

Экспериментальный метод определения температуры перехода Березинского-Костерлица-Таулеса

Н.Д. Кузьмичёв, М.А. Васютин

Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарёва, 430000 Саранск, Россия

А.И. Головашкин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

В работе показано, что температура T^* появления максимума температурных зависимостей напряжений высших гармоник сигнала отклика, возникающих вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ), обусловленной переходом Березинского-Костерлица-Таулеса (БКТ), совпадает с температурой БКТ-перехода $T_{\text{БКТ}}$.

Нелинейные свойства высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) интенсивно изучаются в настоящее время [1,2 и т.д.]. Кристаллические ВТСП имеют слоистую структуру. Данная особенность кристаллов может при некоторых условиях приводить к БКТ-переходу. В отсутствие внешнего магнитного поля при малых зондирующих токах в монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ [3,4] вблизи температуры T_c перехода в сверхпроводящее состояние наблюдаются нелинейные ВАХ и гармоники сигнала отклика (ГСО) при пропускании через монокристалл переменного и постоянного токов [2,5].

В работе [3] использовались монокристаллы низкого качества с невысоким значением T_c . В работе [4] монокристаллы высокого качества не показали характерного скачка Нельсона-Костерлица из-за невысокой точности эксперимента. Повышение точности традиционных экспериментов в случае с ВТСП по ряду причин является трудно решаемой задачей. Вследствие этого требуются новые методы обнаружения БКТ-перехода в ВТСП.

Большая вероятность проявления двумерной сверхпроводимости в ВТСП монокристаллах обусловлена значительной анизотропией критического магнитного поля и длины когерентности в этих материалах [6-9]. ВАХ образца [6,8,9] будет иметь степенную зависимость $V \sim I^{a(T)}$ с показателем степени, зависящим от температуры.

Зависимость $a(T)$ согласно работе [9] изменяется скачкообразно при температуре перехода Березинского-Костерлица-Таулеса $T_{\text{БКТ}}$ от 3 к 1. Т.е. должен наблюдаться скачкообразный переход от нелинейной ВАХ к линейной, и выше $T_{\text{БКТ}}$ высшие ГСО $V_n(T)$, начиная со второй, должны обращаться в ноль [10]. При этом $T_{\text{БКТ}}$ будет совпадать с температурой максимума высших гармоник T^* . Действительно, максимум в $V_n(T)$ должен наблюдаться при температуре рождения максимального числа пар вихрей, т.е. при $T_{\text{БКТ}}$. При $T > T_{\text{БКТ}}$ энергия взаимодействия вихрей приводит к положительной свободной энергии сверхпроводящего состояния, и

процесс рождения вихрей прекращается. Рожденные до $T_{\text{БКТ}}$ и распаренные под действием тока вихри приводят к линейной ВАХ. Т. о., следуя БКТ-модели, напряжения высших гармоник возрастают до $T_{\text{БКТ}}$ и скачком уменьшаются до нуля выше $T_{\text{БКТ}}$, т.е. исследования высших ГСО позволяют простым способом с высокой точностью определять $T_{\text{БКТ}}$.

Исследуемые монокристаллы $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ размером $\sim 0,03 \times (0,3-1) \times (1-2)$ мм³ имели $T_c \approx 91,9-92,7$ К и ширину перехода $\Delta T_c < 0,3$ К. Измерения ВАХ и напряжений ГСО (модуляционный Фурье-анализ) производились четырехзондовым методом. Более подробно методика эксперимента описана в работах [2,5,10]. Сила постоянного тока I_0 варьировалась в пределах от 0 до 200 мА. Амплитуда переменного тока в пределах $0 \leq i \leq 27$ мА. Частота модуляции ν находилась в интервале от 40 Hz до 10 kHz. В экспериментах частотной зависимости напряжений ГСО не наблюдалось. Большинство экспериментов выполнено на постоянном и переменном токе частотой 1 kHz.

На рисунке 1 приведены температурные зависимости напряжений 1-ой V_1 и 3-ей V_3 гармоник ВАХ, а на рисунке 2 приведены экспериментальные ВАХ на постоянном токе для разных температур монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (образец №1). Аналогичные результаты были получены и на других монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Из рисунка 1 видно, что температурная зависимость 3-ей гармоники имеет вид асимметричного максимума с резким спадом выше температуры максимума T^* и тянущимся "хвостом" в область низких температур.

При $I_0 = 0$ наблюдались только нечетные гармоники, а при $I_0 \neq 0$ и четные гармоники. Температуры максимумов ГСО в пределах ошибки измерений имеют одно и то же значение ($T^* \approx 92,0 \pm 0,1$ К – обр. №1). С ростом значений i , I_0 , а также напряженности H внешнего магнитного поля, приложенного перпендикулярно Cu-O слоям монокристалла, в пределах ошибки не изменяют значения T^* . Увеличение H приводит к подавлению ГСО.

Зависимость $a(T)$ приведена на вставке к рис. 2. Видно, что около 92 К в $a(T)$ наблюдается слабая особенность. На рис. 2 приведены теоретические ВАХ для разных температур. Выше T^* гармоники $V_n(T)$ резко падают (см. рис. 1). Т.е. экспериментально обнаружен ярко выраженный переход от нелинейной ВАХ к линейной. Значение T^* совпадает с температурой, при которой $a(T)=3$.

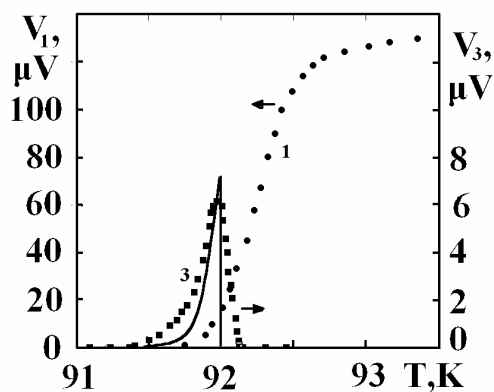


Рис.1. Температурные зависимости напряжений 1^{ой} и 3^{ей} ГСО монокристалла YBCO (образец №1). Измерения гармоник выполнены для $i = 27$ мА и $I_0 = 0$. На рисунке цифрами обозначены номера гармоник. Сплошная кривая соответствует теоретической зависимости напряжения 3^{ей} ГСО.

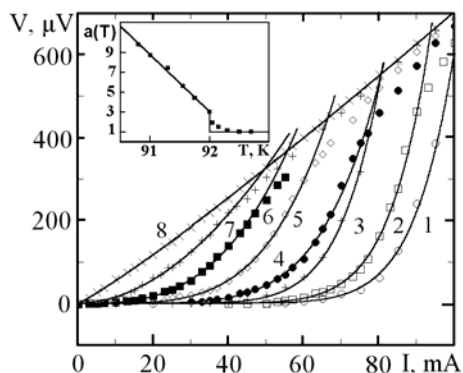


Рис. 2. ВАХ монокристалла YBCO (образец №1), измеренные на постоянном токе для температур: 1 – 90.8 К, 2 – 91.0 К, 3 – 91.3 К, 4 – 91.55 К, 5 – 91.75 К, 6 – 92.0 К, 7 – 92.1 К, 8 – 92.3 К. Сплошные кривые соответствуют степенным ВАХ ($T_c = 92.35$ К). На вставке показана температурная зависимость $a(T)$.

Результаты подгонки температурной зависимости 3-ей ГСО приведены на рис. 1. Видно, что теоретическая кривая ГСО, согласно БКТ модели, имеет тянущийся “хвост” в области $T < T_{\text{БКТ}}$ и резкий скачок до нуля для $T > T_{\text{БКТ}}$. Аналогичные температурные зависимости имеют и остальные высшие гармоники.

Магнитопольные исследования ВАХ монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, проведенные в настоящей работе, показали, что уже в полях $H \sim 10\text{-}20$ Ое ГСО сильно подавляются вследствие того, что внешнее поле препятствует рождению вихрей, магнитный момент которых направлен против этого поля.

Было показано [11], что магнитный поток, переносимый квазидвумерным вихрем (панкейком), является очень малым, а это приводит к слабому магнитному взаимодействию вихрей. Джозефсоновское взаимодействие между Cu-O слоями $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, как было показано, также несущественно влияет на БКТ-переход [12,13].

Оценка собственного магнитного поля измерительного тока на поверхности монокристалла при $I = 40$ мА дает $H_1 \cong I/2d \approx 0,25$ Ое, что меньше поля H_{c1}^\perp [7], которое при 92 К составляет несколько эрстед, и, тем более, поля H_{c2}^\perp . Сопротивление для $T=92$ К, обусловленное движением вихрей вблизи острых краев монокристалла, более чем на порядок меньше нормального и должно приводить к сильному уширению максимумов ГСО в область низких температур, а это противоречит экспериментальным данным (рис. 1,2).

Т. о., показано, что температура T^* максимума зависимостей $V_n(T)$ совпадает с температурой $T_{\text{БКТ}}$ перехода Березинского-Костерлица-Таулеса. Экспериментальные результаты по исследованию ВАХ и ГСО, полученные в настоящей работе, показывают существование БКТ-перехода в монокристаллах $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

1. В. Ф. Хирный, А. А. Козловский, УФН 174, 285 (2004).
2. Н. Д. Кузьмичев, М. А. Васютин, ФТТ 40, 202 (1998).
3. P. C. E. Stamp, L. Forro, C. Ayache et al., Phys. Rev. B38, 2847 (1988).
4. N. C. Yeh, C. C. Tsuei, Phys. Rev. B39, 9708 (1989).
5. М. А. Васютин, Н. Д. Кузьмичев, Письма в ЖТФ 18, 5 (1992).
6. В. В. Шмидт, Введение в физику сверхпроводников. М., МЦНМО, 2000.
7. Н. М. Плакида, Высокотемпературные сверхпроводники. М., МПО, 1996.
8. J. M. Kosterlitz, D. J. Thouless. J. Phys. C. 6, 1181 (1973).
9. V. J. Halperin, D. R. Nelson, J. Low Temp. Phys. 36, 599 (1979).
10. Н. Д. Кузьмичев, ЖТФ 64, 63 (1994).
11. Ю. А. Гененко, СФХТ 5, 1402 (1992).
12. H. Weber, H. Jensen, Phys. Rev. B44, 454 (1991).
13. А. И. Артемов и др., Физ. и техн. выс. давл. 11, 110 (2001).