границы между доменами являются областями с нарушенной кристаллической структурой и представляют собой деформационную потенциальную яму, в которой локализуются электроны. Естественно, что протекающий через такую границу сверхпроводящий ток будет взаимодействовать с электронами потенциальной ямы, что и обуславливает снижение плотности критического тока.

Эксперимент

Исследование напряженных ВТСП YBCO пленок проводилось с помощью сканирующего туннельного микроскопа СММ-2000Т (СТМ). На рабочий столик микроскопа помещалась напряженная пленка с известным

значением плотности критического тока, и производили сканирование выбранной области размером 6×6 мкм. Оптимальное значение тока для процесса сканирования составляло 10 нА, напряжения – 720 мВ, увеличение – 16 400 раз.

Поскольку СТМ позволяет определить зависимость туннельного тока от прикладываемого напряжения между иглой микроскопа и изучаемой поверхностью, т. е. производить измерение вольтамперных характеристик (ВАХ), был разработан способ [15], позволяющий определять точки на поверхности исследуемой YBCO пленки, в которых локализуется дефект с электронами. В случае идеальной поверхности ВТСП YBCO структуры ВАХ будет линейной, однако любые изменения типа проводимости, распределения энергетических уровней электронов в точках образца, связанные либо с изменением локального состава материала поверхности образца, либо с наличием дополнительных электрических потенциалов в локальных точках поверхности образца, влияют на вид ВАХ [16].

Методика эксперимента заключалась в следующем: на отсканированной области производилось измерение ВАХ с шагом 0,3–0,5 мкм. При каждом эксперименте делалось 160–200 измерений.

В результате были получены следующие зависимости туннельного тока, варьирующиеся от металлической и полупроводниковой зависимостей (рис. 1) до ВАХ, обладающих характерными максимумами (рис. 2). Видно, что

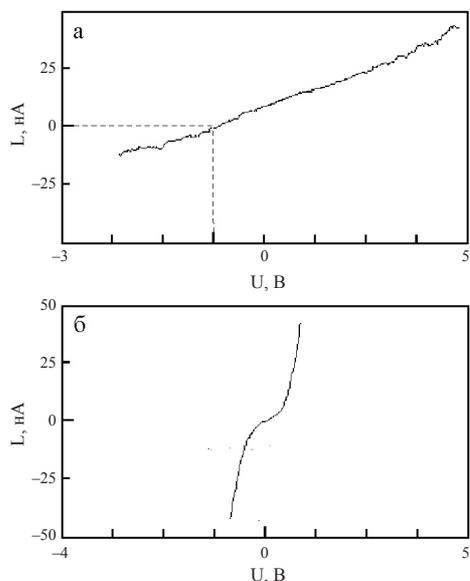


Рис. 1. Вольтамперные характеристики: а – металлическая, б – полупроводниковая

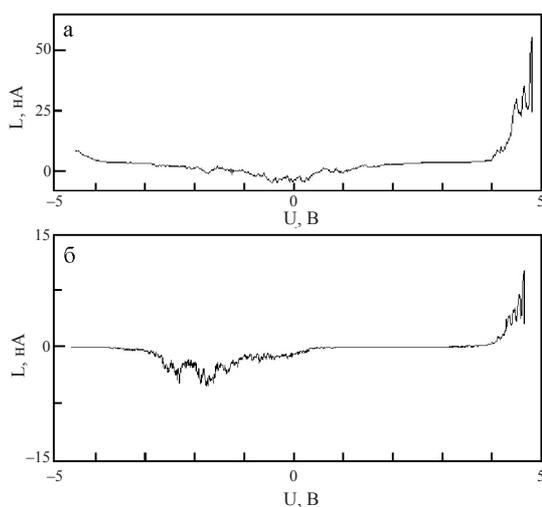


Рис. 2. Туннельная ВАХ междоменной границы с различным числом максимумов: а – $j_c = 2,0 \cdot 10^5$ А/см²; б – $j_c = 3,4 \cdot 10^4$ А/см²

исследуемая сверхпроводящая пленка имеет сложный состав и структуру, обусловленные локализацией различных микроструктур.

Из проведенных измерений видно, что ВАХ действительно обладают характерными максимумами, число которых изменяется от 1 до 5 в зависимости от плотности критического тока (рис. 3). Подобные ВАХ получаются в 10–30 % случаях измерений (см. таблицу). Пики возникают при напряжении от 1 до 5 В, что значительно меньше энергии ионизации атомов и позволяет утверждать, что эта ВАХ соответствует деформационному потенциалу. Число пиков на ВАХ соответствует числу уровней в потенциальной яме, причем число этих уровней растет с уменьшением плотности критического тока. Подобные вольтамперные характеристики были названы «туннельными ВАХ междоменной границы» [16].

Основные характеристики напряженных ВТСП YBCO пленок

Плотность критического тока j_{c0} , А/см ²	Количество туннельных ВАХ междоменной границы, %	Средний размер доменов $\langle d \rangle$, мкм
$4,5 \cdot 10^3$	27,77	1,12
$5,2 \cdot 10^3$	24,32	1,15
$3,4 \cdot 10^4$	22,20	1,31
$1,2 \cdot 10^5$	17,42	1,60
$2,0 \cdot 10^5$	16,27	1,65
$5,0 \cdot 10^5$	15,38	2,03
$6,8 \cdot 10^5$	14,17	2,10

Все координаты (рис. 4) и число точек (см. таблицу) с туннельной ВАХ междоменной границы были зафиксированы для каждой отсканированной напряженной пленки. Из таблицы видно, что число характерных ВАХ увеличивается с уменьшением плотности критического тока. Зная расположение точек с характерной ВАХ, можно оценить форму и размер доменов напряжения, считая, что точки с характерными ВАХ соответствуют междоменной границе. Проведенные расчеты показывают, что средний размер доменов напряжений составляет $1,0 \div 2,1$ мкм и увеличивается с увеличением плотности критического тока.

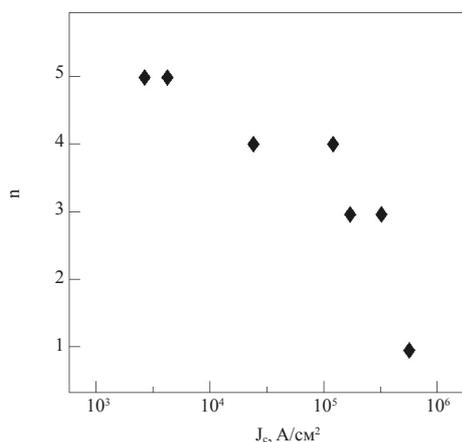


Рис. 3. Зависимость числа максимумов на туннельной ВАХ междоменной границы от плотности критического тока $n(j_c)$

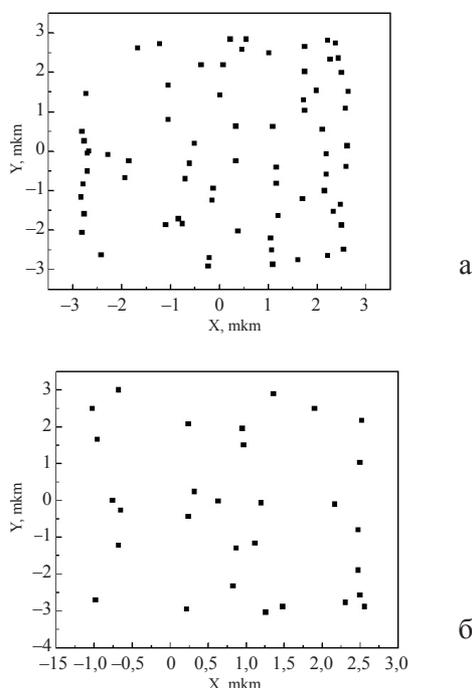


Рис. 4. Координаты точек с туннельной ВАХ междоменной границей для пленок с плотностью критического тока: а – $4,5 \cdot 10^3$ А/см², б – $3,4 \cdot 10^4$ А/см²

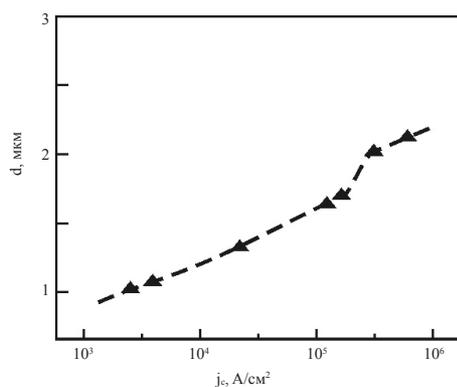


Рис. 5. Зависимость размера доменов напряжений от плотности критического тока

Заключение

Таким образом, напряженные пленки имеют доменную структуру, границы между которыми представляют собой малоуровневую потенциальную яму. Переход между монокристаллическими и напряженными пленками является структурно фазовым, а именно – от бездефектной структуры к доменной.

Наличие именно заряженной междоменной границы приводит к существенному снижению плотности критического тока от 10^7 А/см² до $10^3\div 10^5$ А/см².

Список литературы

1. Гинзбург В. Л. Сверхпроводимость: вчера, сегодня, завтра, послезавтра // УФН. 2000. Т. 170, № 6. С. 619–630.
2. Изюмов Ю. А. Спин-флуктуационный механизм высокотемпературной сверхпроводимости и симметрия параметра порядка // УФН. 1999. Т. 169, № 3. С. 225–254.
3. Ovid'ko I. A., Sheinerman A. G., Skiba N. V. Competing relaxation mechanisms in strained semiconducting and superconducting films // J. Phys.: Cond. Mat. 2003. Vol. 15. P. 1173–1181.
4. Пашицкий Э. А., Викарюк В. И., Рябченко С. М. и др. Температурная зависимость критического тока в высокотемпературных сверхпроводниках малоугловыми границами разделов кристаллических блоков // ФНТ. 2001. Т. 27, № 2. С. 131–139.
5. Abrecht M., Ariosa D., Cloetta D. et al. Strain and High Temperature Superconductivity: Unexpected Results from Direct Electronic Structure Measurements in Thin Films // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91. No. 5. P. 057002.
6. Югай К. Н., Муравьев А. Б., Серопян Г. М. и др. Тонкие ВТСП пленки YBCO с замороженными напряжениями // ФНТ. 2006. Т. 32, № 1. С. 75–82.
7. Chen X. J., Lin H. Q., Gong C. D. Thickness dependence of the superconductivity transition temperature of La_{2-x}Sr_xCuO₄ // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 17. No. 14. P. 9782–9785
8. Salluzzo M., Aruta C., Ausanio G. et al. Effect of strain on the structure and critical temperature in superconducting Nd-doped YBa₂Cu₃O_{7-δ} // Phys. Rev. B. Vol. 66. P. 184518.
9. Yugay K. N., Muravjev A. B., Yugay K. K. et al. SQUIDS on the base of strained YBCO films // J. of Supercond. 2004. Vol. 17. No. 6. P. 755–760.
10. Югай К. Н., Серопян Г. М., Скутин А. А. и др. Макроструктура высокотемпературных сверхпроводящих YBaCuO пленок, выращенных методом лазерной абляции // ЖТФ. 1998. Т. 98, № 2. С. 48–51.
11. Makhlin Y., Schoon G., Shnirman A. Quantum-state engineering with Josephson-junction devices // Rev. Mod. Phys. 2001. Vol. 73. No. 2. P. 357–400.
12. Koelle D., Kleiner R., Ludwig F. et al. High-transition-temperature superconducting quantum interference devices // Rev. Mod. Phys. 1999. Vol. 71. No. 3. P. 631–686.
13. Демин А. В., Канев Е. А., Курняк О. Л. и др. Температурная зависимость критического тока ВТСП пленок, выращенных методом лазерной абляции // Вестн. Омск. гос. ун-та. 1998. Вып. 3. С. 37–39.
14. Панин В. Е., Коротаев А. Д., Макаров П. В. и др. Физическая мезомеханика материалов // Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 9. С. 8–36.
15. Патент RU 2239814, МПК 7 G 01 N 13/12. Способ определения областей с нарушенной кристаллической структурой в материалах с металлической проводимостью / К. Н. Югай, К. Б. Коноваленко, С. А. Сычев и др.; Омск. гос. ун-т. № 2002119300; Заявл. 24.07.2002; Опубл. 10.11.2004; Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» № 31.
16. Югай К. Н., Коноваленко К. Б., Муравьев А. Б. и др. Исследование напряженных состояний пленок YBCO методом туннельной спектроскопии // Вестн. Омск. гос. ун-та. 2002. Т. 25, № 3. С. 21–23.

Материал поступил в редколлегию 10.02.2007