Физика низких температур, 1996, т. 22, № 6, с. 690–692

Микроволновое поверхностное сопротивление монокристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и его температурная зависимость

В. Ф. Тарасов, В. Ф. Таборов, А. Л. Касаткин, В. М. Пан

Институт металлофизики НАН Украины, Украина, 252142, г. Киев, пр. Вернадского, 36

На частоте 10 ГГц измерено поверхностное сопротивление R_s монокристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. В диапазоне температур 80–20 К значение $R_s \approx 170 \cdot 10^{-6}$ Ом, а при $T < 20$ К сопротивление уменьшается. Предполагается, что причиной такой величины R_s может служить состояние приповерхностного слоя монокристалла толщиной $\Delta \sim 30$–50 Å.

На частоті 10 ГГц виміряно поверхневий опір R_s монокристалу $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. В діапазоні температур 80–20 К значення $R_s \approx 170 \cdot 10^{-6}$ Ом, а при $T < 20$ К опір зменшується. Припускається, що причиною такого поверхневого опору R_s може бути стан приповерхневого шару монокристала завтовшки $\Delta \sim 30$–50 Å.

Исследование поверхностного сопротивления высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) представляет интерес с точки зрения возможного использования их в качестве элементов СВЧ техники. Достигнутые в настоящее время величины поверхностного сопротивления $R_s = 5 \cdot 10^{-4}$ Ом при 77 К для пленок [1] приближаются к значению поверхностного сопротивления совершенных монокристаллов [2], однако на два порядка выше для лучших образцов из Nb, Pb, Nb_3Sn [3,4] (при нормировании температуры к температуре сверхпроводящего перехода).

Как установлено, источниками достаточно высокого поверхностного R_s в пленках являются границы зерен, разориентировка оси C решетки кристалла зерна по отношению к подложке [1], наличие несверхпроводящих включений и контактов между зернами. Предполагается, что причинами значительного R_s могут быть нормальные носители даже при $T = 0$, а также слабые связи между купратными плоскостями [5–7].

Однако в монокристаллах, в которых отсутствуют указанные выше дефекты, величина R_s выше, чем следовало бы ожидать для монокристаллов. Объяснение этому было предложено в работе [2], в которой при измерении R_s в монокристалле $YBa_2Cu_3O_7$ получен широкий пик реальной проводимости σ_1 в области температур 10 К $< T <$ 80 К на частоте 2 ГГц. Используя двухжидкостную модель сверхпроводимости и выражение Друде для реальной части проводимости

$$\sigma_1 = \frac{n_{il} e^2 \tau}{(1 + \omega^2 \tau^2) m}, \qquad (1)$$

авторы [2] показали, что в этом диапазоне температур время рассеивания τ возрастает в $\sim 10^3$ раз. По их мнению, это связано с неупругим рассеиванием электронов на антиферромагнитных флуктуациях.

По экспериментальным данным для σ_1, измеренных в пленках $YBa_2Cu_3O_7$ в том же диапазоне температур и в широкой области частот [8,9], мы вычислили τ из (1), используя отношения проводимостей σ_1 для разных частот. Оказалось, что τ изменялось только в три раза при изменении T от 10 до 80 К. Аналогичные выводы были сделаны недавно в [10] и несколько ранее в [11]. По-видимому, предложенная в [12] причина большого остаточного поверхностного сопротивления маловероятна.

Мы провели температурные измерения R_s на монокристалле $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на частоте 10 ГГц, поместив образец в резонатор из Nb_3Sn. Резонатор имел добротность $5 \cdot 10^8$ при $T = 4{,}2$ К, которая во время эксперимента была постоянной, а температура образца регулировалась. Монокристалл имел $T_c = 89$ К и ширину перехода $\Delta T = 0{,}8$ К. Высокочастотные токи циркулировали в плоскости *ab*. Так же как в [2], мы наблюдали малоизменяющееся $R_s \sim 170 \cdot 10^{-6}$ Ом в диапазоне температур от 80 до 20 К (рис. 1), которое несколько выше, чем в

© В. Ф. Тарасов, В. Ф. Таборов, А. Л. Касаткин, В. М. Пан, 1996

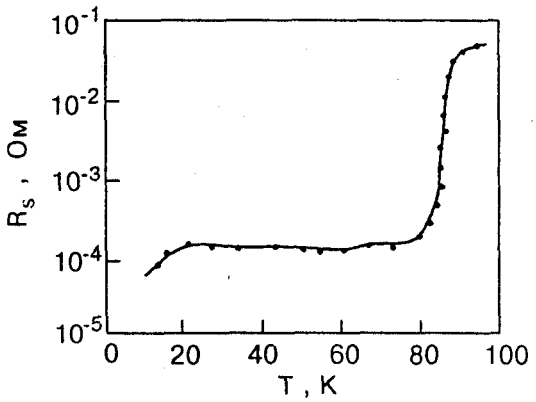

Рис. 1. Температурная зависимость поверхностного сопротивления R_s монокристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на частоте 10 ГГц.

[2]. Как показывает сравнение расчетного R_s по теории БКШ с экспериментом [12], удовлетворительное совпадение получается в области от T_c до $T \cong 0{,}8T_c$. Затем R_s мало изменяется вплоть до $T = 20$ K, после чего начинает уменьшаться. Это свойственно и монокристаллам высокого качества [2,12]. В связи с тем что омические потери из-за двойников и межгранульных контактов, описанные в [5–7], для таких кристаллов должны быть весьма малыми, возможно предположить другую причину рассеивания энергии СВЧ в монокристалле ВТСП.

В работах [13,14] проводилось исследование поверхности керамики и монокристаллов методом Оже-спектроскопии при комнатной температуре. Установлено, что поверхность образцов теряет часть кислорода, в результате чего тонкий слой ~ 30–50 Å может обладать полупроводниковой или диэлектрической проводимостью. В пленках ВТСП [15] с помощью туннельной сканирующей микроскопии также обнаружен тонкий несверхпроводящий слой, а в [16] показано, что поверхность ВТСП обладает сильными каталитическими свойствами и присоединяет окись углерода и пары воды из атмосферы даже при низких температурах. Предположив, что этот слой является основным источником потерь, оценим величину его проводимости. Согласно [17], полная поверхностная индуктивность монокристалла равна $L_s = 4\pi\mu_0\lambda$, что при $\lambda_{ab} \sim 2\,000$ Å на частоте $f = 10$ ГГц дает поверхностное индуктивное сопротивление $X_s = 2\pi f L_s \cong 3\cdot10^{-2}$ Ом. Допустим, что все омические потери монокристалла сосредоточены в тонком приповерхностном слое $\Delta \cong 50$ Å. Обозначив сопротивление единицы площади поверхности этого слоя через R_1, для величины обратного поверхностного импеданса Z_s монокристалла получаем

$$\frac{1}{Z_s} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{iX_s}. \qquad (2)$$

Отсюда Z_s равно

$$Z_s = \frac{R_1X_s^2}{R_1^2 + X_s^2} + i\frac{R_1^2X_s}{R_1^2 + X_s^2} = R_s + iX. \qquad (3)$$

Здесь R_s, X — поверхностное активное и индуктивное сопротивления монокристалла, которые измеряются в эксперименте. При 77 K для хороших монокристаллов $R_s \sim 100\cdot10^{-6}$ Ом [2]. Реально $R_1 >> X_s$, тогда из (3) $X_s \cong X$, а $R_1 = X_s^2/R_s$. Для $X_s = 3\cdot10^{-2}$ Ом и $R_s = 100\cdot10^{-6}$ Ом, значение $R_1 = 9$ Ом.

Величина поверхностного сопротивления слоя Δ равна $R_1 = \rho/\Delta$, где ρ — удельное электросопротивление тонкого приповерхностного слоя монокристалла. Положив $\Delta = 50$ Å, получаем $\rho = R_1\Delta = 9\cdot50\cdot10^{-8} = 5\cdot10^{-6}$ Ом·см. Для сравнения укажем, что Cu при 77 K имеет $\rho \cong 1{,}7\cdot10^{-7}$ Ом·см, т.е. почти в 30 раз меньше ρ тонкого поверхностного слоя монокристалла ВТСП при 77 K. Тем не менее ρ этого слоя намного ниже, чем удельное электросопротивление полупроводника и тем более диэлектрика, как указывалось в [13,14]. Это различие можно объяснить тем, что при измерении R_s материал находится в сверхпроводящем состоянии и вследствие эффекта близости тонкий слой поверхности монокристалла может проявлять проводимость, отличную от той, которая наблюдается при спектроскопических исследованиях при комнатной температуре. Если еще учесть, что ρ для $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в зависимости от индекса x постоянна в достаточно широкой области температур, а затем изменяется [18], то, используя выражение (3), можно показать, что R_s в некоторой области ниже T_c постоянно, а затем в обоих случаях падает. В связи с этим нам представляется, что полученные численные оценки ρ тонкого поверхностного слоя монокристалла вполне приемлемы. Таким образом, даже в отсутствие двойников и межгранульных контактов, наличие тонкого несверхпроводящего слоя на поверхности кристалла, вследствие нарушения стехиометрии по кислороду, может давать заметное остаточное R_s. Мы полагаем, что дальнейшие исследования связи между структурой приповерхностного слоя монокристалла $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и R_s представляют интерес.

1. S. S. Laderman, R. G. Taber, R. D. Jacowitz, J. L. Moll, C. B. Eom, T. L. Hylton, A. F. Marshall, T. H. Geballe, and M. R. Beasely, *Phys. Rev.* **B43**, 2922 (1991).
2. D. A. Bonn, R. Liang, T. M. Riseman, D. J. Baar, D. C. Morgan, K. Zhang, P. Dosanjh, T. L. Duty, A. MacFarlane, G. D. Moris, J. H. Bremer, and W. N. Hardy, *Phys. Rev.* **B47**, 11315 (1993).
3. Ф. Ф. Менде, А. И. Спицин, *Поверхностный импеданс сверхпроводников*, Наукова думка, Киев (1984).
4. А. И. Диденко, *Сверхпроводящие волноводы и резонаторы*, Радио и связь, Москва (1973).
5. J. Zaanen, A. T. Paxton, O. Jepson, and O. K. Anderson, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 2685 (1988).
6. J. Halbritter, *Phys. Rev.* **B46**, 14861 (1992).
7. V. Z. Kresin, S. A. Wolf, and G. Deutsher, *Physica* **C191**, 9 (1992).
8. А. А. Волков, Б. П. Горшунов, Г. В. Козлов, С. И. Красносвободцев, В. В. Печень, О. И. Сиротинский, Я. Петцелт, *ЖЭТФ* **95**, 261 (1989).
9. M. C. Nuss, P. M. Mankiewich, M. L. O'Mally, and E. H. Westerwick, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 3305 (1991).
10. U. Dähne, Y. Goncharov, N. Klein, N. Tellmann, G. Kozlov, and K. Urban, *J. Sup.* **8**, 129 (1995).
11. F. Gao, I. W. Kruse, C. E. Platt, M. Feng, and M. V. Klein, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2274 (1993).
12. D. L. Rudin, K. Green, J. Gruschus, J. Kirchgerssnes, D. Moffat, H. Padamsee, J. Sears, and Q. S. Shu, *Phys. Rev.* **B38**, 6538 (1988).
13. М. Н. Михеев, В. Г. Назин, И. В. Киреев, А. В. Свищев, А. М. Серебряков, *СФХТ* **4**, 54 (1988).
14. M. A. Vasiliev and V. V. Martynyuk, *J. Electr. Spectr. Phenomena* **68**, 485 (1994).
15. J. Z. Liu, L. Li, Y. J. Tian, S. F. Xu, Y. L. Zhou, Z. H. Chen, D. F. Cui, H. J. Tao, Z. X. Zhao, G. Z. Yang, F. Gao, and C. Bai, *J. Sup.* **8**, 103 (1995).
16. М. И. Логинов, О. Г. Савельев, В. Н. Шредик, *ЖТФ* **64**, 123 (1994).
17. В. В. Шмидт, *Введение в физику сверхпроводимости*, Наука, Москва (1989).
18. И. Э. Грабай, И. В. Зубов, А. С. Илюшин, А. З. Кауль, Ю. Г. Метлин, В. В. Мощалков, И. Г. Муттик, И. А. Никанорова, Н. А. Самарин, *ФТТ* **30**, 3436 (1988).

Microwave surface resistance and its temperature dependence of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals

V. F. Tarasov, V. F. Taborov, A. L. Kasatkin, and V. M. Pan

Surface resistance, R_S, of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ single crystals is measured at a frequency of 10 GHz. At temperatures ranged from 80 to 20 K R_S amounts to $\approx 170 \cdot 10^{-6}$ Ohm and decreases with $T < 20$ K. Such a behavior of R_S may be attributed to the single crystal subsurface layer $\Delta \sim 30$–50 Å in thickness.