

ПОВЕРХНОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛА $YBaCuO$

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

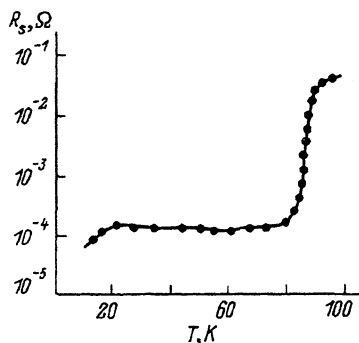
Институт металлофизики Академии наук Украины,
252142 Киев, Украина
(Поступила в Редакцию 20 июня 1995 г.)

На частоте 10 GHz измерено поверхностное сопротивление R_s монокристалла $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. В диапазоне температур 80–20 К остаточное R_s имеет $\sim 170 \mu\Omega$, которое при $T < 20$ К уменьшается. Предполагается, что причиной остаточного R_s может служить приповерхностный слой монокристалла толщиной $\Delta \sim 30\text{--}50 \text{ \AA}$.

1. Со времени открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) проводятся многочисленные исследования поверхностного сопротивления R_s таких объектов ВТСП, как керамика, пленки, монокристаллы. Цель этих экспериментов — выяснение температурной зависимости R_s , ее соответствия теории БКШ, влияния магнитного поля на R_s . Одновременно исследовались возможности использования ВТСП в качестве элементов цепей в сверхвысокочастотной технике (СВЧ). Первоначально указанные выше объекты имели $R_s \sim 10^{-2}\text{--}10^{-3} \Omega$ на частотах ~ 10 GHz при 77 К. Эта величина была на два-три порядка выше, чем R_s традиционных сверхпроводников Pb, Nb, Nb_3Sn [1,2] при $T = 4.2$ К. Однако иногда в технике СВЧ использование ВТСП вместо меди при 77 К на частотах до 100 GHz оказывалось выгодным. Постепенное улучшение технологии получения почти монокристаллических пленок позволило получить R_s порядка $100 \mu\Omega$ при 77 К [3], что приближается к поверхностному сопротивлению совершенных монокристаллов [4] и расширяет возможности использования ВТСП в элементах СВЧ.

Для объяснения величины и температурной зависимости R_s в ВТСП рассмотрен ряд механизмов потерь энергии СВЧ. Так, величину R_s в ВТСП рассматривали для модели полярона [5], в случае присутствия границ и двойников [6,7], разориентировки оси C решетки кристалла по отношению к подложке [3], из-за наличия несверхпроводящих включений и контактов [8,9], в случае возможного существования нормальных носителей и слабых связей между купратными плоскостями [10–12], а также для перколяционных процессов в приповерхностном слое [13].

В работе [4] расчет показал, что время релаксации τ в монокристалле $YBaCuO$ в диапазоне температур от 80 до 10 К возрастает в 10^3 раз.



Температурная зависимость поверхностного сопротивления R_s монокристалла YBaCuO на частоте 10 GHz.

Это связывают с рассеянием нормальных электронов на антиферромагнитных спиновых флуктуациях, что должно приводить к большому остаточному R_s . Однако оценка τ , проведенная нами из дисперсионных кривых по работам [14,15], указывает на то, что в этом диапазоне температур τ меняется приблизительно в 2 раза, и это ставит под сомнение влияние вышеуказанного эффекта на R_s .

2. Мы проводили температурные измерения R_s на монокристалле YBa₂Cu₃O_{7- δ} на частоте 10 GHz, поместив образец в резонатор из Nb₃Sn. Резонатор имел добротность $5 \cdot 10^8$ при $T = 4.2$ K, которая во время эксперимента была постоянной, а температура образца регулировалась. Монокристалл имел $T_c = 89$ K и ширину перехода $\Delta T = 0.8$ K. Высокочастотные токи циркулировали в плоскости *ab*. Так же как в [4], мы наблюдали мало меняющееся R_s порядка $170 \mu\Omega$ в диапазоне температур от $T = 80$ до 20 K (см. рисунок), которое несколько выше, чем в [4].

Как показывает сравнение расчетного R_s по теории БКШ с экспериментом [16], удовлетворительное совпадение следует от T_c до $T \cong 0.8T_c$. Затем R_s мало меняется до $T = 20$ K, после чего начинает уменьшаться. Это свойственно и монокристаллам высокого качества [4,16], в связи с чем омические потери от двойников и межгранульных контактов, описанные в [3,5-9], для таких кристаллов должны быть весьма малыми. В этом случае можно предположить другой источник механизма рассеивания энергии СВЧ в монокристалле ВТСП.

В работах [17,18] проводилось исследование поверхности керамики и монокристаллов методом оже-спектроскопии. Установлено, что поверхность образцов теряет часть кислорода, в результате чего тонкий слой $\sim 30-50 \text{ \AA}$ может обладать полупроводниковой или диэлектрической проводимостью. Обнаружено также [19], 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 [20], полная поверхностная индуктивность монокристалла равна $L_s = 4\pi\mu_0\lambda$, что при $\lambda \sim 2000 \text{ \AA}$ на частоте $f = 10 \text{ GHz}$ дает поверхностное индуктивное сопротивление $X_s = 2\pi fL_s = 3 \cdot 10^{-2} \Omega$. Допустим, что все омические потери монокристалла сосредоточены в тонком приповерхностном слое порядка $\Delta \sim 50 \text{ \AA}$. Обозначим сопротивление единицы площади поверхности этого слоя через R_1 , получим для величины обратного поверх-

ного импеданса Z_s монокристалла

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

Тогда из (1) следует, что Z_s равно

$$Z_s = \frac{R_1 X_s^2}{R_1^2 + X_s^2} + i \frac{R_1^2 X_s}{R_1^2 + X_s^2} = R_s + iX'_s. \quad (2)$$

Здесь R_s , X'_s — поверхностные активное и индуктивное сопротивления монокристалла, которые измеряются в эксперименте. При 77 К для хороших монокристаллов R_s составляет порядка $100 \mu\Omega$ [4]. Реально $R_1 \gg X_s$, тогда из (2) имеем $X_s = X'_s$, а $R_1 = X_s^2 R_s$. Для $X_s = 3 \cdot 10^{-2} \Omega$ и $R_s = 100 \mu\Omega$ получаем $R_1 = 9 \Omega$.

Величина поверхностного сопротивления слоя Δ равна $R_1 = \rho/\Delta$, где ρ — удельное электросопротивление тонкого приповерхностного слоя монокристалла. Положив $\Delta = 50 \text{ \AA}$, получим $\rho = R_1 \Delta = 5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{см}$.

Для сравнения укажем, что ρ монокристалла ВТСП вблизи T_c равно $80 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{см}$ [4], т.е. приблизительно в 16 раз выше, чем ρ приповерхностного слоя при 77 К. С учетом того, что недостаток кислорода в YBaCuO существенно меняет характер и величину электрической проводимости [21], нарушение стехиометрии поверхности может приводить к отсутствию сверхпроводящего состояния в тонком слое даже после T_c . Поэтому рассчитанные величины R_1 и ρ для этого случая можно считать вполне приемлемыми. Из выражения для R_1 видно, что чем меньше R_s , тем больше R_1 и, следовательно, ρ . Поскольку, согласно закону Ленца–Джоуля, при наличии в проводнике электрического поля E рассеиваемая мощность СВЧ равна [22]

$$P = \sigma E^2, \quad (3)$$

то понижение R_s приводит к росту ρ и уменьшению потерь энергии СВЧ.

Это вызвано тем, что на потери мощности СВЧ влияет индуктивное поверхностное сопротивление монокристалла в сверхпроводящем состоянии.

Таким образом, даже при отсутствии 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 и составом в тонком приповерхностном слое и остаточным сопротивлением монокристалла представляют интерес.

В заключение отметим, что данная работа выполнена по проекту «Микроволна» при финансовой поддержке ГКНТ Украины.

- [1] Менде Ф.Ф., Спицин А.И. Поверхностный импеданс сверхпроводников. Киев (1984). 288 с.
- [2] Лиденко А.И. Сверхпроводящие волны и резонаторы. М. (1973). 252 с.
- [3] Laderman S.S., Taber R.G., Jacowitz R.D., Moll J.L., Eom C.B., Hylton T.L., Marshall A.F., Geballe T.H., Beasley M.R. Phys. Rev. **В 43**, 4 A, 2922 (1991).
- [4] Bonn D.A., Liang R., Riseman T.M., Baar D.J., Morgan D.C., Zhang K., Dosanjh P., Duty T.L., MacFarlane A., Moris G.D., Bremer J.H., Hardy W.N. Phys. Rev. **В 47**, 17, 11315 (1993).
- [5] Вендик О.Г. Письма в ЖТФ **14**, 12, 1098 (1988).
- [6] Вендик О.Г., Гайдуков М.М. Письма в ЖТФ **15**, 7, 69 (1989).
- [7] Вендик О.Г., Ковалевич Л., Козырев А.Б., Колесов С.Г., Попов А.Ю. Письма в ЖТФ **15**, 8, 72 (1989).
- [8] Фомин Н.Ф. Письма в ЖТФ **16**, 1, 77 (1990).
- [9] Гайдуков М.М., Карманенко С.Ф., Клименко В.Л., Козырев А.Б., Солдатенков О.И. ОФХТ **8**, 1, 32 (1994).
- [10] Zaanen J., Paxton A.T., Jepson O., Anderson O.K. Phys. Rev. Lett. **60**, 25, 2685 (1988).
- [11] Halbritter J. Phys. Rev. **В 46**, 22, 14861 (1992).
- [12] Kresin V.Z., Wolf S.A., Deutsher G. Physica **С 191** 1, 9 (1992).
- [13] Лужков А.А. Письма в ЖЭТФ **59**, 6, 406 (1994).
- [14] Волков А.А., Горшунов Б.П., Козлов Г.В., Красносвободцев С.И., Печень Е.В., Сиротинский О.И., Петцелт Я. ЖЭТФ **95**, 1, 261 (1989).
- [15] Nuss M.C., Mankiewich P.M., O'Mally M.L., Westerwick E.H. Phys. Rev. Lett. **66**, 25, 3305 (1991).
- [16] Rudin D.L., Green K., Gruschus J., Kirchgerrssnes J., Moffat D., Padamsee H., Sears J., Shu Q.S. Phys. Rev. **В 38**, 10, 6538 (1988).
- [17] Михеев М.Н., Назин В.Г., Киреев И.В., Свищев А.В., Серебряков А.М. СФХТ **4**, 54 (1988).
- [18] Vasiliev M.A., Martynyuk V.V. J. Elec. Spectros. Phenomena **68**, 485 (1994).
- [19] Логинов М.И., Савельев О.Г., Шредик В.Н. ЖТФ **64**, 8, 123 (1994).
- [20] Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. М. (1989). 239 с.
- [21] Грабай И.Э., Зубов И.В., Илюшин А.С., Кауль А.З., Метлин Ю.Г., Мошталков В.В., Муттик И.Г., Никанорова И.А., Самарин Н.А. ФТТ **30**, 11, 3436 (1988).
- [22] Семенов Н.А. Электродинамика. М. (1973). 239 с.