

05.5

## Особенности вольт-амперных характеристик джозефсоновской среды высокотемпературного сверхпроводника YBCO

© М.А. Васютин

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск  
E-mail: vasyutinm@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2013 г.

Исследовано влияние слабого магнитного поля ( $H < 150$  Ое) на вольт-амперные характеристики (ВАХ) высокотемпературного сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) вблизи температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Обнаружены узкие температурные области ( $< 0.2$  К) резкого изменения вида ВАХ (излом) при  $H < 30$  Ое. Омический ход сменялся квадратичной зависимостью напряжения от тока в области нескольких миллиампер. При более высоких температурах происходило размытие излома ВАХ. Температура его наблюдения находилась ниже температуры нулевого критического тока образца. Выше определенного тока наблюдалось эквивалентное влияние температуры и магнитного поля на ВАХ YBCO. Экспериментальные результаты объяснены резким уменьшением критических токов джозефсоновских межгранулярных контактов под действием магнитного поля и образованием несвязанных по параметру порядка сверхпроводящих гранул под действием тока. Определены характерные токи перехода джозефсоновской межгранулярной среды к некогерентному состоянию. Оценены первые критические поля YBCO.

Интерес к джозефсоновской среде высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обусловлен многими причинами, например, возможностью использования ВТСП в качестве источника терагерцового излучения [1], многоконтактного СКВИДа [2], одноэлектронного транзистора [3] и др. Наименее изученными при этом остаются процессы, происходящие в ВТСП-структурах в магнитных полях вблизи температуры перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$ , что обусловлено трудностью учета сильных термических флуктуаций и многообразием магниторезистивных эффектов [4]. В данной статье приводятся ре-

зультаты исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) вблизи  $T_c$  в слабых магнитных полях, выявляющие особенности джозефсоновской среды YBCO в определенных температурных интервалах.

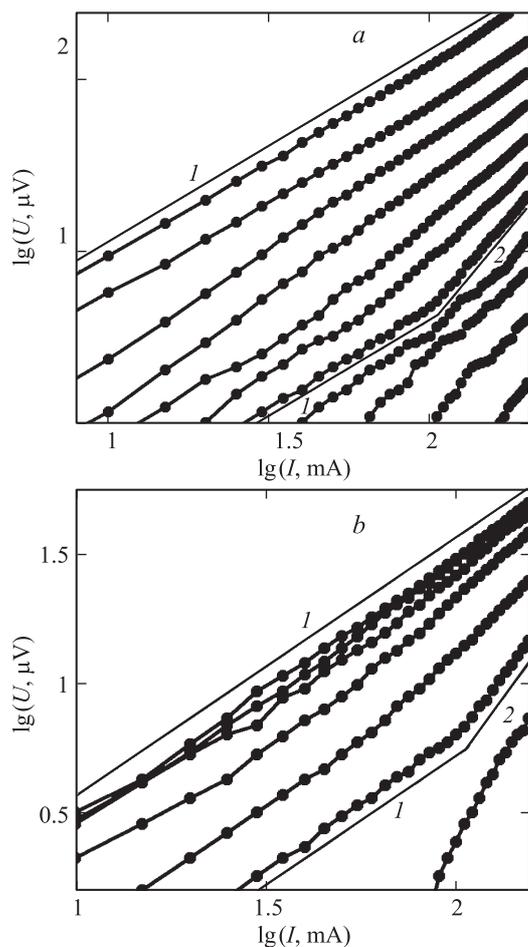
Поликристаллы YBCO были приготовлены по обычной „керамической“ технологии, имели  $T_c \approx 91.0\text{--}92.0\text{ К}$ , ширину перехода  $\Delta T_c \approx 1.0\text{--}1.5\text{ К}$ . Измерения ВАХ проводились на постоянном токе четырехконтактным методом в промежуточном состоянии (вблизи температуры перехода от ненулевого критического тока  $I_c$  к нулевому). Сопротивление контактов  $R \leq 3\text{ м}\Omega$ . Сила тока менялась в пределах  $0 \leq I \leq 200\text{ мА}$ . Предварительные результаты на подобных образцах и методика измерений опубликованы в работах [5–7].

На рис. 1, *a* показаны ВАХ поликристалла с  $T_c = 91.57\text{ К}$  в постоянном магнитном поле  $H = 1.5\text{ Ое}$  при температурах от 88.57 до 91.43 К. При температуре  $T = 89.72\text{ К}$  видно резкое изменение ВАХ (излом), линейная зависимость сменяется квадратичной, в то время как ВАХ при других температурах демонстрируют более плавные переходы. На рис. 1, *b* показаны ВАХ того же поликристалла при температуре  $T = 89.72\text{ К}$  в постоянных магнитных полях  $0 \leq H \leq 121\text{ Ое}$ . Видно, что действие магнитного поля эквивалентно действию температуры до полей порядка 20 Ое. Дальнейшее увеличение  $H$  слабо влияет на вид ВАХ. Подобные ВАХ наблюдаются во всем исследованном диапазоне токов, температур и магнитных полей.

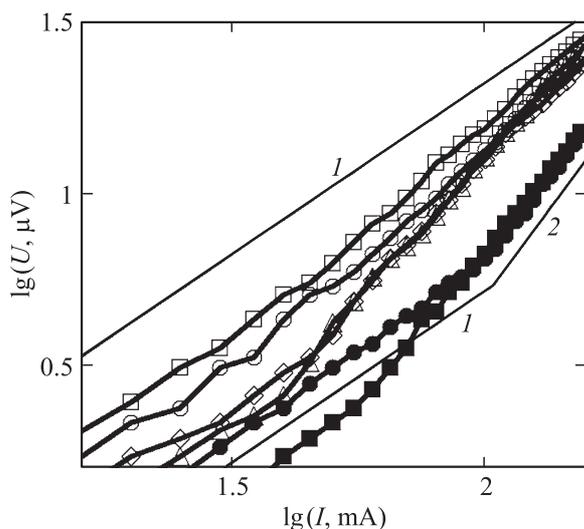
На рис. 2 представлены все наблюдаемые ВАХ с изломом. Наиболее ярко изменение наклона ВАХ проявляется в полях, меньших 30–40 Ое. Кроме этого, наблюдается наложение некоторых ВАХ, начиная с определенного тока. В магнитном поле Земли излома нет.

Изменение вида ВАХ с температурой объясняется представлением о двух режимах диссипации энергии [8]. В первом случае она происходит при ненулевом критическом токе  $I_c$ , во втором — когда  $I_c = 0$ . Первый режим устанавливается при низких температурах и магнитных полях; на рис. 1 это состояние идентифицируется по отрицательной кривизне ВАХ (кривые выпуклы). Второй режим отличается положительной кривизной (кривые вогнуты) и наблюдается при более высоких температурах и магнитных полях. На рис. 1 линией, разделяющей два резистивных режима, можно считать изотерму  $T = 89.43\text{ К}$ .

Наличие изломов ВАХ на рисунках (при токе  $I \approx 100\text{ мА}$  для  $T = 89.72\text{ К}$  и  $H = 1.5\text{ Ое}$ ; при токе  $I \approx 60\text{ мА}$  для  $T = 89.14\text{ К}$  и

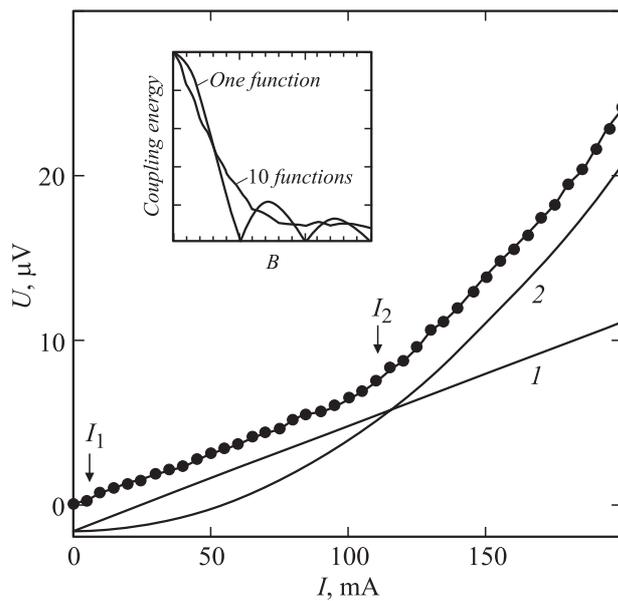


**Рис. 1.** *a* — ВАХ поликристалла YBCO в постоянном магнитном поле  $H = 1.5 \text{ Oe}$ , увеличение температуры с правого нижнего угла к левому верхнему: 88.57 К, 88.86, 89.14, 89.43, 89.72 К (излом), 90.00 К 90.28, 90.57, 90.86, 91.14, 91.43 К. Прямые линии, отмеченные цифрой 1, — линейная зависимость, цифрой 2 — квадратичная; *b* — ВАХ поликристалла YBCO при температуре  $T = 89.72 \text{ K}$  в постоянных магнитных полях, увеличивающихся с правого нижнего края к левому верхнему: 0 Oe, 1.5 (излом), 4.5, 11, 22, 44, 121 Oe. Прямые линии, обозначенные цифрой 1, — линейная зависимость, цифрой 2 — квадратичная.



**Рис. 2.** ВАХ поликристалла YBCO: черные круги —  $T = 89.72$  К,  $H = 1.5$  Ое; черные квадраты —  $T = 89.14$  К,  $H = 4.5$  Ое; светлые ромбы —  $T = 88.57$  К,  $H = 11$  Ое; светлые треугольники —  $T = 87.14$  К,  $H = 22$  Ое; светлые круги —  $T = 85.72$  К,  $H = 44$  Ое; светлые квадраты —  $T = 82.86$  К,  $H = 121$  Ое. Прямые линии, обозначенные цифрой 1, — линейная зависимость, цифрой 2 — квадратичная.

$H = 4.5$  Ое; при токе  $I \approx 50$  мА для  $T = 88.57$  К и  $H = 11$  Ое; при токе  $I \approx 40$  мА для  $T = 87.14$  К и  $H = 22$  Ое) можно объяснить резким уменьшением критических токов джозефсоновских контактов поликристалла в магнитных полях порядка нескольких эрстед (Ое). Если в отсутствие поля разница величин критических токов разных контактов и их температурный разброс являются значительными, то при наличии даже слабого магнитного поля эти различия сглаживаются и формируются условия одновременного разрушения сверхпроводящего состояния большого числа контактов. На вставке рис. 3, взятой из работы [9], показана зависимость энергии связи (а значит и критического тока) от магнитного поля для одного и десяти джозефсоновских контактов (вставка имеет схематический, пояснительный характер). Сглаживание происходит при нескольких эрстедах (Ое).



**Рис. 3.** ВАХ поликристалла YBCO в постоянном магнитном поле  $H = 1.5$  Oe при температуре  $T = 89.72$  K (черные круги). Сплошные линии означают линейную (1) и квадратичную (2) зависимости. На вставке показана магнитополовая зависимость энергии связи одного и десяти джозефсоновских контактов (из работы [9]).

Для температур наблюдения излома характерно разбиение области изменения магнитного поля на три части:  $H < 10$  Oe,  $10 < H < 30$  Oe,  $H > 30$  Oe (рис. 2). В первой части происходит наложение ВАХ при  $I > 80$  mA, во второй — при  $I > 50$  mA, в третьей части наложения нет.

Полная картина ВАХ при температуре излома иллюстрируется рис. 3. До тока  $I_1$  магнитное поле существует в образце в виде гипервихря, характеризующегося высокой устойчивостью к току. Далее, при токе  $I_1$  гипервихрь начинает распадаться на джозефсоновские вихри [10], и до величины  $I_2$  их движение приводит к линейной ВАХ. Выше  $I_2$  магнитное поле начинает проникать в гранулы поликристалла. Альтернативным объяснением наличия линейного участка ВАХ является

модель центров проскальзывания фазы, реализующаяся в джозефсоновских переходах [11]. Характерных ступенек при этом не наблюдается из-за трехмерного сглаживающего расположения контактов. Наличие прямолинейных участков на рис. 1 (степенные ВАХ) можно объяснить фрактальной структурой YBCO в магнитном поле [12].

Из экспериментальных данных, представленных на рис. 2, можно получить значения первых критических полей  $H_{c1}$  гранул поликристалла YBCO. Используя температурную зависимость  $H_{c1}(T) = H_{c1}(0)[1 - (T/T_c)^2]$ , получим для  $H_{c1}$  при  $T = 77.4$  К, значения, находящиеся в интервале  $11 \text{ Ое} < H_{c1}(T = 77.4 \text{ К}) < 67 \text{ Ое}$ , что согласуется с данными, полученными, например в [13].

## Список литературы

- [1] *Hu X., Lin S.-Z.* // Supercond. Sci. Technol. 2010. V. 23. P. 053 001.
- [2] *Гинзбург С.Л., Накин А.В., Савицкая Н.Е.* // ЖЭТФ. 2012. Т. 141. В. 2. С. 310–318.
- [3] *Gustafsson D., Golubev D., Fogelstrom M., Claeson T., Kubakin S., Bauch T., Lombardy F.* // Nat. Nanotechnol. 2013. V. 8. P. 25–30.
- [4] *Балаев Д.А., Быков А.А., Семенов С.В., Попков С.И., Дубровский А.А., Шайхутдинов К.А., Петров М.И.* // ФТТ. 2011. Т. 53. В. 5. С. 865–874.
- [5] *Васютин М.А., Кузьмичев Н.Д.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 23. С. 5–9.
- [6] *Васютин М.А., Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В., Головашкин А.И., Левченко И.С.* // Прикладная физика. 1995. № 2. С. 51–55.
- [7] *Васютин М.А., Кузьмичев Н.Д.* // Учебный эксперимент в образовании. 2012. № 4. С. 55–60.
- [8] *Аронзон Б.А., Гершианов Ю.В., Мейлихов Е.З., Шапиро В.Г.* // СФХТ. 1989. Т. 2. № 10. С. 83–88.
- [9] *Dubson M.A., Herbert S.T., Galabrese J.J., Harris D.C., Patton B.R., Garland J.C.* // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 60. N 11. P. 1061–1064.
- [10] *Кузьмичев Н.Д.* // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. В. 5. С. 291–295.
- [11] *Gross R., Chaudhari P., Dimos D., Gupta A., Koren G.* // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. N 2. P. 228–231.
- [12] *Васютин М.А.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 16. С. 1–6.
- [13] *Ростами Х.Р.* // ФТТ. 2013. Т. 55. В. 9. С. 1677–1690.