

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ВЛИЯНИЯ СЛАБОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТОКА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ НИЖЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕХОДА

БЕРЕЗИНСКОГО–КОСТЕРЛИЦА–ТАУЛЕССА

И.Г.Горлова, Ю.И.Латышев

Обнаружено, что сопротивление монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ в плоскости ab ниже T_c одинаковым образом зависит от магнитного поля ($H \parallel c$) и тока ($I \perp c$): $R \propto H^b(T, I)$, $R \propto I^a(T, H)$, причем зависимость $b(T, I)_{I \rightarrow 0} \equiv a(T, H)_{H \rightarrow 0}$ и содержит универсальный скачок при $T = T_c$. Результаты указывают на возможность возбуждения пар вихрей мейс-снеровскими токами.

Последние исследования монокристаллов (МК) наиболее анизотропных систем ВТСП – $\text{BSCCO}^{1, 2}$ и $\text{TBCCO}^{3 1)}$ – обнаружили наличие в них перехода Березинского–Костерлица–Таулесса (БКТ) с температурой перехода T_c на несколько градусов ниже температуры сверхпроводящего перехода Гинзбурга – Ландау T_{c0} . Происхождение перехода БКТ в этих работах связывалось с термическим возбуждением пар $2D$ -магнитных вихрей в отдельных слоях (или парах слоев) CuO , достаточно сильно изолированных в этих соединениях друг от друга. При этом зависимости $R(I)$ при $T < T_c$ были подобны наблюдавшимся в тонких ($2D$) пленках обычных сверхпроводников. По аналогии с тонкими пленками трактовались и степенные зависимости $R(H)^{1, 3}$. Степенной вид $R(H)$ связывался в этих работах с увеличением концентрации $2D$ -вихрей с одной ориентацией магнитного момента с ростом H и уменьшением вследствие этого энергии взаимодействия пар вихрь-антивихрь. В этом предположении степенной показатель $b = d(\ln R) / d(\ln H)$ должен вдвое отличаться от степенного показателя $a = d(\ln R) / d(\ln I)$: $a = 2b$. Однако до последнего времени это соотношение в соединениях BSCCO проверено не было, а на монокристаллических пленках TBCCO проверялось лишь в узком интервале температур ~ 1 К вблизи $T_c^{3, 4}$, где a/b менялось от 0,5 до 2. Исследования, проведенные в настоящей работе на МК BSCCO , показали, что $a = b$. Это указывает на то, что характер $R(H)$ в существенной мере определяется экранирующими токами.

Эксперимент проводился на однофазных монокристаллах BSCCO состава 2212^2 , выращенных по методу⁶ из расплава KCl , с $T_c \approx 87$ К. Удельное электросопротивление в плоскости ab при 300 К составляло ~ 150 мкОм·см, анизотропия проводимости σ_{ab}/σ_c при $T \approx 100$ К достигала $\sim 10^5$.

При заданном значении магнитного поля измерялись серии вольт-амперных характеристик с последовательным дискретным изменением температуры с шагом $< 0,5$ К, затем измерения повторялись при следующем значении H и т. д. Из этих данных извлекались зависимости $R(I)$ при различных фиксированных H и T и $R(H)$ при фиксированных I, T . Как видно из рис. 1, зависимости $R(H)$ (до $H = 30 - 50$ Э) имели степенной характер. Соответствующие температурные зависимости степенного показателя b при разных значениях I изображены на рис. 2б. При малых I ($I < 1$ мА) зависимость $b(T)$ имела в точности такой же вид, как и зависимость $a(T)$ при $H < 0,5$ Э (рис. 2а) с универсальным скачком при $T = T_c$, причем отношение a/b было близко к 1 во всем исследованном температурном интервале (рис. 2в). С ростом I (до $I \sim 50$ мА) зависимости $R(H)$ остаются степенными, так же как и зависимости $R(I)$ при увеличении H (до $H \sim 100$ Э). При этом уменьша-

1) В^{4, 5} были получены также указания на существование перехода БКТ в системах типа YBCO .

ется наклон $a(T)$ и $b(T)$ и постепенно размывается скачок a и b при $T \approx T_c$ (рис. 2). Сравнение величин H и I , приводящих к одинаковому уменьшению a и b , показало, что между ними существует линейная связь $I = kH$ с константой $k \approx 2,5$ мА/Э (рис. 3).

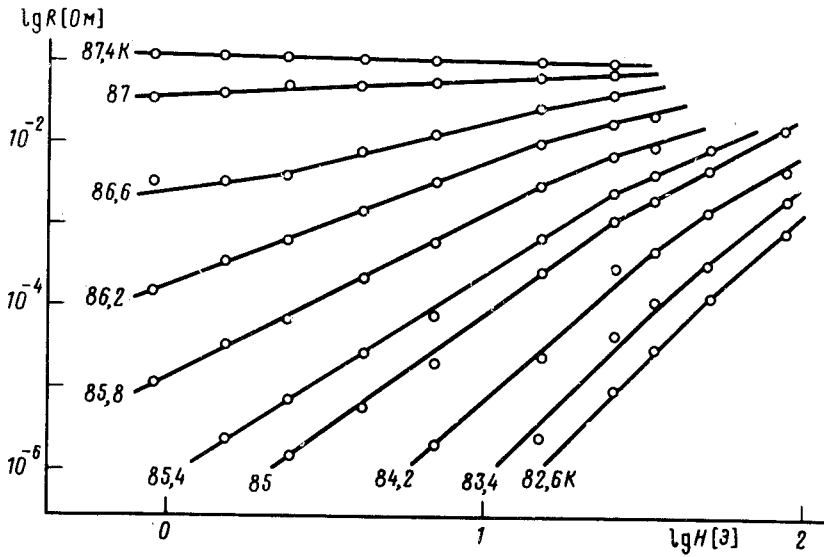


Рис. 1. Нелинейные зависимости сопротивления монокристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ в плоскости ab от магнитного поля ($H \parallel c$) при различных температурах ($I = 4$ мА)

Перейдем к обсуждению результатов. Слабое магнитное поле $H < H_{c1}$ (H_{c1} в BSCCO вблизи T_c составляет несколько десятков Э⁷) не должно проникать в толщу образца в виде $3D$ -магнитных вихрей, и состояние системы будет определяться мейсснеровскими токами. Можно предположить, что эти экранирующие токи подобно транспортному току рожают пары вихрей, влияя тем самым на сопротивление образца. В этом случае можно ожидать, что степенные показатели зависимостей $R(I)$ и $R(H)$ будут совпадать $a = b$, поскольку величина экранирующего тока $I_3 \propto H$. Как показывает оценка, $I_3 \sim \frac{4\pi}{c} \lambda H$, где λ — глубина проникновения магнитного поля $H \parallel c$. То есть величина магнитного поля и транспортного тока I , вызывающие одинаковое изменение сопротивления, связаны соотношением $I/H \sim (c/4\pi)\lambda$. Подставляя для λ величину $\approx 0,3$ мкм, определенную из зависимости $a(T)$ при $T \approx T_c$ ², получим $I/H \sim 2,5$ мА/Э, что соответствует величине, найденной экспериментально (рис. 3).

Таким образом, экспериментальные данные, действительно, указывают на то, что экранирующие токи могут вызывать разрыв связанных пар вихрей, увеличивая концентрацию свободных вихрей и антивихрей, тем не менее, в отличие от транспортного тока они должны оставаться бездиссипативными, определяя диамагнитный отклик системы⁸ и, по всей видимости, не могут приводить к движению рожденных ими вихрей.

Полученные результаты противоречат модели, предложенной в¹, в которой действие магнитного поля связывается с рождением в каждом слое вихрей одной ориентации так же, как в тонких пленках объемных сверхпроводников. В предположении¹ степенные показатели $R(H)$ и $R(I)$ должны отличаться вдвое $a = 2b$. Экспериментально в¹ это соотношение проверено не было, т. к. не были измерены нелинейные характеристики $R(I)$, а также не наблюдалось универсального скачка зависимости $R(H)$, позволяющего судить о соотношении a и b при $T \approx T_c$. Сама по себе эта модель не учитывает трехмерной специфики системы, предполагая H_{c1} слоистого кристалла равным H_{c1} индивидуального слоя.

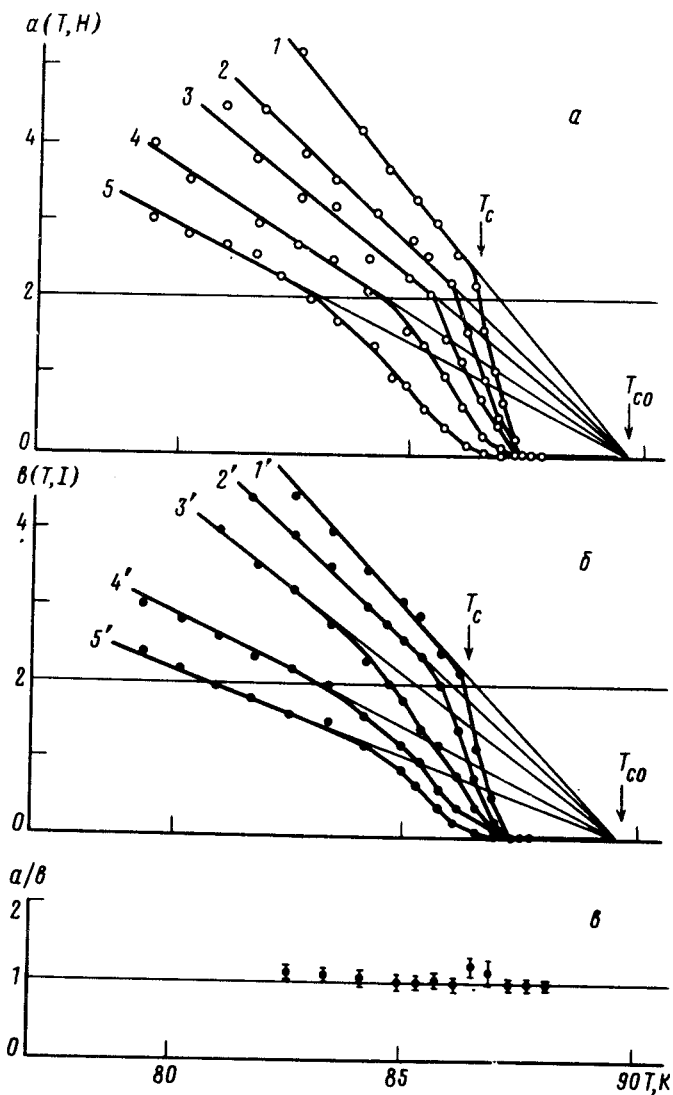


Рис. 2. Температурные зависимости степенных показателей a и b нелинейных характеристик: а) $R(I)$ при различных H : 1 - $< 0,5$ Э; 2 - 0,9; 3 - 2,4; 4 - 7,1; 5 - 15 Э; б) $R(H)$ при различных I : 1' - 1,2 мА; 2' - 4,0; 3' - 12; 4' - 25; 5' - 40 мА; в) отношения a/b , полученного из сравнения предельных кривых I и I'

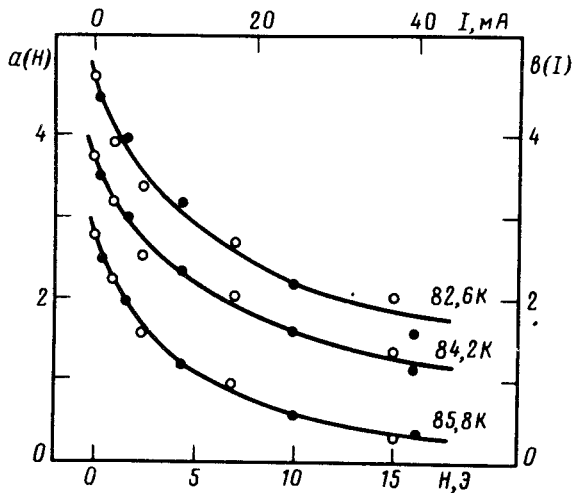


Рис. 3. Сравнение величин H и I , приводящих к эквивалентному уменьшению степенных показателей $a(H)$ - \circ , и $b(I)$ - \bullet при трех различных температурах

Таким образом, в настоящей работе показано, что влияние слабого магнитного поля на сопротивление МК BSCCO может быть объяснено рождением пар вихрей в сверхпроводящих слоях, причем, в отличие от зависимости $R(I)$, зависимость $R(H)$ МК имеет иной характер, чем в тонких пленках обычных сверхпроводников и, скорее всего, определяется токами, экранирующими магнитное поле.

Авторы признательны С.Н.Артеменко, А.Ф.Волкову и А.Н.Круглову за обсуждение результатов работы.

Литература

1. *Martin S. et al.* Phys. Rev. Lett., 1989, **62**, 677.
2. *Artemenko S.N. et al.* Phys. Lett., 1989, **138**, 428.
3. *Kim D.H.* Transport properties of high temperature superconductor TlBaCaCuO thin films. Ph. D. Thesis, Univ. of Minnesota, 1989.
4. *Stamp P.C.E. et al.* Phys. Rev. B, 1988, **38**, 2847.
5. *Ban M. et al.* Phys. Rev. B, 1989, **40**, 4419.
6. *Schneemeyer L.F. et al.* Nature, 1988, **332**, 420.
7. *Van Dover R.B. et al.* Phys. Rev. B, 1989, **39**, 4800.
8. *Lin J.J. et al.* Phys. Rev. B, 1988, **38**, 5095.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 января 1990 г.