УДК 621.37.029.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПОТЕРЬ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ СТЕРЖНЕ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА СВЧ

В. А. Калесинскас, М. Н. Котов, В. К. Шугуров

Для развития твердотельной СВЧ электроники актуальным является изучение частотной зависимости диэлектрической проницаемости полупроводников и диэлектриков, в том числе сегнетоэлектриков, суперионных проводников и др. в широком диапазоне СВЧ. Для анизотропных кристаллов технически наиболее удобным способом определения диэлектрической проницаемости является измерение коэффициента отражения от стержня из исследуемого материала, помещаемого в волноводный тракт [1]*. При этом необходимо решать задачу, обратную к задаче о рассеянии волны H_{10} на цилиндрическом стержне с заданными параметрами. До сих пор расчет проводился на основании решения прямой задачи [2], полученного в приближении $k_0 r \ll 1$ (см., например, [1]). Однако в миллиметровом диапазоне СВЧ условие $k_0 r \ll 1$ является трудновыполнимым. Кроме того, для повышения точности измерений по методу [1] в случае небольших ε целесообразно использовать стержни с $k_0 r \approx 1$, для которых расчет по формулам [2] невозможен.

В этой работе описана методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости при произвольном значении $k_0 r$. При решении обратной задачи мы пользовались решением прямой задачи [3], обобщающим результаты [2] на случай произвольного $k_0 r$. Выбор решения [3] определялся тем, что по сравнению с другими решениями (например, [4, 5]) оно требует меньшего количества вычислений и что при решении обратной задачи значительная часть вычислений (суммирование рядов (4)) выполняется лишь однажды независимо от числа итераций. В [3], однако, содержится неточность, поэтому мы приведем здесь окончательные формулы. Пользуясь обозначениями, принятыми в [3], поле, рассеянное стержнем, запишем в виде

$$E_S = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m \left[H_m^{(2)}\left(k_0\gamma_0^+\right) \exp\left(-im\varphi_0^+\right) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(k_0\gamma_0^+\right) \exp\left(-in\varphi_0^+\right) S_{m,n} \right]. \tag{1}$$

При этом коэффициенты a_m определяются из решения системы уравнений

$$\sum_m a_m S_{m,n} + \chi_n a_n = -\sin\left[(\pi x_0/a) + n\alpha\right] \tag{2}$$

$$(n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots),$$

где введены обозначения

$$\chi_n = \frac{kJ_n'(kr)\,H_n(k_0 r) - k_0 J_n(kr)\,H_n'(k_0 r)}{kJ_n'(kr)\,J_n(k_0 r) - k_0 J_n(kr)\,J_n'(k_0 r)}; \tag{3}$$

$$S_{m,n} = \sum_{p=1}^{\infty} \left\{ \left[1 + (-1)^{m-n}\right] H_{m-}^{(2)}\left(l_p^+\right) - H_{m+n}^{(2)}\left(l_p^-\right)\right\} - (-1)^{m+n} \sum_{p=-\infty}^{0} H_{m+n}\left(l_p^-\right). \tag{4}$$

Величины коэффициентов отражения, пропускания [3] и среднего по сечению стержня квадрата напряженности СВЧ поля вычисляются по формулам

$$R = \sum_m (-1)^m (4a_m/k_1 a) \sin\left[(\pi x_0/a) + m\alpha\right]; \tag{5}$$

$$T = 1 + \sum_m (4a_m/k_1 a) \sin\left[(\pi x_0/a) + m\alpha\right]; \tag{6}$$

---

* Речь идет о кристаллах с природной анизотропией (не гиротропных). По методике, описанной в данном сообщении, измеряется компонента тензора $\hat{\varepsilon}$, параллельная вектору электрического поля волны H_{10} Вырезая или выращивая стерженек в нужном направлении, можно измерить все компоненты тензора $\hat{\varepsilon}$.

$$\overline{E^* E} = (2/r) \sum_n \pm b_n^* b_n / [(k^2 - k^{*2})] [k J_{n+1}(kr) J_n(k^* r) - k^* J_n(kr) J_{n+1}(k^* r)]. \qquad (7)$$

При прочих фиксированных параметрах комплексный коэффициент отражения (или передачи) является функцией комплексной диэлектрической проницаемости

$$R = f(\varepsilon^*) \qquad (8)$$

или

$$\operatorname{Re} R = f_1(\varepsilon, \operatorname{tg}\delta), \quad \operatorname{Im} R = f_2(\varepsilon, \operatorname{tg}\delta) \qquad (9)$$

Таким образом, при заданных значениях $\operatorname{Re} R$ и $\operatorname{Im} R$ (например, измеренных экспериментально) получается система двух нелинейных уравнений относительно ε и $\operatorname{tg}\delta$ (или σ), которая решается итерационным методом Ньютона [6] Метод обеспечивает хорошую сходимость и очень удобен для расчета плавных зависимостей ε^* от R, так как последняя рассчитанная точка может использоваться в качестве нулевого приближения для следующей точки.

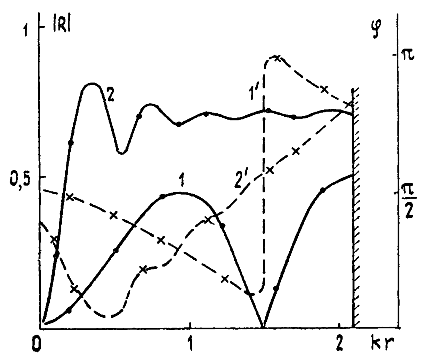

Рис 1 Зависимость модуля коэффициента отражения и его фазы от значения $k_0 r$ на частоте 18,21 *ГГц*: *1,1'* — $|R|$ и φ для фторопласта; *2,2'* — $|R|$ и φ для германия. Отсчет фазы ведется от закорачивающей металлической пластинки.

На рис 1 представлена зависимость модуля коэффициента отражения и его фазы от значения $k_0 r$. Случай $k_0 r = 2{,}1$ соответствует полному заполнению поперечного сечения волновода цилиндрическим стержнем Как видно, результаты расчета коэффициента по формулам (2)—(5) полностью совпадают с экспериментальными данными вплоть до полного заполнения волновода стержнем. Контрольный счет обратной задачи для экспериментальных точек дал значения ε и $\operatorname{tg}\delta$, соответствующие использованным материалам с точностью 1% для фторопласта ($\varepsilon = 2{,}02$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}005$) и 3% для германия* ($\varepsilon = 15{,}8$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}31$). Практически погрешность счета зависит лишь от точности измерения коэффициента отражения и размеров стержня. Эти данные показывают, что определение диэлектрической проницаемости из измерения коэффициента отражения от цилиндрического стержня в прямоугольном волноводе в режиме бегущей волны является удобным и точным методом исследования параметров полупроводников, сегнетоэлектриков, суперионных проводников, сегнетоэластиков и других анизотропных кристаллов в широком диапазоне СВЧ

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляцкас Р, Григас И.— Литовский физ. сб., 1979, **19**, № 2, с 243.
2. Григас И. П., Шугуров В К — Изв. вузов — Радиофизика, 1969, **12**, № 2, с. 307.
3. Bharti [illegible] — A. E. Ü., 1977, **31**, № 2, p. 60.
4. Мошин[illegible]й А. В, Березовский В К — Радиотехника и электроника, 1977, **22**, № 7, [illegible]350.
5. Nielse[illegible] — IEEE Trans., 1969, **MTT-17**, № 3, p. 148.
6. [illegible] Справочник по математике.— М.: Наука, 1974.— С 661.

Поступила в редакцию
30 марта 1981 г.,
после доработки
11 августа 1981 г.