

ПОВЕРХНОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
ИТТРИЕВЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

Н.В. Анщукова, А.И. Головашкин, Б.Г. Журкин, О.М. Иваненко,
А.Л. Карузский, А.Е. Крапивка, К.В. Мицен

Измерено поверхностное сопротивление керамических образцов Y-Ba-Cu-O в сверхпроводящем и нормальном состояниях на частоте 9 ГГц. Для однофазных образцов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ остаточное поверхностное сопротивление в сверхпроводящем состоянии не превышало $5 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Исследование СВЧ характеристик высокотемпературных сверхпроводников лантанового /1/ и иттриевого /2, 3/ классов может прояснить механизм сверхпроводимости в них и указать возможные практические применения. Далее приводятся данные по измерениям поверхностного сопротивления на частотах ~ 9 ГГц высокотемпературных сверхпроводящих керамик Y-Ba-Cu-O в нормальном (R_s^H) и сверхпроводящем (R_s^{OCT}) состояниях. Однофазные образцы изготовлены по стандартной технологии с использованием окислов соответствующих металлов.

Высокочастотное поверхностное сопротивление измерялось резонаторным методом /4, 5/ с использованием экранированного симметричного микрополоскового резонатора /5/.

Материалом металлического экрана и полуволновой полоски служил ниобий, диэлектрические диски выполнены из тефлона. Нагруженная добротность резонатора без образца определялась соотношением /4, 5/

$$Q^{-1} = R_s^{Nb}/G + \operatorname{tg} \delta + Q_u^{-1}, \quad (1)$$

где R_s^{Nb} — поверхностное сопротивление ниобия; G — геометрический фактор (равный для данного резонатора 17 Ом); $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс потерь диэлектрика (для тефлона $\sim 10^{-7}$ /6/); Q_u^{-1} — потери на излучение. Для данных опытов $Q \approx 10^5$ при $T = 4 \div 5$ К и определялась потерями на излучение /5/. Образцы с диаметром 4 мм и высотой 0,6 мм помещались в полость микрополоскового резонатора. Для этого в одном из тефлоновых дисков высверливалось отверстие, в которое плотно вставлялся исследуемый образец. Нагруженная добротность резонатора с измеряемым образцом $Q_{обр}$ определялась соотношением

$$Q_{обр}^{-1} = R_s/G_{обр} + Q^{-1} + \Delta(Q_u^{-1}), \quad (2)$$

в котором R_s и $G_{обр}$ — поверхностное сопротивление и геометрический фактор образца; $\Delta(Q_u^{-1})$ — изменение потерь на излучение за счет введения образца в полость резонатора. Значения $G_{обр}$ и $\Delta(Q_u^{-1})$ определялись путем измерения $Q_{обр}$ для двух металлических образцов (медь и ниобий) с известными различными значениями R_s . Для данной геометрии расположения образца в полости резонатора $G_{обр} \geq 540$ Ом. Согласно (1), (2), при точности измерения добротности методом девиации частоты $\pm 5\%$ /5/ измерительный микрополосковый резонатор позволял измерять значения R_s образцов $> 5 \cdot 10^{-4}$ Ом при $T < 9$ К и $\geq 0,1$ Ом при $T > 9$ К.

В левой части табл. 1 приведены результаты измерений на постоянном токе: температуры начала и конца сверхпроводящего перехода T_K^H и T_K^K , удельного сопротивления $\bar{\rho}$ при $T \approx 300$ К и диамагнитной восприимчивости $\chi(T)$. В правой части представлены результаты СВЧ измерений: поверхностное сопротивление R_s^H при $T \approx 300$ К, остаточное поверхностное сопротивление R_s^{OCT} при $T < 9$ К, а также удельное сопротивление ρ и глубина скин-слоя $\delta_{кул}$ при $T \approx 300$ К, оцененные из значений R_s^H по формулам классического скин-эффекта для однородной гладкой металлической поверхности /4/. Наблюдается корреляция между характеристиками сверхпроводимости, измеренными на постоянном токе, и R_s^{OCT} : по мере уменьшения

ширины сверхпроводящего перехода и увеличения доли сверхпроводящей фазы в образце (возрастание абсолютной величины χ) от образца 1 к образцу 3 R_S^{OCT} уменьшается и для лучшего из измеренных образцов не превышает величины $5 \cdot 10^{-4}$ Ом, т.е. величины на порядок меньшей, чем минимальное значение R_S , достижимое на частоте ~ 9 ГГц для очень чистых меди или алюминия в нормальном состоянии при низких температурах /4/.

Т а б л и ц а 1

Свойства образцов иттриевых керамик различного состава

№ образца	Состав образца	Измерения на постоянном токе				Измерения на частоте 9 ГГц			
		$T_{K'}^H$, К	$T_{K'}^K$, К	$\chi(T)$	$\bar{\rho}$, Ом·см ($T = 300$ К)	R_S^H , Ом ($T = 300$ К)	$\tilde{\rho}$, Ом·см ($T = 300$ К)	$\delta_{KЛ}$, мкм ($T = 300$ К)	R_S^{OCT} , Ом ($T < 9$ К)
1	$Y_{1,2}Ba_{0,8}CuO_4$	90,5	67	-0,04(4,2 К)	1,0	20	1,15	600	0,12
2	$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$	105	83	-	$8 \cdot 10^{-3}$	2,1	$12 \cdot 10^{-3}$	58	$6 \cdot 10^{-3}$
3	$Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$	94	92	-1,0 (80 К)	$4 \cdot 10^{-4}$	0,3	$3,5 \cdot 10^{-4}$	10	$< 5 \cdot 10^{-4}$

Существенным моментом является получение сверхпроводящих образцов Y-Ba-Cu-O с высокими значениями критического тока I_K . На это указывает тот факт, что у исследованных образцов, обладающих относительно низким значением I_K ($\sim 10^1 \div 10^2$ А·см $^{-2}$ при $T \cong 4,2$ К), наблюдалась зависимость R_S^{OCT} от СВЧ мощности. Так, для образца № 3 увеличение R_S^{OCT} по сравнению с величиной, приведенной в таблице, наблюдается при средней амплитуде магнитного СВЧ поля на поверхности образца $\sim 0,03$ Гс. Учитывая характерный для теории БКШ температурный ход изменения глубины проникновения магнитного поля в сверхпроводник Y-Ba-Cu-O /7/, из соотношения R_S^{OCT} и R_S^H и значения $\delta_{KЛ}$ получим оценку /4/ глубины проникновения СВЧ поля в образец № 3 в сверхпроводящем состоянии ~ 1 мкм. Тогда плотность тока в нем, которая соответствует началу увеличения R_S^{OCT} , оказывается $\approx 10^2$ А/см 2 , что коррелирует с величиной критического тока для этого образца. Соответствующие оценки для образца № 2 дают на порядок меньшее значение плотности тока (~ 10 А/см 2).

Глубина проникновения СВЧ поля (оцененная по изменению поверхностного импеданса без учета шероховатости и неоднородности поверхности металла) имеет относительно большую величину по сравнению с глубиной проникновения постоянного магнитного поля для сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ($\lambda(0) = 0,14$ мкм /7/). Кроме того, наблюдается отклонение от правила Сильсби, характерное для образцов с размерами, малыми по сравнению с глубиной проникновения, и выражающееся в том, что напряженность СВЧ магнитного поля на поверхности образца, соответствующая величине тока в образце, при котором начинается увеличение R_S^{OCT} , значительно меньше напряженности магнитного поля Земли. Из вышеизложенного можно заключить, что определяющее влияние на СВЧ свойства керамик Y-Ba-Cu-O оказывает их гранулярная структура. Другими словами, наличие зазоров и тонких перемычек между гранулами в керамических образцах приводит к увеличению эффективной глубины проникновения СВЧ поля и уменьшению I_K . Кроме того, неоднородность состава образцов также дает свой вклад в возрастание R_S^{OCT} , что видно из сравнения свойств образца № 3 и более неоднородного образца № 2.

На рис. 1 показаны температурные зависимости удельного сопротивления $\bar{\rho}$ и мнимой части поверхностного импеданса X для образца № 2. Кроме особенности, связанной с переходом образца в сверхпроводящее состояние при $T \gtrsim 90$ К, в $X(T)$ наблюдается особенность, соответствующая переходу при $T = 60 - 65$ К. Можно связать этот переход с наличием в поверхностном слое второй устойчивой фазы.

В этом случае термодинамический потенциал Гиббса в системе $YBa_2Cu_3O_y$ при изменении y в области низких температур имеет два минимума, соответствующих двум стабильным фазам. Первая ($y = 7$) — это известная высокотемпературная сверхпроводящая фаза $YBa_2Cu_3O_7$ с $T_K \gtrsim 90$ К, вторая ($y = 6,5$) содержит в среднем 6,5 атомов кислорода в элементарной ячейке и упорядоченную систему вакансий кислорода.

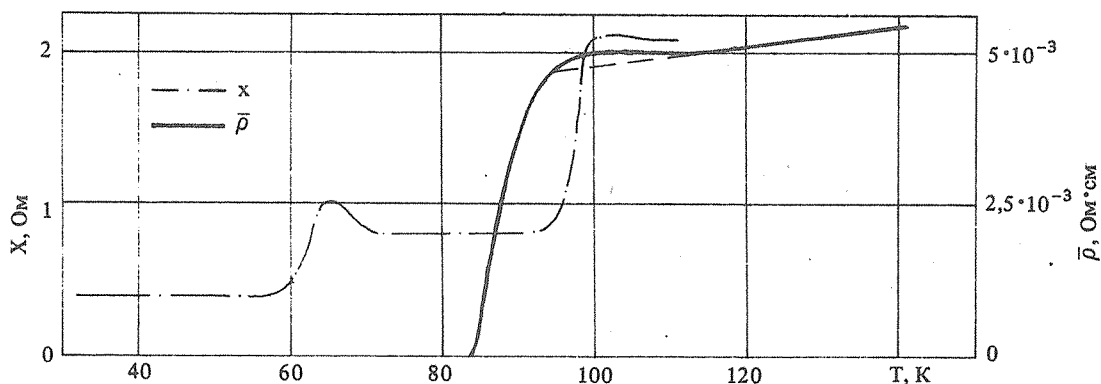


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления $\bar{\rho}$ на постоянном токе и мнимой части поверхностного импеданса X на частоте ~ 9 ГГц для образца № 2. Пунктиром для $\bar{\rho}$ показано продолжение линейной зависимости.

Образцы метастабильных составов вблизи этой фазы являются сверхпроводящими с $T_K \approx 60$ К. Соединения промежуточных составов абсолютно нестабильны. В неоднородном поверхностном слое, обедненном кислородом, имеются фактически две сверхпроводящие фазы, что и проявляется при измерении поверхностного импеданса.

Таким образом, исследования СВЧ свойств высокотемпературных сверхпроводящих керамик $Y-Ba-Cu-O$ показали, что определяющее влияние на величину R_S^{OCT} оказывает гранулярная структура сверхпроводящей керамики. Такие образцы удобно использовать в ограничительных, переключающих и т.п. СВЧ устройствах. Для получения более низких R_S^{OCT} необходимо изготавливать образцы $Y-Ba-Cu-O$ с более высокими значениями I_K .

ЛИТЕРАТУРА

1. Bednorz J. G., Müller K. A. Z. Phys., **В64**, 189 (1986).
2. Chu C. W. et al. Phys. Rev. Lett., **58**, 405 (1987).
3. Bourne L. C. et al. Phys. Lett., **120A**, 494 (1987).
4. Менде Ф. Ф., Спицын А. И. Поверхностный импеданс сверхпроводников. Киев, Наукова думка, 1985.
5. Головашкин А. И. и др. Препринт ФИАН № 135, М., 1981; Краткие сообщения по физике ФИАН, № 6, 7 (1982); 23-е Всесоюзное совещание по физике низких температур. Тезисы докладов. Таллин, изд. ИХБФ АН ЭССР, 1984, ч. I, с. 266.
6. Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И. Системы с малой диссипацией. М., Наука, 1981.
7. Harshman D. R. et al. Preprint Bell Labs., USA, 1987.

Поступила в редакцию 13 ноября 1987 г.