

где f_0 и f – это резонансные частоты резонатора без образца и с образцом; Q_0 и Q – собственные добротности резонатора без образца и с образцом; V – объём резонатора; ΔV – объём образца. При выводе этих соотношений делался ряд предположений, главные из которых следующие: внесенный в резонатор образец диэлектрика не искажает существенно структуру поля в нём и имеет объём значительно меньший, чем объём самого резонатора. Предлагается методика, которая позволяет на практике учесть эти ограничения малости и максимально исключить их влияние на точность определения диэлектрической проницаемости исследуемого материала.

Поставленная задача решалась с помощью численного эксперимента следующим образом:

1) задавались исходные параметры исследуемого материала (ϵ_1 и $\text{tg}\Delta = \epsilon_2 / \epsilon_1$) и поперечные размеры образца;

2) с использованием трехмерной универсальной программы находились резонансные частоты и добротности прямоугольного резонатора без образца и с образцом (при разных поперечных размерах образцов);

3) полученные значения резонансных частот и добротностей подставлялись в формулы (1) метода малых возмущений и для каждого поперечного размера образца определялись значения ϵ_1 и ϵ_2 ;

4) полученные по формулам теории возмущений значения величин ϵ_1 и ϵ_2 сравнивались с исходными значениями п.1 и определялась погрешность.

Численный эксперимент проводился на прямоугольном резонаторе с поперечными размерами $a \times b = 22,86 \times 10,16$ мм и длиной $L = 59,4$ мм. Резонатор работал на виде колебаний H_{103} . Расчеты проводились в диапазоне частот 10 ГГц, добротность Q резонатора без образца составляла 6693. Исследовались материалы в широком диапазоне значений ϵ_1 и $\text{tg}\Delta$. В таблице показаны результаты численного эксперимента для материала с исходными параметрами $\epsilon_1 = 11,6$, $\text{tg}\Delta = 1 \cdot 10^{-3}$. Поперечные размеры образцов изменяются в пределах от $0,5 \times 0,5$ до 1×1 мм. В вертикальных столбцах таблицы приведены значения частоты и добротности, полученные с использованием трехмерной универсальной программы. Затем эти данные подставлялись в формулы (1) и определялись значения ϵ_1 и $\text{tg}\Delta$ методом малых возмущений. Данные для ϵ_1 и

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ РЕЗОНАТОРНЫМ МЕТОДОМ

М. П. Пархоменко^{1,2}, Д. С. Калёнов², И. С. Ерёмин²,
Н. А. Федосеев^{1,2}, И. П. Чепурных², В. М. Колесникова²

¹Филиал Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики, г. Фрязино;

²ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Резонаторные методы широко используются для определения электромагнитных параметров материалов. В роли непосредственно измеряемых величин в этих методах выступают резонансная частота, добротность, а также коэффициенты отражения и прохождения. Наиболее просто связь между измеряемыми величинами и параметрами материала находится с помощью метода малых возмущений. При использовании резонатора на базе прямоугольного волновода формулы для определения действительной ϵ_1 и мнимой ϵ_2 составляющих комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon_1 - j\epsilon_2$ исследуемого материала записываются в виде:

$$\epsilon_1 = 1 + \frac{f_0 - f}{f} \frac{V}{2\Delta V}, \quad \epsilon_2 = \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{4\Delta V}, \quad (1)$$

$\operatorname{tg}\Delta$, а также погрешности измерений ε_1 показаны в трех последних столбцах. Наилучшее совпадение полученных и исходных данных наблюдается при поперечных размерах образца $0,8 \times 0,8$ мм. В этом случае погрешность в определении ε_1 – менее 1 %, а для $\operatorname{tg}\Delta$ она составляет 5 %.

Значения ε_1 и $\operatorname{tg}\Delta$, полученные по формулам метода малых возмущений, в зависимости от поперечных размеров образца для материала с исходными параметрами $\varepsilon_1 = 11,6$, $\operatorname{tg}\Delta = 1 \cdot 10^{-3}$

Поперечные размеры образца, мм	Частота, ГГц	Q	ε_1	$\operatorname{tg}\Delta$	$\Delta\varepsilon_1, \%$
1×1	9,8271667	5344,411	12,53	$1,02 \cdot 10^{-3}$	7,99
0,9×0,9	9,8661800	5651,404	11,86	$0,97 \cdot 10^{-3}$	2,26
0,8×0,8	9,8958200	5880,437	11,52	$0,95 \cdot 10^{-3}$	-0,61
0,7×0,7	9,9195200	6068,519	11,41	$0,93 \cdot 10^{-3}$	-1,63
0,6×0,6	9,9396733	6228,197	11,32	$0,93 \cdot 10^{-3}$	-2,43
0,5×0,5	9,9564200	6346,218	11,27	$0,99 \cdot 10^{-3}$	-2,87
Резонатор без образца	9,9940733	6693,743	–	–	–