

09

## **Влияние кольцевого слоя из различных веществ на собственную частоту и добротность цилиндрического квазиоптического диэлектрического резонатора**

© Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, И.А. Шипилова

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,  
Харьков  
E-mail: prokopen@ire.kharkov.ua

*Поступило в Редакцию 17 августа 2005 г.*

Проведено исследование влияния кольцевого слоя, заполненного различными веществами, на частоту и добротность цилиндрического фторопластового резонатора. Впервые изучены спектральные и энергетические характеристики собственного аксиально-однородного колебания „шепчущей галереи“ при различных радиальной толщине слоя и его местоположении по радиусу. Обнаружен различный характер поведения собственной частоты резонатора при заполнении кольцевого слоя жидкостями с большими и малыми потерями.

PACS: 07.57.-c

Интерес к квазиоптическим диэлектрическим резонаторам обусловлен чувствительностью колебаний „шепчущей галереи“ к состоянию их поверхностей и параметрам диэлектрика. В настоящее время для измерения диэлектрических свойств веществ, в частности жидкостей, широко применяются радиально-двухслойные цилиндрические диэлектрические резонаторы [1,2]. Они конструктивно просто сочетаются с активными и пассивными элементами гибридных схем миллиметрового диапазона длин волн. Для исследования диэлектрических свойств веществ, занимающих малые объемы, возникает необходимость введения дополнительного радиального слоя. Практический интерес представляет исследование влияния такого слоя из различных веществ и разной толщины на спектральные и энергетические характеристики цилиндрического диэлектрического резонатора.

В работе исследованы спектральные и энергетические характеристики цилиндрического диэлектрического резонатора диаметром  $2r_3 = 7.8$  см с неоднородностью в виде кольца, соосно расположенного в резонаторе. Внутренний диаметр кольца  $2r_1$  менялся от 5 до 6.8 см. Радиальная толщина кольцевого слоя имела значения  $\Delta = 0.02$  см или 0.1 см.

Исследуемый резонатор по существу представляет собой радиально-трехслойный диэлектрический резонатор, расположенный в среде с комплексными значениями диэлектрической  $\epsilon_4$  и магнитной  $\mu_4$  проницаемостей. Радиальные слои резонатора имеют проницаемости  $\epsilon_\nu = \epsilon'_\nu(1 + i \operatorname{tg} \delta_\nu)$  и  $\mu_\nu = \mu'_\nu + i\mu''_\nu$ , где  $\nu = 1; 2; 3$ , отсчитывая от центра резонатора. При удовлетворении решений уравнений Максвелла для компонентов полей ( $\sim \exp(-i\omega t)$ ) аксиально-однородных ТМ колебаний в каждом слое резонатора граничным условиям на переходах между средами получаем дисперсионное уравнение

$$\gamma_3\psi_1\psi_3 = \gamma_2\psi_2\psi_4. \quad (1)$$

Здесь

$$\gamma_\nu = \sqrt{\epsilon_\nu/\mu_\nu};$$

$$\psi_1 = (\gamma_2\alpha_{21} - \gamma_1\alpha_{11})Z_{21} - (\gamma_2\beta_{21} - \gamma_1\alpha_{11})Z_{22};$$

$$\psi_2 = (\gamma_2\alpha_{21} - \gamma_1\alpha_{11})\beta_{22}Z_{21} - (\gamma_2\beta_{21} - \gamma_1\alpha_{11})\alpha_{22}Z_{22};$$

$$\psi_3 = (\gamma_3\alpha_{33} - \gamma_4\alpha_4)\beta_{32}Z_{33} - (\gamma_3\beta_{33} - \gamma_4\alpha_4)\alpha_{32}Z_{32};$$

$$\psi_4 = (\gamma_3\alpha_{33} - \gamma_4\alpha_4)Z_{33} - (\gamma_3\beta_{33} - \gamma_4\alpha_4)Z_{32},$$

в которых  $\alpha_{\nu p} = J'_n(\chi_\nu r_p)/J_n(\chi_\nu r_p)$ ;  $\beta_{\nu p} = N'_n(\chi_\nu r_p)/N_n(\chi_\nu r_p)$ ;  $\alpha_4 = H_n^{(1)'}(\chi_4 r_3)/H_n^{(1)}(\chi_4 r_3)$ ;  $Z_{\nu p} = J_n(\chi_\nu r_p)/N_n(\chi_\nu r_p)$ ;  $\chi_\nu = \sqrt{\epsilon_\nu\mu_\nu}k$ ;  $k = \omega/c$ ;  $c$  — скорость света;  $\omega = \omega' - i\omega''$  — собственная комплексная круговая частота резонатора;  $r_p$  и  $p = 1; 2; 3$  — радиусы и границы разделов слоев резонатора, причем  $r_2 = r_1 + \Delta$ ;  $J_n(z)$ ,  $N_n(z)$  и  $H_n^{(1)}(z)$  — цилиндрические функции Бесселя, Неймана и Ханкеля первого рода соответственно. Штрих обозначает дифференцирование цилиндрической функции по аргументу. Порядок цилиндрических функций  $n$  определяется азимутальным модовым индексом, который соответствует количеству длин волн, укладывающихся по периметру резонатора по азимутальному углу  $\varphi$ .

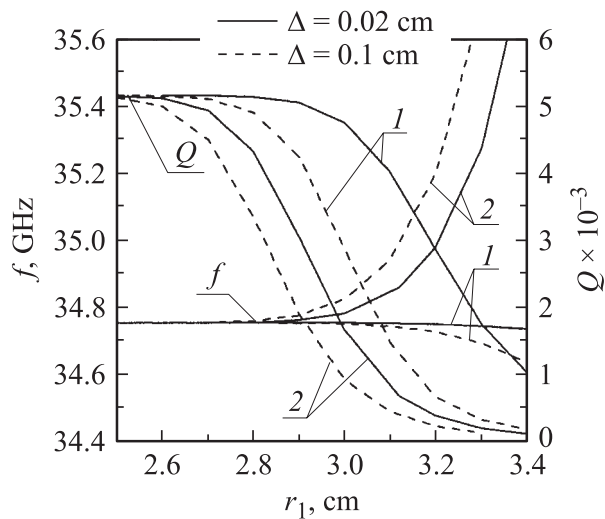
При  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$  и  $\mu_v = 1$  решения дисперсионного уравнения (1) определяют частоты аксиально-однородных  $TM_{ns0}$  колебаний цилиндрического диэлектрического резонатора с кольцевым слоем, диэлектрическая проницаемость которого  $\varepsilon_2$ . Радиальный модовый индекс  $s$  соответствует порядковому номеру корня уравнения (1) и определяет число вариаций поля по радиальной координате  $r$ . Третий нулевой модовый индекс является аксиальным и отображает равномерное распределение поля по высоте резонатора.

В первом приближении разложения в ряд по малому параметру  $|\sqrt{\varepsilon_2} k \Delta| \ll 1$  дисперсионное уравнение (1) приводится к виду

$$\begin{aligned} & \sqrt{\varepsilon_1} \alpha_{13} - \sqrt{\varepsilon_4} \alpha_4 \\ & = k \Delta \frac{r_1 J_n^2(\chi_1 r_1)}{r_3 J_n^2(\chi_1 r_3)} \left[ \varepsilon_1 \frac{J_n''(\chi_1 r_1)}{J_n(\chi_1 r_1)} + \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{k r_1} \alpha_{11} - \frac{n^2}{k^2 r_1^2} + \varepsilon_2 \right]. \quad (2) \end{aligned}$$

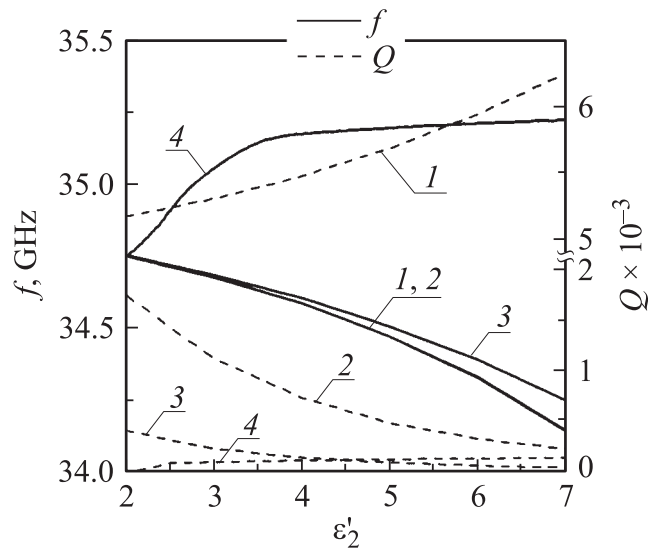
Правая часть (2) отображает влияние кольцевого слоя, заполненного веществом с малыми потерями, на собственную частоту резонатора с  $TM_{ns0}$  колебанием. При заданных параметрах резонатора и экспериментально измеренной комплексной частоте идентифицированного собственного колебания уравнение (2) явно определяет комплексную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_2$ .

Исследования были проведены для аксиально-однородного колебания  $TM_{3610}$  цилиндрического фторопластового ( $\varepsilon'_1 = \varepsilon'_3 = 2.07$  и  $\text{tg } \delta_1 = \text{tg } \delta_3 = 1.7 \cdot 10^{-4}$ ) резонатора в диапазоне частот 34...36 GHz. На рис. 1 представлено влияние местоположения кольцевого слоя, заполненного трансформаторным маслом ( $\varepsilon'_2 = 2.2$  и  $\text{tg } \delta_2 = 4.5 \cdot 10^{-2}$  [3,4]) или дистиллированной водой, на частоту  $f$  и добротность  $Q = \omega' / 2\omega''$  резонатора. При использовании дистиллированной воды учитывалась дисперсия ее диэлектрической проницаемости при температуре 20°C [5]. Точные значения собственных комплексных частот резонатора определялись решениями дисперсионного уравнения (1). Для резонатора с кольцевым слоем из трансформаторного масла и толщиной  $\Delta = 0.02$  см частоты, полученные решениями уравнения (2), отличаются от точных значений менее чем на 1 MHz, а добротности — менее чем на 9%. Максимальные расхождения спектральных и энергетических характеристик наблюдаются при приближении кольцевого слоя к боковой поверхности цилиндрического резонатора ( $r_1 = 3.4$  см). При кольцевом слое с внутренним радиусом



**Рис. 1.** Зависимости частоты и добротности резонатора от местоположения кольцевого слоя, заполненного маслом (1) или водой (2).

$r_1 \leq 2.6$  см частота и добротность резонатора как с  $\Delta = 0.02$  см, так и с  $\Delta = 0.1$  см соответствуют значениям, характерным дисковому фторопластовому резонатору. При увеличении  $r_1$  добротность резонатора снижается, причем степень снижения выше при  $\Delta = 0.1$  см и при заполнении слоя водой. Данный эффект обусловлен проникновением поля собственного колебания „шепчущей галереи“ в область кольцевого слоя и его взаимодействием с веществом. Собственная частота резонатора с увеличением внутреннего радиуса слоя  $r_1$  при заполнении его водой повышается, а при трансформаторном масле снижается. Степень изменения собственной частоты резонатора выше при толщине слоя  $\Delta = 0.1$  см. Характер изменения частоты резонатора обусловлен потерями электромагнитной энергии собственного колебания резонатора в веществе. В воду поле не проникает глубоко вследствие сильного поглощения, которое сопровождается снижением добротности резонатора и повышением его собственной частоты из-за уменьшения области локализации поля у боковой поверхности цилиндрического фторопластового резонатора [2].



**Рис. 2.** Собственная частота и добротность резонатора при заполнении кольцевого слоя различными веществами: 1 —  $\text{tg } \delta_2 = 0$ ; 2 —  $\text{tg } \delta_2 = 0.05$ ; 3 —  $\text{tg } \delta_2 = 0.5$ ; 4 —  $\text{tg } \delta_2 = 1.6$ .

На рис. 2 представлены спектральные и энергетические характеристики цилиндрического фторопластового резонатора при заполнении кольцевого слоя с толщиной  $\Delta = 0.02$  см различными веществами с диэлектрическими проницаемостями в диапазоне  $\epsilon'_2 = 2 \dots 7$ . Внутренний диаметр кольцевого слоя равен  $2r_1 = 6.6$  см.

Таким образом, исследованный резонатор представляет интерес для измерения диэлектрических свойств веществ. В общем случае свойства вещества как с малыми, так и с большими потерями определяются решением дисперсионного уравнения (1) относительно диэлектрической проницаемости кольцевого слоя  $\epsilon_2$  на основе экспериментально измеренных спектральных и энергетических характеристик резонатора, для которого диэлектрические свойства остальных слоев известны.

Работа выполнена при частичной поддержке НТЦУ по проекту № 2051.

## Список литературы

- [1] *Cherpak N.T., Barannik A.A., Prokopenko Yu.V.* et al. // Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids / Eds S.J. Rzoska and V.P. Zhelezny Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 63–76.
- [2] *Прокопенко Ю.В., Смирнова Т.А., Филиппов Ю.Ф.* и др. // ВАНТ. 2004. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения (4). № 4. С. 93–96.
- [3] *Таблицы физических величин. Справочник* / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [4] *Derkach V.N., Filippov Yu.F., Plevako A.S.* et al. // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 2004. V. 25. N 1. P. 139–148.
- [5] *Hyatt H.A.* // J. Quant. Spectrosc. Transfer. 1970. V. 10. P. 217–247.