

05

## Измерение импеданса микропроводов в прямоугольном волноводе

© В.Н. Бержанский, В.И. Пономаренко, В.В. Попов, А.В. Торкунов

Таврический национальный университет, Симферополь, Украина  
E-mail: slava-popov@nextmail.ru

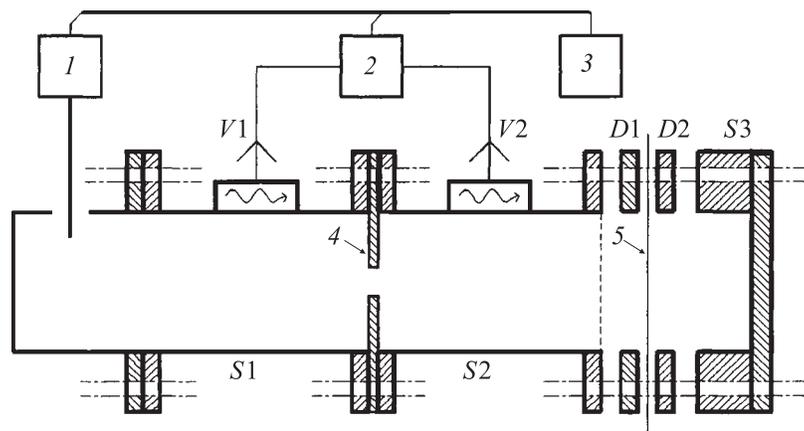
Поступило в Редакцию 20 июня 2005 г.

Предложен метод определения импеданса микропроводов в диапазоне сверхвысоких частот, основывающийся на измерении комплексного коэффициента отражения от образца, расположенного в прямоугольном короткозамкнутом волноводе. Приведены результаты измерения зависимости импеданса от величины внешнего постоянного магнитного поля для микропровода на основе кобальта.

Аморфные микропровода обладают физическими свойствами, перспективными в плане их практического применения. Например, в датчиках магнитного поля и радиопоглощающих структурах используется эффект сильной зависимости импеданса ферромагнитных проводов от напряженности внешнего магнитного поля, а также естественный ферромагнитный резонанс [1,2].

В диапазоне сверхвысоких частот измерения импеданса обычно проводятся с использованием коаксиальных линий, в которых исследуемый микропровод замещает участок центрального проводника. Импеданс вычисляется в квазистатическом приближении по измеренному с помощью векторного анализатора цепей комплексному коэффициенту отражения  $R$  [3]. Требование выполнения условий квазистатики приводит к тому, что для частот порядка нескольких GHz длина образцов не должна превышать 1–2 mm, что затрудняет их размещение в коаксиальной измерительной ячейке.

В [4] предложен волноводный метод измерения импеданса, основанный на измерении с помощью скалярного анализатора цепей модулей коэффициентов отражения и прохождения для микропровода, помещенного в согласованный прямоугольный волновод. Модуль  $R$  составляет при этом порядка нескольких процентов и сравним с собственным коэффициентом отражения согласованной нагрузки, что приводит к



**Рис. 1.** Установка для измерения импеданса микропроводов (1 — генератор качающейся частоты, 2 — скалярный анализатор цепей, 3 — компьютер, 4 — диафрагма, 5 — микропровод).

большой относительной погрешности измерения  $R$  микропровода и соответственно его импеданса.

В настоящей работе предложен метод измерения импеданса микропроводов, свободный от указанных недостатков. Метод реализован на измерительной установке, изображенной на рис. 1. Установка состоит из генератора качающейся частоты, двух одинаковых волноводных секций  $S1$ ,  $S2$  сечением  $23\text{ mm}$  на  $10\text{ mm}$  и длиной  $0.425\text{ m}$ , снабженных направленными ответвителями и разделенных симметричной индуктивной диафрагмой толщиной  $0.1\text{ mm}$  с раскрытием окна  $9\text{ mm}$ , держателя образца, состоящего из двух коротких волноводных секций  $D1$ ,  $D2$  длиной соответственно  $4.06$  и  $4.76\text{ mm}$ , и короткозамкнутой секции  $S3$  длиной  $10.02\text{ mm}$ . Микропровод в держателе расположен нормально широкой стенке волновода на расстоянии  $x_0 = 11.5\text{ mm}$  от узкой стенки. Непосредственно измеряемой величиной является многорезонансная зависимость  $\Psi(\omega) = V_2/V_1$ , где  $V_1$ ,  $V_2$  — сигналы, снимаемые со скалярных детекторов направленных ответвителей. Обработка функции методом, изложенным в [5], позволяет определить коэффициент отражения  $R$ . При установке микропровода в держатель

образец позиционируется в положении  $x_0$  с помощью насечек на секции  $D1$ , после чего секции  $D1$ ,  $D2$  стягиваются винтами. При этом стеклянная оболочка микропровода раздавливается и обеспечивается его электрический контакт с волноводом. Измерения импеданса проводились при наложении вдоль оси провода внешнего постоянного магнитного поля с напряженностью  $H$ , создаваемого электромагнитом.

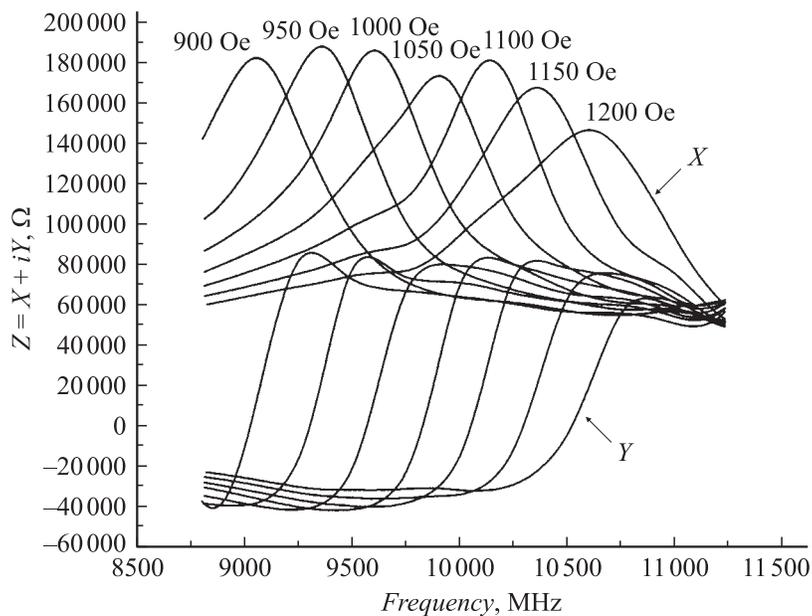
Для решения задачи рассеяния на микропроводе в короткозамкнутом прямоугольном волноводе применен подход, аналогичный [4,6]. При выборе временного множителя в виде  $\exp(+i\omega t)$  коэффициент отражения  $R$  в плоскости, в которой установлен микропровод, имеет вид

$$R = -e^{2i\Gamma_1 l} - \frac{2(1 - e^{2i\Gamma_1 l})^2 \sin^2 \frac{\pi x_0}{a}}{\frac{2a\Gamma_1}{\omega\mu_0} Z + 2F(r) - F(2l+r) - F(2l-r)}, \quad (1)$$

$$F(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Gamma_1}{\Gamma_n} \sin^2 \frac{n\pi}{a} x_0 \exp(i\Gamma_n s),$$

где  $\Gamma_m$  — постоянная распространения волны типа  $H_{m0}$ ,  $a$  — размер широкой стенки волновода,  $r = d/2$ ,  $d$  — диаметр провода,  $l$  — расстояние от провода до закоротки,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,  $Z$  — импеданс. Абсолютная погрешность вычисления  $R$  по формуле (1) оценивается аналогично [6] и по порядку величины равна  $(d/\lambda)^2$ , где  $\lambda$  — длина волны в волноводе. Таким образом, при значениях  $d \sim 10 \mu\text{m}$ ,  $\lambda \sim 1 \text{cm}$  относительная погрешность имеет порядок  $10^{-6}$ . Формула (1) использовалась для определения величины  $Z$  по измеренным значениям  $R$ . С целью улучшения сходимости ряда  $F(s)$  из него выделялась и аналитически суммировалась главная часть.

Для микропровода состава  $\text{Co}_{68.7}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{13}\text{Si}_{11}\text{Mo}_{2.3}$  с диаметром  $d = 8.2 \mu\text{m}$ , находящегося в стеклянной оболочке толщиной  $2.5 \mu\text{m}$ , на рис. 2 приведены измеренные значения частотных зависимостей действительной ( $X$ ) и мнимой ( $Y$ ) составляющих импеданса при различных значениях напряженности  $H$  внешнего магнитного поля, выраженной в эрстедах. Влияние стеклянной оболочки на величину  $R$  несущественно, поскольку, как показывает оценка, ток смещения в оболочке на несколько порядков меньше, чем ток в проводящей жиле. Как видно из рисунка, частотная зависимость импеданса имеет резонансный характер, причем резонансная частота зависит от  $H$ , что объясняется эффектом ферромагнитного резонанса в микропроводе.



**Рис. 2.** Действительная ( $R$ ) и мнимая ( $X$ ) части импеданса микропровода при различных значениях внешнего магнитного поля.

Относительные погрешности  $\Delta Z$  для величин  $X$  и  $Y$  определялись путем внесения в измеренные значения  $R$  образца абсолютных погрешностей  $\Delta|R| = 0.01$  и  $\Delta \arg R = 1^\circ$  для модуля и фазы  $R$ , которые соответствуют точности многорезонансного метода измерения  $R$  [5] и точности современных векторных анализаторов цепей. Величина погрешности  $\Delta Z$  не превышает 5%.

Таким образом, предложенный волноводный метод измерения импеданса микропроводов в диапазоне сверхвысоких частот более прост экспериментально и является более точным по сравнению с известными методами. Точность измерения импеданса практически полностью определяется только точностью измерения комплексного коэффициента отражения в волноводе, поскольку при выводе формул (1) не используется квазистатическое приближение. При использовании современной техники при измерении  $R$  относительная погрешность измерения импеданса не превышает 0.05.

## Список литературы

- [1] *Zhikov A.* // JMMM. 2002. V. 242–245. P. 216–223.
- [2] *Баранов С.А.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 14. С. 21–23.
- [3] *Me'nard D., Britel M., Ciureanu P.* et al. // Journal of Applied Physics. April 15, 1999. V. 81. Issue 8. P. 4032–4034.
- [4] *Пономаренко В.И., Бержанский В.Н., Торкунов А.В.* и др. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 3. С. 38–40.
- [5] *Пономаренко В.И., Попов В.В.* Приборы и техника эксперимента. 2005. № 1. С. 94–100.
- [6] *Левин Л.* Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981. 310 с.