

05.4;12

©1995

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛЕНОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*В.В.Бочков, А.С.Карасев*

Экспериментальные данные о поверхностном сопротивлении  $R_s$  пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на СВЧ важны как с точки зрения получения сведений о физических механизмах, обуславливающих сверхпроводимость, так и в плане выяснения возможностей технического применения ВТСП в ливейных и нелинейных СВЧ устройствах и разработки необходимых технологических процессов. Относительно высокая температура (выше 77 К) и малое значение наблюдаемого сопротивления определяют трудности измерений. В настоящее время основным используемым на практике является метод объемного резонатора, в котором  $R_s$  находят из измеренного значения добротности СВЧ резонатора, содержащего сверхпроводящую пленку. Применяют три разновидности резонаторов: полый цилиндрический объемный с типом колебаний  $H_{01n}$ , в котором один из торцевых экранов из ВТСП пленки  $[1,2]$ ; диэлектрический резонатор с одним из торцевых экранов из ВТСП пленки  $[3,4]$ ; плоскопараллельный резонатор, образованный двумя пленками ВТСП с тонким диэлектриком между ними, работающий на типе колебаний  $TEM_{mn}$   $[5,6]$ . Всем вариантам присущи такие недостатки, как необходимость иметь пленки большой площади, сложность конструкции и требование механической прецизионности, а также малую чувствительность, поскольку вклад в потери резонатора металлических поверхностей и диэлектрика оказывается больше, чем потери в сверхпроводящей пленке.

Ниже описан простой новый метод измерений поверхностного сопротивления, исключаяющий перечисленные недостатки. Метод базируется на использовании резонансных свойств образца, размещенного в поперечном сечении прямоугольного волновода и измерениях коэффициента передачи на резонансной частоте. Регистрируемый эффект целиком определяется проводимостью образца ВТСП, благодаря чему диапазон измерений расширяется в область

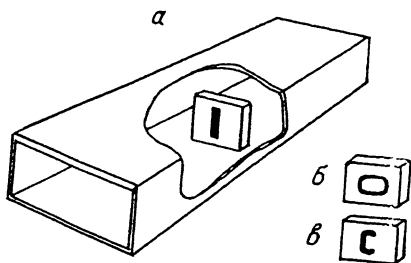


Рис. 1. Конструкция измерительного устройства. а — эскиз измерительной камеры, б — возможные конфигурации образцов.

малых значений  $R_s$ . Эскиз измерительной камеры показан на рис. 1, а. Она образована отрезком прямоугольного волновода стандартного сечения, в котором находится диэлектрическая подложка с нанесенной пленкой. Ширина подложки меньше ширины волновода. ВТСП пленка может иметь конфигурацию в виде узкой полоски, ориентированной вдоль поля  $E$  волновода, либо в виде узкого кольца или полукольца (рис. 1 б, в). ВТСП пленка является проводящей неоднородностью, включенной в плоскость поперечного сечения волновода. Всем конфигурациям пленок соответствует эквивалентная схема в виде последовательного  $L, C, R$  контура с резонансной частотой, определяемой размерами проводников и диэлектрической подложки [7]. Если волновод возбуждается генератором с внутренним сопротивлением  $W$  и нагружен на согласованную нагрузку  $R_n = W$ , то эквивалентная схема устройства, в отличие от [8], представима рис. 2 а, а частотная характеристика коэффициента передачи, определяемого отношением амплитуд прошедшей  $U_{пр}$  и падающей  $U_{пад}$  волн,  $K = U_{пр}/U_{пад}$ , имеет вид, показанный на рис. 2, б. На резонансной частоте  $f_0$  коэффициент

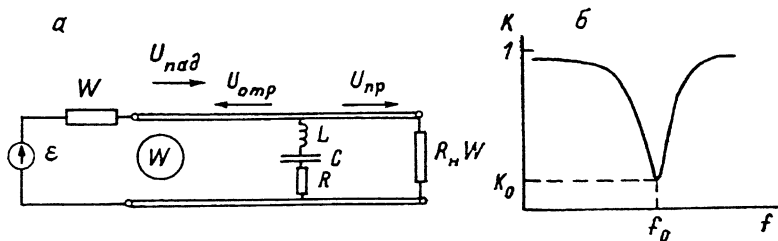


Рис. 2. Схема измерений. а — электрическая эквивалентная схема, б — типовая частотная характеристика.

передачи имеет значение  $K_0$ ,

$$K_0 = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{W}{R}}. \quad (1)$$

Между поверхностным сопротивлением пленки  $R_s$  и полным сопротивлением контура  $R$  имеется линейная связь

$$R = \gamma R_s, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий распределение тока по проводящей пленке. Таким образом, измерив коэффициент передачи  $K_0$  и воспользовавшись соотношениями (1) и (2), находим

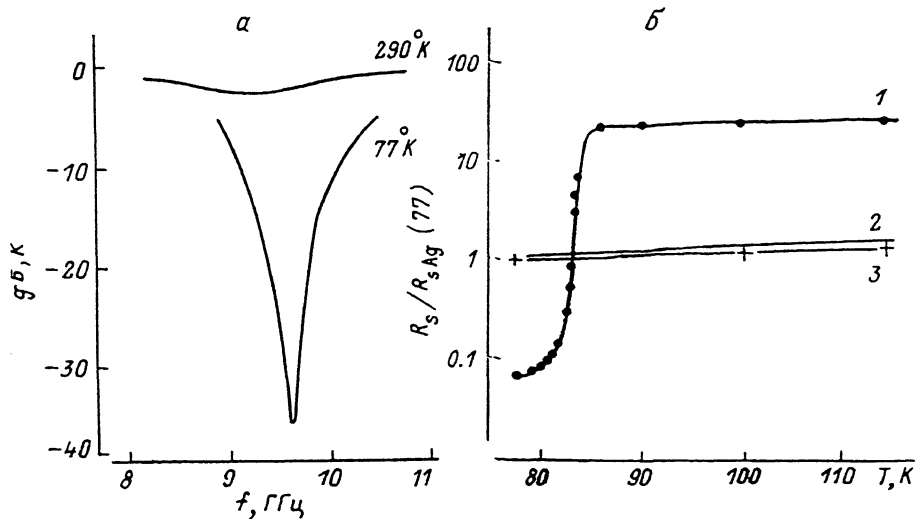
$$R_s = \frac{1}{\gamma} \frac{W}{2} \frac{K_0}{1 - K_0}. \quad (3)$$

При  $K_0 \ll 1$  из (3) имеем линейную связь  $R_s$  и  $K_0$

$$R_s \approx \frac{1}{\gamma} \frac{W}{2} K_0, \quad (4)$$

что дает возможность измерения малых значений  $R_s$  с погрешностью, определяемой погрешностью измерения  $K_0$ . Значение коэффициента  $W/2\gamma$  может быть рассчитано теоретически, однако проще определить его экспериментально, изготовив калибровочный образец из материала с известным  $R_s$  (медь, серебро) на подложке с такими же геометрическими размерами. Таким образом, преимущества предлагаемого способа заключаются в конструктивной простоте измерительного устройства, малых размерах ВТСП пленки и возможности измерения малых значений  $R_s$ .

Описанным способом были выполнены измерения поверхностного сопротивления пленок из Ag и YBaCuO (1,2,3) в трехсантиметровом диапазоне длин волн. Использовался волновод стандартного сечения  $10 \times 23$  мм и подложки NdGaO<sub>3</sub> размером  $5 \times 10$  мм, толщиной 0.6 мм. Размеры пленок  $5.8 \times 0.2$  мм. ВТСП пленка выращивалась методом лазерного распыления и имела толщину  $\sim 100$  Å. Для измерения коэффициента передачи использовался прибор типа P2-61. Измерительная камера с широкополосным волноводно-коаксиальным переходом на конце была герметизирована и погружалась в жидкий азот. Используемая для контроля температуры термopара размещалась внутри волновода в непосредственной близости от образца. Температурная зависимость снималась в ходе охлаждения (или разогрева) камеры без установления стационарных режимов в промежуточных точках между температурой азота и



**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости. *а* — частотные характеристики образца YBaCuO при различных температурах; *б* — температурные зависимости нормированного поверхностного сопротивления: 1 — YBaCuO, 2 — Ag, 3 — расчетная для Ag.

комнатной. Поэтому данные контроля температуры следует рассматривать как оценочные. Экспериментальные результаты приведены на рис. 3. На рис. 3, *а* показаны частотные характеристики, наблюдаемые на экране Р2-61 при измерениях ВТСП образца при различных температурах, а на рис. 3, *б* — зависимости от температуры поверхностного сопротивления, нормированные к сопротивлению Ag при 77 К. Как видно, в образце ВТСП наблюдался переход в сверхпроводящее состояние при температуре около 83 К, а минимальное значение сопротивления  $R_s$  было в 14 раз меньше, чем у серебра. Кривая 3 представляет расчетную температурную зависимость  $R_s(T)$  серебра. При изменении температуры от 77 до 300 К расчетное изменение  $R_s$  серебра составляет 2.37 раза, а полученное в эксперименте 1.89. Причиной имеющегося расхождения может быть то, что расчет был проведен на основе данных, относящихся к плавленому серебру.

Разработан простой метод измерения поверхностного сопротивления на СВЧ пленок высокотемпературных сверхпроводников. Авторы благодарят сотрудников ФТИ им. А.Ф. Иоффе И.А. Линийчука и В.Н. Боревича за изготовление образцов. Работа выполнена в рамках программы "Межсоединения", тема № 90528.

## Список литературы

- [1] *Вендик О.Г., Гайдуков М.М. и др.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 24. С. 2209.
- [2] *Klein N., Mueller G. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 8. P. 757.
- [3] *Hakki B.W., Coleman P.D.* // IRE Trans. on MTT. 1960. V. MTT-8. N 4. P. 402.
- [4] *Mage J.C., Marcilhac B. et al.* // Proc. of 23-rd European Microwave Conference. Spain, sept. 1993.
- [5] *Taber R.C.* // Rev. Sci. Instrum. 1991. V. 61. P. 2200.
- [6] *Белов Р.К., Варганов А.В. и др.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 11. С. 1.
- [7] *Гуфта Л., Гардж Р., Чадха Р.* // Машинное проектирование СВЧ устройств. М., 1987. 432 с.
- [8] *Miranda F.A., Gordon W.L. et al.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. N 10. P. 5450.

Санкт-Петербургский  
государственный технический  
университет

Поступило в Редакцию  
24 сентября 1994 г.

---