Физика низких температур, 1996, т. 22, № 6, с. 701–704

Парамагнитный эффект Мейсснера в смешанном состоянии Y–Ba–Cu–O керамики

Ф. Н. Буханько

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины, Украина, 340114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

В узком интервале температур $\Delta T < 1$ K вблизи температуры перехода образцов Y–Ba–Cu–O керамики в сверхпроводящее состояние поведение микроволнового импеданса согласуется с обычной схемой организации сверхпроводимости в ВТСП керамике, помещенной во внешнее магнитное поле. При дальнейшем понижении температуры вместо ожидаемого уменьшения реактивной компоненты импеданса наблюдается ее резкое увеличение, которое может быть объяснено появлением дополнительного положительного вклада в микроволновую магнитную восприимчивость образца благодаря спонтанным орбитальным моментам. Величина положительного вклада была обратно пропорциональна напряженности магнитной компоненты СВЧ поля в резонаторе. При переходе образца в парамагнитное состояние ниже 90 K появлялись температурные осцилляции $X(T)$, связанные с квантованием проникновения магнитного потока $\Phi(T)$ в сетку джозефсоновских контактов. Предполагается, что проникновение магнитного СВЧ потока в сверхпроводящий образец при температурах ниже 90 K происходит в виде гипервихрей.

В вузькому інтервалі температур $\Delta T < 1$ K поблизу температури переходу зразків Y–Ba–Cu–O кераміки в надпровідний стан поведінка мікрохвильового імпедансу узгоджується із звичайною схемою організації надпровідності в ВТНП кераміці, поміщеної в зовнішне магнітне поле. При подальшому пониженні температури замість очікуваного зменшення реактивної компоненти імпедансу спостерігається її різке збільшення, яке може бути пояснено появою додаткового позитивного вкладу в мікрохвильову магнітну чутливість зразка завдяки спонтанним орбітальним моментам. Величина позитивного вкладу була зворотньо пропорціональна напружності магнітної компоненти НВЧ поля в резонаторі. При переході зразка в парамагнітний стан нижче 90 K зв'являлись температурні осциляції $X(T)$, зв'язані з квантуванням проникнення магнітного потоку $\Phi(T)$ в сітку джозефсонівських контактів. Вважається, що проникнення магнітного НВЧ потоку в надпровідний зразок при температурах нижче 90 K відбувається у вигляді гіпервихорів.

1. Введение

При изучении диамагнитного отклика в сверхпроводящих образцах BSCCO керамики было обнаружено в слабых постоянных магнитных полях $\lesssim 1$ Э необычное явление — сосуществование ниже T_c сверхпроводимости и спонтанного орбитального парамагнетизма [1–3], получившее позднее в ряде работ название парамагнитного эффекта Мейсснера (PME) или эффекта Воллебена (WE). Было установлено, что в то время как ZFC-эксперименты в слабых полях показывают полное выталкивание магнитного потока во всех образцах при достаточно низких температурах, низкотемпературная FC-восприимчивость может быть значительно меньше величины $-1/4\pi$ или даже парамагнитной с характерной зависимостью $\chi \sim 1/H$ в слабых полях. В некоторых образцах в поле 0,1 Э она достигала величины $(1/2)(1/4\pi)$. С ростом напряженности измерительного поля FC-восприимчивость уменьшалась и становилась диамагнитной в полях, больших 1 Э.

Качественное объяснение PME в BSCCO керамике, основанное на предположении о существовании между или внутри гранул джозефсоновских связей с отрицательной энергией, было независимо предложено в ряде работ [3–5]. Аномальные слабые связи получили в литературе название π-контактов, поскольку куперовские пары, туннелирующие через них, приобретают дополнительный сдвиг фазы π [6–8]. Предполагается, что в джозефсоновских петлях, составленных из сверхпроводящих гранул или в петлях внутри гранул с нечетным числом π-контактов, ниже T_c генерируются циркулярные незатухающие токи, которые приводят к появлению внутри петель спонтанных орбитальных моментов, ответственных за парамагнетизм образцов. Показано, что джозефсоновская сетка с обычными и π-контактами имеет свойства орбитального стекла [4,9].

В настоящей работе в керамике $YBa_2Cu_3O_{6,9}$ в СВЧ магнитных полях $\lesssim 0,3$ Э обнаружено аномальное возрастание поверхностного импеданса $Z = R + iX$ при температурах ниже T_c, которое можно объяснить в рамках существующих моделей PME появлением дополнительного положительного вклада в микроволновую магнитную проницаемость образцов, вызванного генерацией спонтанных вихревых токов в $2D$ джозефсоновской сетке с π-контактами.

2. Методика эксперимента

В данной работе были исследованы несколько образцов гомогенной керамики $YBa_2Cu_3O_{6,9}$ с температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_c \simeq 90$ K и шириной перехода $\Delta T_c = 0{,}5$–1 K, изготовленные в виде тонких дисков размерами $6\times1{,}5$ мм и плотностью $5{,}8$ г/см^3 по методике, описанной в [10]. Был использован резонансный метод измерений импеданса, при котором регистрируются относительно малые изменения добротности Q и частоты резонатора с образцом, пропорциональные изменениям поверхностного импеданса образца при его переходе в СП состояние:

$$\Delta(Q^{-1}) - 2i(\Delta\omega/\omega_0) = \gamma\Delta Z \equiv \gamma(\Delta R + i\Delta X) \ ,$$

где γ — геометрический фактор, связанный с размерами резонатора и образца. На частоте 9 ГГц производилась запись зависимостей импеданса от температуры вблизи СП перехода с высоким разрешением $\sim 10^{-2}$ K на модифицированном ЭПР-радиоспектрометре, в котором вместо модуляции постоянного магнитного поля осуществлялась амплитудная модуляция СВЧ поля частотой 30 Гц. Остаточное поле электромагнита ~ 40 Э компенсировалось дополнительными катушками. Сверхпроводящие диски крепились внутри поршня-нагревателя к внешней стороне прямоугольного измерительного резонатора через тонкую диэлектрическую прослойку, что позволяло нагревать и охлаждать образцы с различной скоростью, практически не изменяя температуру резонатора, который играл роль термостата, контактирующего с жидким азотом. Контроль температуры верхней и нижней поверхностей дисков осуществлялся с помощью медь-константановой термопары и резистивного датчика температуры с точностью не хуже $\pm\,0{,}05$ K. Индуктивная связь резонатора со сверхпроводящими дисками производилась через отверстие в поршне-нагревателе диаметром 4 мм, расположенном в пучности магнитной компоненты IE_{102} моды СВЧ электромагнитного поля в резонаторе с добротностью $\sim 10^3$. Использование микроволнового моста позволило разделить сигналы, пропорциональные изменениям реактивной и активной компонент поверхностного импеданса, возникающих при переходе дисков в СП состояние. Большинство записей температурных зависимостей импеданса были произведены при уровне микроволновой мощности на входе резонатора 50 мВт, которому соответствовала напряженность СВЧ поля на поверхности образца $h \simeq 0{,}3$ Э. Температура сканировалась вблизи T_c в интервале 80–100 K со скоростью изменения $dT/dt \simeq$ $\simeq 1$ град/мин; при этом форма зависимостей $Z(T)$ не искажалась неравновесными эффектами.

3. Экспериментальные результаты

Ранее было установлено, что при переходе керамических образцов Y–Ba–Cu–O в СП состояние компоненты микроволнового импеданса $Z =$ $= R + iX$ резко изменяются вблизи $T_{c0} \simeq 91$ K от величины $R_N = X_N \sim 1$ Ом·см$^{-2}$ в нормальной фазе до значений $R \sim 10^{-2}$–10^{-3} Ом·см$^{-2}$ и $X \sim 10^{-1}$–10^{-2} Ом·см$^{-2}$ в сверхпроводящей, с последующим линейным или квадратичным уменьшением в области гелиевых температур [11–13]. В настоящей работе обнаружена аномалия зависимости $X(T)$ при температурах ниже $T_c \simeq 90$ K. Согласно рис. 1, в интервале температур $T_c < T < T_{c0}$ происходило неполное выталкивание СВЧ магнитного потока из сверхпроводящих дисков за счет формирования в образце экранирующих вихревых токов в виде петель с включенными в них джозефсоновскими контактами. Рост диамагнетизма сопровождался резким уменьшением реактанса об-

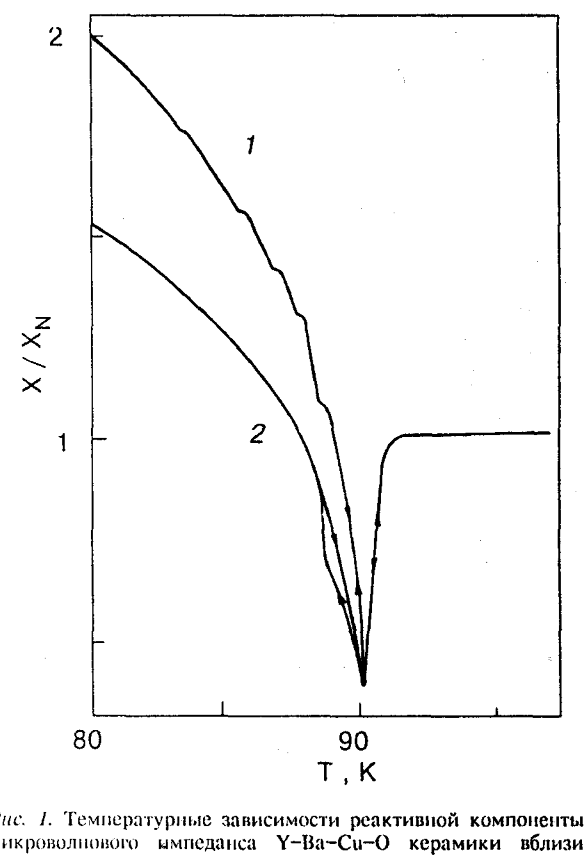

Рис. 1. Температурные зависимости реактивной компоненты микроволнового импеданса Y–Ba–Cu–O керамики вблизи $T_c \simeq 90$ K в СВЧ магнитном поле: 0,1 (*1*); 0,3 (*2*) Э.

разца в интервале температур 90–91 K на 70–80% его величины в нормальном состоянии. Ниже T_c характер изменения $X(T)$ был инвертирован: вместо ожидаемого уменьшения реактанса с плавным выходом на плато при низких температурах, обнаружено резкое увеличение X, аналогичное поведению FC магнитной восприимчивости джозефсоновской сетки с π-контактами [1–3]. Согласно рис. 1, при температурах ниже 88 K образцы керамики $YBa_2Cu_3O_{6,9}$ переходили в парамагнитное состояние. Было найдено, что величина СВЧ парамагнитного отклика пропорциональна напряженности магнитной компоненты СВЧ поля в резонаторе и слабо зависела от напряженности постоянного магнитного поля $\mathrm{H} \perp \mathrm{h}$. В интервале температур 85–90 K в СВЧ поле с напряженностью $h \simeq 0{,}1$ Э обнаружены осцилляции $X(T)$ с периодом 1 K. Следует отметить, что температурная аномалия СВЧ реактанса отсутствовала при измерениях импеданса на радиочастотах.

При медленном охлаждении сверхпроводящих дисков ($H = 0$, $h = 0{,}3$ Э) вблизи 88 K обнаружен скачок микроволнового реактанса (рис. 1) и узкий пик дополнительного СВЧ поглощения, которые отсутствовали в температурных зависимостях импеданса при нагреве образцов. С ростом напряженности постоянного поля и ослаблением СВЧ поля эффект исчезал. Аналогичные особенности в температурных зависимостях импеданса пленок Y–Ba–Cu–O наблюдались на радиочастотах вблизи 80 K [14] и 85 K [15]. Эти сингулярности были интерпретированы как переход Костерлица–Таулесса (КТ) в 2*D* сетке джозефсоновских контактов.

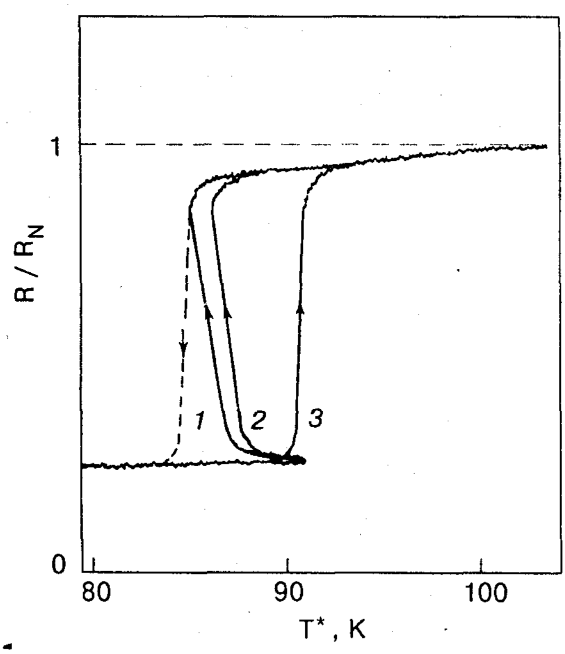

Рис. 2. Индуцированное скачком подвижности СВЧ магнитного потока изменение $R(T)$ при напряженностях постоянного поля H, Э: $3\cdot10^3$ (*1*); $2\cdot10^3$ (*2*); 0 (*3*).

С ростом напряженности внешнего постоянного магнитного поля $\mathrm{H} \perp \mathrm{h}$ наблюдалось обычное для ВТСП керамики уширение СП перехода и появление низкотемпературных «хвостов» поглощения. В сильных магнитных полях ($H \geq 1$ КЭ) вблизи 88 K формировалась узкая петля температурного гистерезиса $R(T)$ с шириной $\Delta T \sim 1$ K, которая отсутствовала в нулевом магнитном поле. При ослаблении теплового контакта образца с термостатом в нулевом магнитном поле вблизи 88 K был обнаружен «гигантский» температурный гистерезис $R(T)$ с шириной прямоугольной петли $\Delta T \simeq 7$ K (рис. 2). Приложение к образцу сильного постоянного магнитного поля приводило к разрушению петли и появлению необычной *S*-образной зависимости поглощения энергии СВЧ поля вблизи 88 K от температуры поверхности сверхпроводящего диска, контактирующей с резонатором.

4. Обсуждение

Аномальное поведение реактивной компоненты импеданса при температурах ниже T_c можно, повидимому, объяснить изменением топологии микроволнового магнитного потока из-за перехода образца в состояние орбитального стекла с новыми магнитными свойствами джозефсоновской среды. Если в интервале температур $T_c < T < T_{c0}$ микроволновый магнитный поток проникает в образец в виде отдельных джозефсоновских вихрей и при этом $X(T) = \mu_0\omega\lambda_J(T)$, то при переходе образца в состояние орбитального стекла характер проникновения СВЧ поля в сверхпроводящий объем становится совершенно иным. В работе [16] джозефсоновская среда была рассмотрена с точки зрения усредненного описания для ВТСП и было показано, что в такой среде, начиная с очень слабых магнитных полей, может возникать своеобразное смешанное состояние, в котором магнитный поток проникает в образец в виде флюксонов, отличных по структуре от абрикосовских и джозефсоновских вихрей. Из-за своего большого размера они были названы гипервихрями. Согласно расчету микроволнового отклика джозефсоновской ВТСП среды, находящейся в смешанном состоянии с гипервихрями, СВЧ импеданс $Z \propto -i\sqrt{\mu\omega}$ при $\omega \to 0$, где μ — магнитная проницаемость джозефсоновской среды. Таким образом, в сверхпроводнике с гипервихрями реактивная компонента микроволнового импеданса пропорциональна магнитной восприимчивости джозефсоновской среды. Предполагается, что смешанное состояние с гипервихрями реализуется в образцах с PME.

Сильная анизотропия проводимости соединений BSCCO позволяет предположить, что сверхпроводящие слои CuO_2 эффективно развязаны и к ним применима теория Костерлица—Таулесса. Экспериментально установлено, что термически возбужденная в слоях CuO_2 плазма свободных вихрей вносит существенный вклад в ряд макроскопических эффектов при температурах близких к T_{KT}, ниже которой свободные $2D$ вихри образуют связанные джозефсоновским взаимодействием нейтральные пары. В Y–Ba–Cu–O ожидается существование значительной джозефсоновской связи между сдвоенными слоями CuO_2, препятствующей термической диссоциации вихревых пар, однако в ряде работ KT-переход экспериментально установлен [14,15]. Сингулярности импеданса, обнаруженные в данной работе вблизи 88 K, также свидетельствуют в пользу его существования. Теория Нельсона—Костерлица [18] предсказывает скачок двумерной плотности куперовских пар $n_s^{2D}(T)$ вблизи T_{KT} к нулю, связанный с термической диссоциацией пар вихрь — антивихрь. В связи с этим скачок реактанса вблизи $T_{KT} \simeq 88$ K вызван, по-видимому, скачком плотности спонтанных вихревых токов, циркулирующих в слоях CuO_2.

1. P. Svendlindh, K. Niskhanane, P. Nordblad, L. Lundgren, D. Lönnberg, and T. Lundström, *Physica* C162–164, 1365 (1989).
2. W. Braunisch, N. Knauf, V. Kataev, S. Neuhausen, A. Grütz, A. Kock, B. Roden, D. Khomskii, and D. Wohlleben, *Phys. Rev. Lett.* 68, 1908 (1992).
3. W. Braunisch, G. Bauer, A. Kock, B. Freitag, A. Grütz, V. Kataev, S. Neuhausen, B. Roden, D. Khomskii, and D. Wohlleben, *Phys. Rev.* B48, 4030 (1993).
4. F. V. Kusmartsev, *Phys. Lett.* A169, 108 (1992).
5. V. Kataev, N. Knauf, W. Braunisch, R. Müller, R. Borowskii, B. Roden, and D. Khomskii, *Pis'ma v Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 58, 656 (1993).
6. Л. Н. Булаевский, В. В. Кузий, А. А. Собянин, *Письма в ЖЭТФ* 25, 314 (1977).
7. А. Ф. Андреев, *Письма в ЖЭТФ* 46, 463 (1987).
8. А. В. Гуревич, Р. Г. Минц, *Письма в ЖЭТФ* **48**, **196 (1988)**.
9. D. Dominguez, E. A. Jagla, and C. A. Balseiro, *Phys. Rev. Lett.* 72, 2773 (1994).
10. Ф. Н. Буханько, Н. А. Дорошенко, *ФТТ* **36**, **1760 (1994)**.
11. S. Sridhar, C. A. Shiffman, and H. Hamdeh, *Phys. Rev.* **B36**, 2301 (1987).
12. S. Sridhar and W. L. Kennedy, *Rev. Sci. Instrum.* **59**, **531** (1988).
13. J. Carini, L. Drabeck, and G. Gruner, *Mod. Phys. Lett.* **B3**, **5** (1989).
14. P. K. Srivastava, P. Debely, H. E. Hintermann, C. Leemann, J. Weber, O. Caccivio, P. Martinoli, and H. R. Ott, *Physica* C153–155, 1443 (1988).
15. V. A. Gasparov, *Physica* C178, 449 (1991).
16. Э. Б. Сонин, *Письма в ЖЭТФ* 47, 415 (1988).
17. Э. Б. Сонин, А. К. Таганцев, *ЖЭТФ* 95, 994 (1989).
18. D. R. Nelson and J. M. Kosterlitz, *Phys. Rev. Lett.* 39, 1201 (1977).

Paramagnetic Meissner effect in mixed state of Y–Ba–Cu–O ceramics

F. N. Bukhanko

In a narrow temperature range $\Delta T < 1$ K in the vicinity of normal superconducting transition of Y–Ba–Cu–O ceramics the microwave impedance behavior correlates with the usual scheme of organization of superconductivity in a HTSC ceramics placed in external magnetic field. On further decreasing the temperature, instead of the expected decrease in the reactive component an abrupt increase is observed. The latter may be due to an additional positive contribution to the microwave magnetic susceptibility of a sample responsible for by the spontaneous orbital moments. The value of the positive contribution is inversely proportional to the intensity of the magnetic component of the microwave field in the resonator. When the sample goes to a paramagnetic state, temperature oscillating $X(T)$s appear below 90 K, which may be associated with the quantization of magnetic flux $\Phi(T)$ penetrating in the network of the Josephson junctions. It is supposed that the penetration of the magnetic microwave flux into the superconducting sample below 90 K takes place in the form of hypervortices.