

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С. А., Семиногов В. Н., Соколов В. И. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93 Вып. 5(11). С. 1654.
2. Кириленко А. А., Кусайкин А. П., Сиренко Ю. К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 24. № 10. С. 1182.
3. Вайнштейн Л. А., Суков А. И. // Радиотехника и электроника. 1984. Т. 29 № 8. С. 1472.

Институт прикладной физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
31 мая 1988 г.

УДК 621.372.351.01.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКА ПО РЕЗОНАНСАМ НА ЗАПЕРТЫХ МОДАХ

Т. И. Васильева, А. А. Кириленко, Е. А. Свердлинко

Для определения комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = \epsilon' + j\delta$  на СВЧ применяется целый ряд методов, использующих волноводные мосты, закрытые и открытые резонаторы, фурье-спектроскопию, лазеры [1]. Предлагаемая возможность

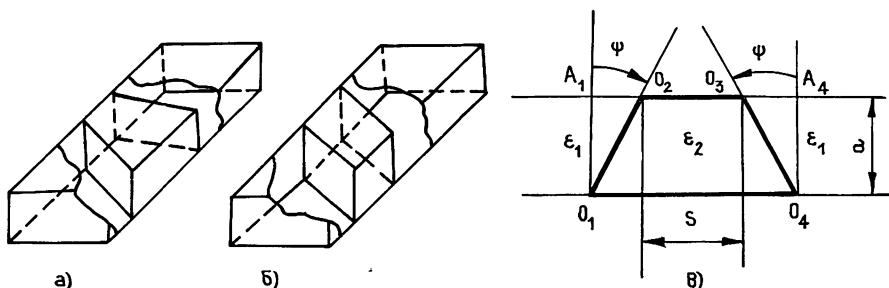


Рис. 1.

использования волноводных диэлектрических резонаторов (ВДР) в виде вставок с некоординатными границами (рис 1) для восстановления  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  по характерным точкам АЧХ таких ВДР основывается на существовании зависимости между значениями их материальных и геометрических параметров, с одной стороны, и величиной резонансной частоты и глубины подавления — с другой. Наряду с [2] это обсуждалось и в [3]. Наличие строгой математической модели дифракции волн на таких вставках и созданного на ее основе эффективного численного алгоритма [2] позволяет определять  $\epsilon'$  и  $\text{tg } \delta = \epsilon''/\epsilon'$  материалов, диэлектрические проницаемости которых лежат в широких пределах.

При этом используются не низкодобротные резонансы, обусловленные основной волной и являющиеся традиционной основой такого рода измерений, а добротные резонансы на запертых модах. Последние приводят к резонансному отражению сигнала вблизи частот высших (по поперечному индексу) колебаний ВДР. Положение этих резонансов на частотной оси определяется прежде всего величиной  $\epsilon'$ , а глубина подавления сигнала — величиной диэлектрических потерь, т. е.  $\text{tg } \delta$ . На рис. 2 представлена рассчитанная по [2] зависимость глубины подавления  $L$  от величины  $\epsilon''$  для ВДР типа «параллелограмм» при  $\epsilon' = 2,71$ ,  $\psi = 15^\circ$ ,  $s/a = 0,2$ ;  $f_{\text{рез } 1} = 25,47$  ГГц и  $f_{\text{рез } 2} = 19,45$  ГГц — соответственно сплошная и штриховая линии. Дифракционные добротности этих двух резонансов  $Q_1 = 420$  и  $Q_2 = 135$ . Переходное затухание в резо-

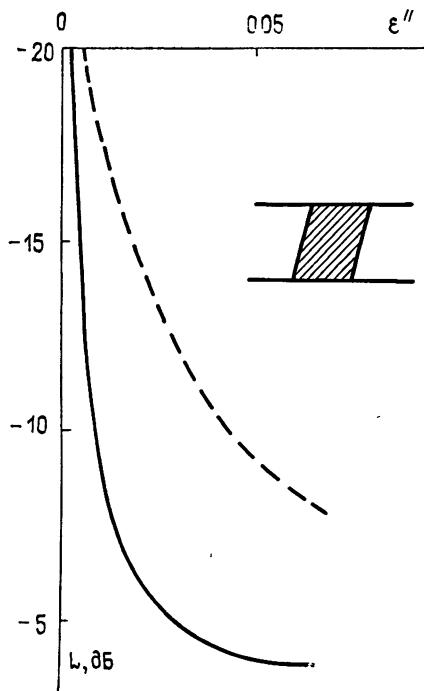


Рис. 2.

на переходное затухание в резо-

наиме тем выше, чем меньше  $\text{tg } \delta$ , что для качественных диэлектриков позволяет оперировать с малыми сигналами.

Общие закономерности резонансов на запертых модах во вставках с наклонными границами детально описаны в [2]. Резонансные частоты при малых  $\psi$  (рис. 1) приближенно определяются условием продольного резонанса высшей волны:

$$\text{arg } R_{pp} + 2\pi \zeta_p^s \frac{s}{a} = n\pi, \quad n=1, 2, \dots, \quad (1)$$

где  $R_{pp}$  — коэффициент отражения распространяющейся в диэлектрике  $H_{po}$ -волны от внутренней границы диэлектрика,  $\zeta_p^s = \sqrt{(a/\lambda)^2 \varepsilon - (p/2)^2}$ ,  $s$  — длина регулярного участка вставки. Величина  $\text{arg } R_{pp}$  находится либо путем строгого расчета [4], либо из такой грубой оценки:

$$\text{arg } R_{pp} = 2 \left( \pi \zeta_p^s \text{tg } \psi - \text{argtg } \frac{\zeta_p^s}{|\zeta_p|} \right), \quad (2)$$

где  $\zeta_p = \zeta_p^s$  при  $\varepsilon=1$ .

Эта оценка получена в предположении, что  $\text{arg } R_{pp}$  есть сумма двух слагаемых: фазы коэффициента Френеля бриллюэновских составляющих  $H_{po}$ -волны и фазового набега на расстоянии  $a \text{tg } \psi$ , равном удвоенной длине средней линии нерегулярного участка. При  $\psi < 30^\circ$ ,  $\varepsilon < 5-6$ ,  $0,6 < a/\lambda < 0,9$  формула (2) дает ошибку в определении  $\text{arg } R_{pp}$ , например, не более 5%, а при  $\psi < 15^\circ$  — не более 2%.

Из (1), (2) имеем простое дисперсионное уравнение для оценки резонансных частот

$$\pi \zeta_p^s \left( \text{tg } \psi + \frac{s}{a} \right) - \text{argtg } \frac{\zeta_p^s}{|\zeta_p|} = \frac{n\pi}{2}, \quad p=2, 3, \dots, \quad (3)$$

которое дает первое приближение в задаче поиска  $\varepsilon'$  по  $f_{\text{рез}}$ ,  $s$ ,  $a$  и  $\psi$ . В таком режиме, например, когда внутри диэлектрика распространяется две волны, а в пустых волноводах — по одной (так называемый режим (1, 2, 1)), из (3) следует оценка общего количества резонансов в этом частотном диапазоне:

$$N = \text{entier} (2\sqrt{\varepsilon' - 1} (s/a + \text{tg } \psi) + 1). \quad (4)$$

Это дает дополнительные сведения для ликвидации неоднозначности в решении обратной задачи. При наличии априорной информации о величине  $\varepsilon'$  оценки (3), (4) обеспечивают возможность определения длины образцов по исходным ориентировочным требованиям к количеству резонансов и расположению какого-либо из них.

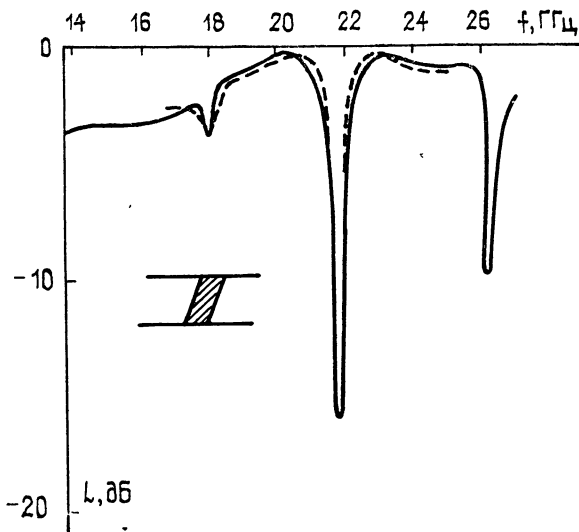


Рис. 3.

На рис. 3 (сплошная кривая) представлена зависимость переходного ослабления на ВДР типа «параллелограмм» из эбонита ( $\varepsilon = 2,71 + i0,02$ ), рассчитанная по алгоритму [2]. В полосу одномодового режима входного волновода попали три резонанса, отличающиеся глубиной подавления сигнала. Последняя тесно связана

Таблица 1

| Материал       | Табличные значения [5] |                     | Усредненные восстановленные значения |  | Восстановленные значения по двум резонансам одного образца |                      |                 |                     |
|----------------|------------------------|---------------------|--------------------------------------|--|--|----------------------|-----------------|---------------------|
|                | e'                     | tg δ                | e'                                   | tg δ   | первый резонанс  |                      | второй резонанс |                     |
|                |                        |                     |                                      |  | e'   | tg δ                 | e'              | tg δ                |
| Фторопласт-4   | 1,9—2,2                | $2-3 \cdot 10^{-4}$ | $2,03 \pm 0,01$                      | $6,7 \cdot 10^{-4}$<br>$\pm 0,5 \cdot 10^{-4}$ | 2,040  | $6,75 \cdot 10^{-4}$ | 2,038           | $6,9 \cdot 10^{-4}$ |
| Эбонит         | 2,6—2,8                | $6-8 \cdot 10^{-3}$ | $2,71 \pm 0,01$                      | $7,5 \cdot 10^{-3}$<br>$\pm 0,7 \cdot 10^{-3}$ | 2,72   | $7,7 \cdot 10^{-3}$  | 2,72            | $7,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Керамика Л-995 | 9,7—9,8                | 1,0                 | $9,79 \pm 0,04$                      | $1,15 \pm 0,12$                                | 9,78   | 1,05                 | 9,81            | 1,16                |

с исходной (дифракционной) добротностью ВДР без потерь —  $Q_{\text{диф}}$ . Высокодобротные резонансы более чувствительны к величине  $\text{tg } \delta$ . Это видно из рис. 2, где для малых поглощений кривая зависимости глубины подавления от  $\epsilon''$  идет круче для высокодобротного резонанса (сплошная линия), поэтому и точность определения  $\text{tg } \delta$  для слабопоглощающих веществ по глубине подавления высокодобротного резонанса будет выше, однако при  $(\text{tg } \delta)^{-1} \approx Q_{\text{диф}}$  они исчезают совсем и измерения возможны только на низкодобротных резонансах. Эти факторы могут быть учтены соответствующим подбором конфигурации образца, выбором угла наклона граней и типа поперечного сечения.

Наиболее важными являются следующие закономерности:

а) дифракционная добротность колебаний ВДР зависит от соотношения четностей продольных индексов близко расположенных  $H_{10n_1}$ - и  $H_{20n_2}$ -колебаний, возбуждаемых в резонаторе. Для зеркально-симметричного ВДР типа «трапеция» (рис. 1а) более добротными являются ситуации с четной величиной  $n_1 + n_2$ , а для «параллелограмма» (рис. 1б), наоборот, с  $n_1 + n_2$  — нечетной;

б) при наличии в режиме (1, 2, 1) нескольких резонансов среди них есть как добротные, так и недобротные,

в) первый по частоте резонанс для ВДР типа «трапеция» обычно отличается существенно большей добротностью, чем для «параллелограмма»;

г) и в том, и в другом случае добротность растет с уменьшением  $\phi$ .

Регулируя геометрические параметры образцов на основе предварительной информации о величине  $\text{tg } \delta$ , можно выбрать добротность резонанса оптимальной с точки зрения измерительной аппаратуры. Естественно, поглощение должно вызывать некоторое смещение резонанса по частоте, и оно может быть учтено с помощью итерационной процедуры, но расчеты показали, что это смещение значительно меньше погрешностей измерительной аппаратуры.

Измерения проводились на панорамном измерителе КСВН и ослаблений Р2-66 с дополнительным контролем частоты в фиксированных точках с помощью электронного частотомера ЧЗ-54 и преобразователя Ч45-13, обеспечивавших измерения частоты с точностью  $\Delta f = \pm 50$  кГц и ослаблений  $\Delta A = \pm (0,05A_x + 0,35)$ , где  $A_x$  — измеряемое ослабление в пределах рабочего диапазона, составившего 17,5 — 25,8 ГГц. Точность выполнения линейных размеров образцов составляла  $\pm 0,02$ . Величина  $\epsilon'$  для исследуемых образцов была в пределах от 2 до 10,  $\text{tg } \delta$  — в пределах от  $10^{-4}$  до 1.

На рис. 3 наряду с расчетной кривой зависимости переходного ослабления от частоты (сплошная кривая) приведена эта зависимость, полученная на визуальном индикаторе панорамного измерителя Р2-66 (пунктир) для эбонита ( $\epsilon = 2,71 + i0,02$ ,  $\phi = 15^\circ$ ,  $s/a = 0,561$ ). В табл. 1 приведены восстановленные с помощью данного метода значения  $\epsilon'$  и  $\text{tg } \delta$  для ряда материалов. Для каждого материала использовались четыре вкладыша, приведены значения восстановленных значений материальных параметров по двум резонансам одного образца.

Таким образом, метод, основанный на резонансных явлениях типа резонансов на запертых модах, позволяет на основе точной математической модели восстанавливать значения величин  $\epsilon'$  и  $\text{tg } \delta$  не хуже 1% и 5—7% соответственно. При этом конфигурации образцов, для которых проводятся измерения, довольно просты и технологичны в изготовлении.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Birch J R., Clark R N. // RFE. 1982 V 52 № 11/12 P 466.
- 2 Васильева Т. И., Кириленко А. А., Рудь Л. А. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 3 С. 466.
- 3 Борщевский В. В., Моденов В. П., Пирогов Ю. А. // Тезисы докл. VI Всесоюзной науч.-техн. конф. «Метрология в радиоэлектронике». — М.: Изд. ВНИИФТРИ, 1984. С. 94.
- 4 Кириленко А. А., Рудь Л. А. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22. № 10. С. 2057.
- 5 Бергер М. Н., Капидевич Б. Ю. Прямоугольные волноводы с диэлектриками. — М.: Сов. радио, 1973.

Институт радиофизики и электр. физ.  
АН СССР

Поступила в редакцию  
20 апреля 1988 г.