

05.4:09

## Микроволновое отражение ВТСП образцов в волноводных $E$ -структурах

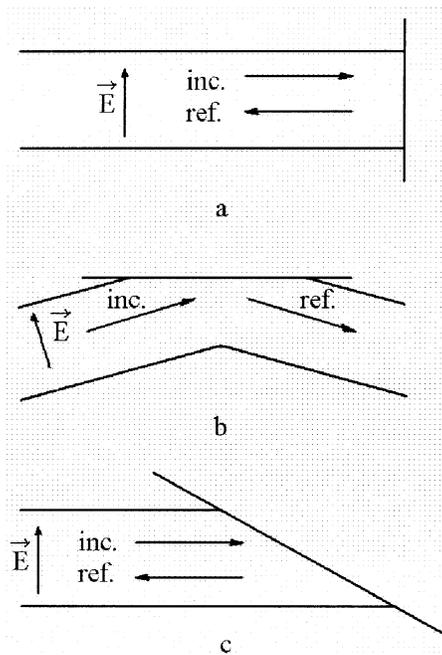
© А.И. Губин, А.А. Лавринович, Н.Т. Черпак

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

Поступило в Редакцию 13 ноября 2000 г.

Впервые измерена микроволновая отражательная способность ВТСП образцов в двух волноводных  $E$ -структурах. Используются структуры типа закорачивающей наклонной нагрузки и уголкового изгиба в  $E$ -плоскости. Получено хорошее совпадение экспериментальной температурной зависимости коэффициента отражения текстурированного образца  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  как закорачивающей наклонной нагрузки с вычисленной зависимостью, полученной на основе улучшенной двухжидкостной модели ВТСП.

Для изучения свойств микроволнового импеданса сверхпроводников, включая высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), используются различные подходы. В большинстве из них применяются различные типы резонансных структур, однако известна также и нерезонансная техника, основанная на измерении микроволновой мощности, проходящей через ВТСП пленку [1]. При этом измерения прошедшей мощности выполняются для тонких образцов, размещенных в поперечном сечении волновода [2], однако этот подход можно использовать только для очень тонких образцов (порядка 10 nm для ВТСП). Для более толстых пленок, казалось бы, можно было бы использовать измерение коэффициента отражения  $\Gamma = |\Gamma|e^{i\psi}$ , который также несет информацию о поверхностном импедансе  $Z_s$  (или микроволновой проводимости  $\sigma$ ) образца. Однако коэффициент  $|\Gamma|$  для толстой пластинки проводника, расположенного перпендикулярно продольной оси волновода (рис. 1,  $a$ ), близок к 1 для всех проводников [3] и изменяется незначительно при изменении  $\sigma$  даже в больших пределах [4]. Тот же результат получается при рассмотрении нормального падения плоской электромагнитной волны. Вследствие этого переход ВТСП из нормального в сверхпроводящее состояние слабо отражается на температурной зависимости  $\Gamma$ .

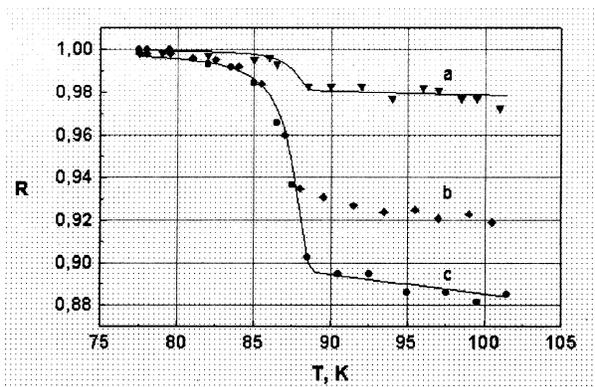


**Рис. 1.** Волноводные секции, используемые для измерений; *a* — закорачивающая плоскость, расположенная перпендикулярно продольной оси волновода; *b* — уголкового изгиба; *c* — наклонная закорачивающая плоскость.

Недавно экспериментально показано в инфракрасном диапазоне, что ситуация может быть улучшена путем использования *p*-поляризованного луча, падающего на образец под скользким углом [4].

Хотя фактор увеличения чувствительности к изменению  $\sigma$  уменьшается с понижением частоты, ожидается, что эффект скользкого угла падения должен наблюдаться также и в микроволновом диапазоне. Собственные волны в волноводе, включая основную  $H_{10}$ -волну, не являются плоскими волнами, однако они могут быть представлены как сумма плоских волн. Таким образом, эффект скользкого падения для ВТСП плоскости образца должен наблюдаться также и в волноводе.

Наклон образца был осуществлен в двух волноводных структурах, а именно в уголкового изгиба (рис. 1, *b*) и в секции с закорачивающей



**Рис. 2.** Экспериментальные температурные зависимости коэффициента отражения от ВТСП образца для волноводных секций *a*, *b* и *c* (расчетные зависимости изображены сплошной линией).

наклонной нагрузкой (рис. 1, *c*). Изгиб волновода в первом случае и наклон образца во втором реализованы в *E*-плоскости. В противоположность второму случаю падающая и отраженная волны в первом случае развязаны между собой. Применение волноводных *E*-структур аналогично падению *p*-поляризованной плоской волны под произвольным углом падения на образец.

Применялся волновод сечением  $5.2 \times 2.6$  мм. Изменения отражательной способности  $|\Gamma|^2$  и фазы  $\psi$  коэффициента отражения измерялись при изменении температуры текстурированного образца  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  в интервале от 77 до 300 К в 6 мм диапазоне волн с помощью микроволнового фазового моста. Измерения выполнялись при двух значениях угла ориентации образца в волноводе, которые равны  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 80^\circ$  (углы отсчитывались между направлением распространения волны в волноводе и нормалью к отраженной поверхности образца для обеих волноводных секций).

Экспериментальные результаты измерений температурной зависимости  $|\Gamma|^2$  показаны на рис. 2. Можно видеть, что фактор увеличения чувствительности  $|\Gamma|$  к изменению проводимости образца равен около 10 для закорачивающей нагрузки и около 7 для уголкового изгиба. Измерения проводились на частоте 45 GHz. Отмечается немонотон-

ная частотная зависимость указанного фактора в полосе пропускания волновода для закорачивающей нагрузки, что, по-видимому, имеет аппаратное происхождение. При этом эффект изменяется примерно в 1.5 раза. Очевидно, можно избавиться от отмеченной немонотонности, улучшив развязку падающей и отраженной волн (например, с помощью циркулятора).

На рис. 2 экспериментальные данные по зависимости  $|\Gamma|$  представлены вместе с модельными вычислениями для ВТСП материала, размещенного в качестве закорачивающей нагрузки при  $\Theta = 0^\circ$  и  $\Theta = 80^\circ$ . Для случая углового изгиба вычисления не проведены из-за сложности электродинамического анализа самой волноводной секции.

Вычисления основаны на улучшенной двухжидкостной модели микроволновых свойств ВТСП с учетом температурного поведения глубины проникновения поля  $\lambda_L$  и величины остаточного поверхностного сопротивления [5]. Подстроечные параметры ( $\sigma_N = 6 \cdot 10^4 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ;  $\lambda_L = 10^{-6} \text{ m}$ ,  $\gamma = 1.7$ ,  $\alpha = 4.0$ , обозначения см. [5]) хорошо согласуются с известными данными. Измерения фазы и амплитуды коэффициента отражения могут быть использованы для определения комплексной диэлектрической функции  $\varepsilon$  и/или поверхностного импеданса  $Z_s$  в зависимости от внешних условий (температура, магнитное поле, микроволновая или оптическая накачка и др.).

Авторы выражают благодарность G. Krabbes'у и А. Кордюку за предоставление образца ВТСП для измерений.

## Список литературы

- [1] *Jenkins A.P., Kale K.S., Dew-Hughes D.* // Studies of High Temperature Superconductors. 1996. V. 17. P. 179–219.
- [2] *Wu P.H., Min Q.* // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. P. 5550–5553.
- [3] *Von Hippel A.R.* // Dielectric and Waves. New York, John Wiley and Sons, Inc. London, Chapman and Hill, Limited, 1954.
- [4] *Somal H.S., Feenstra B.J., Schützmann J., Jae Hoon Kim, Barber Z.H., Duijn V.H.M., Hien N.T., Menovsky A.A., Palumbo Mario, van der Marel D.* // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 1525–1528.
- [5] *Vendik O.G., Vendik I.B., Kaparkov D.I.* // IEEE Trans. on Microwave Theory Tech. 1998. V. 46. N 5. P. 469–478.