

РАДИАЛЬНО-ДВУХСЛОЙНЫЙ КВАЗИОПТИЧЕСКИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Ю.В. Прокопенко, Т.А. Смирнова, Ю.Ф. Филиппов, О.А. Матяш
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
61085, Харьков, ул. ак. Проскуры, 12, Украина;
E-mail: prokopen@ire.kharkov.ua

Получено характеристическое уравнение для комплексных частот радиально-двухслойного диэлектрического цилиндрического резонатора, ограниченного проводящими торцевыми стенками. Приведены зависимости собственных частот и добротностей резонаторов от радиуса внутреннего слоя при его заполнении различными веществами в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн. Численные исследования характеристик резонатора проведены для колебания "шепчущей галереи" E_{3610} . Изучена динамика распределения энергии этого колебания между слоями резонатора. Продемонстрирована возможность применения радиально-двухслойного диэлектрического резонатора в качестве измерительной ячейки диэлектрических проникаемостей веществ, обладающих как большими, так и малыми потерями.

1. ВВЕДЕНИЕ

Диэлектromетрия различных сред является одним из важных направлений физики твердого тела. Особое внимание уделяется точным измерениям значений комплексных диэлектрических проницаемостей. В работе [1] рассмотрено рассеяние электромагнитных волн на диэлектрической сфере малого диаметра в прямоугольном волноводе. Проведены исследования диэлектрических проницаемостей сегнетоэлектриков с малыми потерями в широком диапазоне частот.

В настоящее время ряд малогабаритных приборов создаются на базе квазиоптических диэлектрических резонаторов (КДР), возбужденных на колебаниях типа "шепчущей галереи". Эти колебания весьма чувствительны к состоянию поверхностей резонатора и параметров диэлектрика. Исследование их в последнее время является одним из развивающихся направлений физики твердого тела. Существенным недостатком, возникающим при анализе экспериментальных данных, является отсутствие строгого электродинамического анализа. Ограничивая резонатор проводящими торцевыми плоскостями можно найти точные значения спектральных характеристик собственных колебаний. Решение обратной задачи определяет комплексную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = \varepsilon'(1 + itg\delta)$ диэлектрика, из которого изготовлен резонатор [2-4]. Практический интерес вызывает радиально-двухслойный КДР, в котором слои представляют различные анизотропные диэлектрики [5]. Нами приведены результаты исследования зависимости комплексных собственных частот такого резонатора от диаметра внутренней границы раздела диэлектриков при заполнении внутреннего слоя различными веществами.

2. РАДИАЛЬНО-ДВУХСЛОЙНЫЙ КДР

Исследуются спектральные характеристики резонансных колебаний анизотропного радиально-двухслойного КДР (рис. 1), ограниченного на торцах ($z = 0$; l ; l – продольный размер резонатора) иде-

ально проводящими плоскостями. Радиус внутреннего слоя – r_1 , а внешнего – r_2 . Слои КДР изготовлены из различных одноосных монокристаллов, оси анизотропии которых параллельны его аксиальной оси.

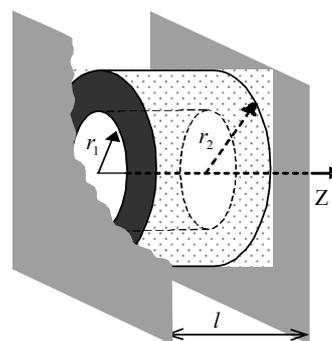


Рис. 1. Радиально-двухслойный КДР с проводящими торцевыми поверхностями

Аксиальные компоненты электромагнитных полей резонансных колебаний радиально-двухслойного КДР имеют вид

$$E_{zv} = G_{E_v}(r) \cos(k_z z) \exp i(n\varphi - \omega t);$$

$$H_{zv} = G_{H_v}(r) \sin(k_z z) \exp i(n\varphi - \omega t),$$

где

$$G_{jv} = \begin{cases} A_{jn} J_n(q_{j1} r), & r \leq r_1 \\ B_{jn} J_n(q_{j2} r) + C_{jn} N_n(q_{j2} r), & r_1 \leq r \leq r_2 \\ D_{jn} H_n^{(1)}(q_0 r), & r \geq r_2 \end{cases}$$

характеризует распределение поля по радиусу в v -слое резонатора. Здесь $A_{jn}, B_{jn}, C_{jn}, D_{jn}$ – постоянные, определяемые граничными условиями и условием возбуждения электромагнитных колебаний в КДР; индекс j принимает значение E или H ; $J_n(z)$, $N_n(z)$ и $H_n^{(1)}(z)$ – цилиндрические функции Бесселя, Неймана и Ханкеля первого рода; $n = 0; 1; 2; \dots$ – азимутальное волновое число. Радиальные (q_{jv} – внутри диэлектрических слоёв и q_0 – вне диэлектри-

ков) и аксиальный k_z компоненты волнового вектора полей КДР равны: $q_{Hv}^2 = \varepsilon_{\perp} k_0^2 - k_z^2$; $q_{Ev}^2 = q_{Hv}^2 \varepsilon_{\parallel} / \varepsilon_{\perp}$; $q_0^2 = k_0^2 - k_z^2$; $k_z = m\pi / l$, где ε_{\parallel} и ε_{\perp} – компоненты тензора диэлектрической проницаемости $[\varepsilon_{ij}]$ для v -го слоя в направлениях, параллельном и перпендикулярном оптической оси кристалла; $k_0 = \omega / c$; c – скорость света; $\omega = \omega' - i\omega''$ – собственная комплексная круговая частота КДР; $m = 0; 1; 2; \dots$ – аксиальный индекс.

Спектральные характеристики анизотропного радиально-двухслойного резонатора определяются решениями характеристического уравнения:

$$\begin{aligned} & (\chi_0 \gamma_{\beta}^E - \chi_0 \gamma_{\alpha}^E) (\chi \vartheta_{\alpha}^H - \chi \vartheta_{\beta}^H) Z_J^H Z_N^H + \\ & + (\chi_0^2 - \gamma_{\beta}^E \gamma_{\beta}^H) (\vartheta_{\alpha}^E \vartheta_{\alpha}^H - \chi^2) Z_J^E Z_J^H + \\ & + (\chi_0^2 - \gamma_{\alpha}^E \gamma_{\alpha}^H) (\vartheta_{\beta}^E \vartheta_{\beta}^H - \chi^2) Z_N^E Z_N^H + \\ & + (\chi \vartheta_{\beta}^E - \chi \vartheta_{\alpha}^E) (\chi_0 \gamma_{\alpha}^H - \chi_0 \gamma_{\beta}^H) Z_J^E Z_N^E + \\ & + (\chi_0^2 - \gamma_{\alpha}^E \gamma_{\beta}^H) (\chi^2 - \vartheta_{\beta}^E \vartheta_{\alpha}^H) Z_N^E Z_J^H + \\ & + (\chi_0^2 - \gamma_{\beta}^E \gamma_{\alpha}^H) (\chi^2 - \vartheta_{\alpha}^E \vartheta_{\beta}^H) Z_J^E Z_N^H = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнении (1) приняты следующие обозначения:

$$\chi_0 = nk_z (q_0^{-2} - q_{H2}^{-2}) / k_0 r_2^2; \quad \chi = nk_z (q_{H1}^{-2} - q_{H2}^{-2}) / k_0 r_1^2;$$

$$\vartheta_{\xi}^j = \sigma_{2\xi}^j \xi_{21}^j - \sigma_{1\xi}^j \alpha_{11}^j; \quad \gamma_{\xi}^j = \sigma_{2\xi}^j \xi_{22}^j - \alpha_{0\xi}^j, \text{ в которых } \xi \text{ при-}$$

нимает значения $\alpha_{pp}^j = \frac{1}{q_{jp} r_{\tilde{p}}} \frac{J'_n(q_{jp} r_{\tilde{p}})}{J_n(q_{jp} r_{\tilde{p}})}$ или

$$\beta_{2\tilde{p}}^j = \frac{1}{q_{j2} r_{\tilde{p}}} \frac{N'_n(q_{j2} r_{\tilde{p}})}{N_n(q_{j2} r_{\tilde{p}})}, \text{ где } p, \tilde{p} = 1; 2, \text{ штрих}$$

обозначает дифференцирование цилиндрических функций по аргументу; $\sigma_v^j = \varepsilon_{\parallel}$ при $j = E$; $\sigma_v^j = 1$

$$\text{при } j = H; \quad \alpha_{0\xi}^j = \frac{1}{q_0 r_2} \frac{H_n^{(1)}(q_0 r_2)}{H_n^{(1)}(q_0 r_2)}; \quad Z_R^j = \frac{R_n(q_{j2} r_1)}{R_n(q_{j2} r_2)}, \text{ под}$$

R подразумевается J или N .

Вне области частотного вырождения в радиально-двухслойном резонаторе существуют независимые EH и HE колебания. Условие разделения типов колебаний приведено в [5].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КДР

Численные исследования были проведены для собственного аксиально-однородного колебания E_{3610} радиально-двухслойного резонатора с наружным слоем из фторопласта, зажатого между двумя металлическими пластинами. В качестве внутреннего слоя использовались различные вещества, как с малыми, так и с большими значениями тангенсов угла потерь $\text{tg}\delta_1$. Внешний диаметр КДР $2r_2$ составлял величину 78 мм (рис. 1). Диаметр проводящих торцевых пластин предполагался бесконечным. Диэлектрическая проницаемость фторопласта $\varepsilon_2 = \varepsilon_{\perp 2} = \varepsilon_{\parallel 2}$ была равна 2,04, а тангенс угла потерь в продольном и перпендикулярном направлениях $\text{tg}\delta_2 = 1,7 \times 10^{-4}$.

На рис. 2 приведены результаты исследований при заполнении внутреннего слоя резонатора различными изотропными веществами с диэлектриче-

скими проницаемостями ε'_1 и тангенсами угла потерь $\text{tg}\delta_1$. Диаметр внутреннего слоя резонатора $2r_1 = 6,6$ см. Из рисунка видно, что для веществ с $\varepsilon'_1 > 10$ сдвиг собственной частоты КДР ($f - f_{\text{air}}$) относительно частоты резонатора с воздушным заполнением, для которого $f_{\text{air}} = 35,157$ ГГц, является незначительным. Кроме того, собственная частота КДР почти не изменяется при заполнении внутреннего слоя веществами с различными значениями тангенсов угла потерь $\text{tg}\delta_1$. Различить такие вещества позволяют зависимости добротностей резонатора (см. рис. 2,б). Для внутреннего слоя КДР из веществ с $1,8 \leq \varepsilon'_1 < 10$ крутизна частотных характеристик резонатора значительно увеличивается. При $\varepsilon'_1 = \varepsilon'_2$ добротности всех исследуемых резонаторов имеют практически одинаковые значения и слабо зависят от тангенсов углов потерь $\text{tg}\delta_1$.

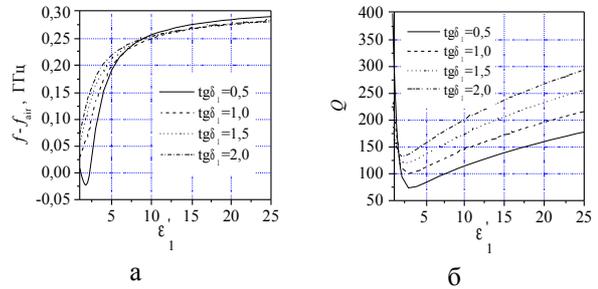


Рис. 2. Зависимости сдвига собственной частоты (а) и добротности (б) радиально-двухслойного КДР от диэлектрической проницаемости внутреннего слоя

На рис. 3 приведено распределение E_z компоненты поля колебания E_{3610} при заполнении внутреннего слоя КДР водой с $\varepsilon'_1 = 16,5847$ и $\text{tg}\delta_1 = 1,632$. Радиус внутреннего слоя был равен 3,5 см. Собственная частота резонатора имела значение 36,9 ГГц. Добротность резонатора равнялась 66,8.

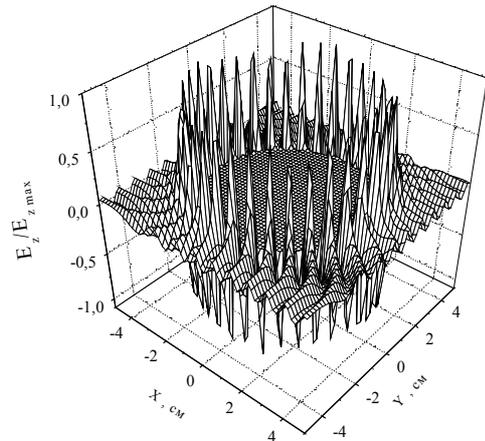


Рис. 3. Колебание "шепчущей галереи" E_{3610}

Исследования радиально-двухслойного КДР с переменным радиусом внутреннего слоя были проведены при его заполнении воздухом ($\varepsilon'_1 = 1$; $\text{tg}\delta_1 = 0$), бензином ($\varepsilon'_1 = 1,88$; $\text{tg}\delta_1 = 3,3 \times 10^{-3}$), трансформа-

торным маслом ($\epsilon'_1=2,2$; $\text{tg}\delta_1=4,5 \times 10^{-3}$), плавленным кварцем ($\epsilon'_1=3,6$; $\text{tg}\delta_1=1,2 \times 10^{-4}$) и водой. Диаметр внутреннего слоя резонатора $2r_1$ изменялся от нулевого значения до максимально возможной величины. Частотные и энергетические характеристики резонатора приведены на рис. 4. При определении собственных частот и добротности резонатора при заполнении внутреннего слоя водой учитывалась её дисперсионная зависимость комплексной проницаемости $\epsilon_1(f)$ при температуре 20°C [6].

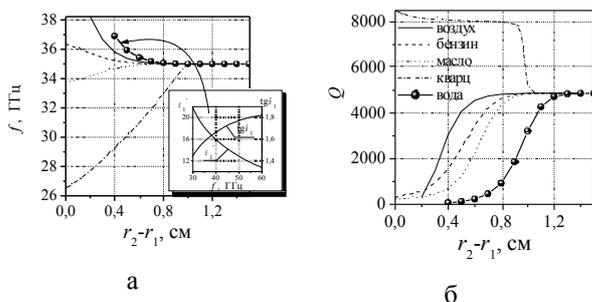


Рис. 4. Частотные (а) и энергетические (б) характеристики радиально-двухслойного КДР

Динамика распределения энергии и напряжённости E_{3610} колебания при изменении радиуса внутреннего слоя КДР приведена на рис.5. При сравнении радиуса внутреннего слоя резонатора с $\epsilon'_1 > \epsilon'_2$ и радиуса каустики дискового резонатора из вещества наружного слоя поле собственного колебания радиально-двухслойного резонатора начинает проникать во внутренний слой. С увеличением радиуса r_1 поле E_{3610} колебания пересосредотачивается во внутренний слой, проходя стадию двойной вариации по радиусу. При $r_1 > 3,5$ см наружный слой резонатора практически не влияет на собственное колебание. Аналогичная картина распределения поля собственного колебания радиально-двухслойного КДР наблюдается при заполнении внутреннего слоя различными веществами с $\epsilon'_1 > \epsilon'_2$. Отличие в том, что с увеличением радиуса внутреннего слоя при $\text{tg}\delta_1 > \text{tg}\delta_2$ наблюдается сильное затухание поля собственного колебания резонатора. Данное поглощение поля собственного колебания резонатора может быть использовано при измерениях комплексной диэлектрической проницаемости вещества внутреннего слоя.

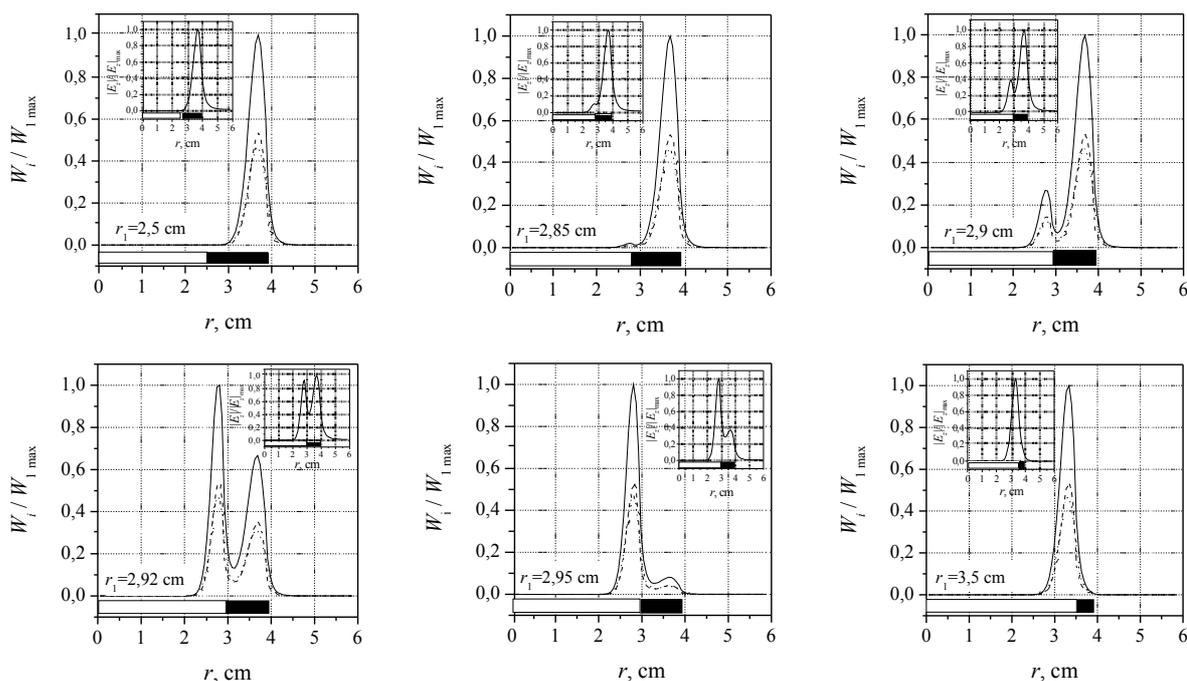


Рис. 5. Распределение плотности энергии и напряжённости электрического поля E_{3610} колебания радиально-двухслойного диэлектрического резонатора с радиусом внутреннего слоя r_1 и наружного слоя $r_2=3,9$ см. В качестве внутреннего слоя использован плавный кварц, а наружного – фторопласт
 — Электромагнитное поле (W_1); - - - - - Электрическое поле (W_2); Магнитное поле (W_3)

При заполнении внутреннего слоя веществами с большими потерями его существенное влияние на характеристики резонатора начинает проявляться только при толщине наружного слоя $r_2 - r_1 < 0,7$. При больших толщинах наружного слоя характеристики

радиально-двухслойного резонатора соответствуют дисковому КДР из фторопласта, для которого данный параметр отображает расположение внутренней каустики. Увеличение внутреннего слоя приводит к сдвигу собственной частоты резонатора и при $\text{tg}\delta_1 >$

$\operatorname{tg} \delta_2$ к снижению его добротности. С уменьшением толщины наружного слоя собственная частота и добротность радиально-двухслойного резонатора стремятся к соответствующим значениям дискового КДР из вещества внутреннего слоя. Из рис. 4 видно, что характер влияния различных веществ на характеристики КДР позволяет использовать данный резонатор в качестве активного элемента в измерительных приборах диэлектрических проникаемых.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования радиально-двухслойного КДР с колебанием "шепчущей галереи" E_{3610} при заполнении внутреннего слоя различными веществами. На примере резонатора с внутренним слоем из плавленного кварца, а наружного из фторопласта, изучена динамика распределения плотности энергии и напряжённости электрического поля этого колебания при изменении радиуса внутреннего слоя. Показана возможность использования такого резонатора в качестве измерительной ячейки диэлектromетра в 8-мм диапазоне длин волн.

Работа выполнена при частичной поддержке НТЦУ по проекту №2051.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.И.Козарь, Н.А.Хижняк. Отражение электромагнитных волн от резонансной сферы в волно-

воде // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1975, т.18, № 1, с.29-37.

2. А.А.Баранник, Ю.В.Прокопенко, Ю.Ф.Филиппов и др. Квазиоптический диэлектрический резонатор с одноосной анизотропией. Измерение микроволновых характеристик диэлектриков и проводников // *Радиофизика и электроника*. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. 2000, т.5, № 3, с.104-109.
3. M. Fatih Akay, Yu. Prokopenko, S. Kharkovsky. Resonance Characteristics of Whispering Gallery Modes in Parallel-Plates-Type Cylindrical Dielectric Resonators // *Microwave and Optical Tech. Lett.* 2004, v.40, No.2, p.96-101.
4. Ю.В.Прокопенко, Ю.Ф.Филиппов Анизотропный дисковый диэлектрический резонатор с проводящими торцевыми стенками // *ЖТФ*. 2002, т.72, №.6, с.79-84.
5. А.А.Баранник, Ю.В.Прокопенко, Т.А.Смирнова и др. Кольцевой квазиоптический диэлектрический резонатор с проводящими торцевыми стенками // *Радиофизика и электроника*. Харьков: ИРЭ НАН Украины. 2001, т.6, №2, с.201-205.
6. H.A. Nyatt. Emission, Reflection, and Absorption of Microwave at a Smooth Air-water Interface // *J. Quant. Spectrosc. Transfer*. 1970, v.10, p.217-247.

RADIALLY-TWO-LAYER QUASI-OPTICAL DIELECTRIC RESONATOR FOR DIELECTROGRAPHY

Yu. V. Prokopenko, T. A. Smirnova, Yu. F. Filippov, O. A. Matyash

The characteristic equation for complex frequencies of a radially-two-layer dielectric cylindrical resonator bounded by conductive end walls was obtained. At filling of resonator internal layer by the different substances the expressions of eigen frequencies and Q-factors of resonators from internal layer radius are given in a millimeter waveband. The numerical researches of the resonator characteristics are carried out for "whispering gallery" oscillation E_{3610} . Dynamics of an energy distribution of this oscillation between layers of resonator was studied. The possibility of such resonator as a measuring cell of permittivity is shown for substances with both large and small losses.

РАДІАЛЬНО-ДВОШАРОВИЙ КВАЗІОПТИЧНИЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ ДІЕЛЕКТРОМЕТРІЇ

Ю.В. Прокопенко, Т.О. Смірнова, Ю.Ф. Філіпов, О.О. Матяш

Отримано характеристичне рівняння для комплексних частот радіально-двошарового діелектричного циліндричного резонатора, обмеженого провідними торцевими стінками. Приведені залежності власних частот і добротностей резонаторів від радіуса внутрішнього шару при його заповненні різними речовинами в восьмиміліметровому діапазоні довжин хвиль. Чисельні дослідження характеристик резонатора проведені для коливання "шепчучої галереї" E_{3610} . Вивчено динаміку розподілу енергії цього коливання між шарами резонатора. Продемонстровано можливість застосування радіально-двошарового діелектричного резонатора як вимірювальної комірки діелектричних проникливостей речовин, які мають як великі, так і малі втрати.