

УДК 537.86

ВЛИЯНИЕ ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

А. В. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, г. Харьков, Украина

Впервые предпринята попытка разделения влияний температуры и индекса рефракции окружающего воздушного пространства на спектральные и энергетические характеристики цилиндрических фторопластового и лейкосапфирового резонаторов с колебаниями типа «шепчущей галереи» миллиметрового диапазона длин волн. Установлено, что в условиях естественных флуктуаций указанных факторов внешней исследуемой среды степень влияния температуры на собственные частоты резонаторов является более существенной. Показано, что квазиоптические цилиндрические диэлектрические резонаторы могут быть использованы в качестве датчиков температуры внешней воздушной среды, обеспечивающих точность 10^{-4} °С при измерении их резонансных частот с точностью 100 Гц. Разработана методика определения индекса рефракции воздуха с использованием исследованных резонаторов в качестве сенсора температуры и измерительной ячейки резонаторного микроволнового рефрактометра. Разработан сенсор рефрактометра на основе двух идентичных резонаторов с колебаниями типа «шепчущей галереи». Дифференциальный двухрезонаторный рефрактометр обеспечивает в сенсоре компенсацию влияния изменений температуры окружающего пространства на измеряемую разность собственных частот резонаторов с модами идентичной структуры. Установлено, что точность определения индекса рефракции воздуха обеспечивается на уровне 10^{-2} при измерении разности частот с точностью 10 Гц.

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью открытых квазиоптических диэлектрических резонаторов является то, что они всегда непосредственно контактируют с окружающей средой, которая является их непосредственной частью. Следовательно, для диагностики электрофизических параметров среды в исследуемой точке пространства нет необходимости в обеспечении принудительного отбора некоторого объёма воздуха с целью его внедрения в резонаторный сенсор. Достаточно поместить, например, цилиндрический диэлектрический резонатор в эту точку.

Среди множества приборов для определения коэффициента преломления воздуха в нижних слоях атмосферы значительное место занимают рефрактометры [1]. Малые значения времён переходных процессов резонаторных микроволновых рефрактометров делают их пригодными для изучения быстрых флуктуаций коэффициента преломления среды и позволяют вести непрерывную запись его значений, что намного упрощает процесс измерений. В настоящее время рефрактометры реализованы по схеме дифференциальных измерений [2], в которой используются два идентичных резонатора: один в качестве эталонного, а другой — измерительного. Измерения сводятся к определению разности их резонансных частот, которая функционально зависит от изменений электрофизических параметров исследуемой среды в измерительном резонаторе. Инерционность рефрактометра в основном зависит от связи резонатора с внешней средой, которая должна проникать в полость резонатора и/или являться его неотъемлемой частью. При этом добротность резонатора не должна существенно изменяться при флуктуациях метрологических параметров исследуемой среды.

Поскольку поле собственных колебаний квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора определяется, в частности, параметрами исследуемой среды, то любые их изменения приводят к изменению собственных частот и добротностей такого резонатора. Кроме того, изменение температуры окружающего пространства влечёт за собой изменение геометрических параметров резонатора, что также приводит к изменению его собственных спектральных и энергетических характеристик. В связи с этим возникает необходимость детального изучения температурных зависимостей собственных параметров цилиндрических диэлектрических резонаторов. Естественно, например, что для решения основной задачи рефрактометрии целесообразно использовать цилиндрический диэлектрический резонатор из материала с малым температурным коэффициентом линейного расширения. Мы в своих исследованиях ограничились легкодоступными диэлектриками: фторопластом (с реальной частью диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_1 = 2,04$ и тангенсом угла потерь $\text{tg } \delta_1 = 1,7 \cdot 10^{-4}$ [3]) и лейкосапфиром (с компонентами тензора диэлектрической проницаемости [4] $\varepsilon'_{\perp 1} = 9,4$; $\varepsilon'_{\parallel 1} = 11,6$ и $\text{tg } \delta_{\perp 1} = \text{tg } \delta_{\parallel 1} = 10^{-5}$, где индексы « \perp » и « \parallel » указывают на свойства материала в перпендикулярном и параллельном к оптической оси кристалла направлениях). Отличительная особенность этих двух веществ заключается в том, что первый является изотропным, а второй — анизотропным диэлектриком.

Целью настоящей работы является определение собственных частот и добротностей квазиоптических цилиндрических диэлектрических резонаторов со слаботухающими колебаниями типа «шепчущей галереи» при изменении электрофизических параметров и температуры окружающей среды. Кроме того, изучается возможность определения индекса рефракции воздушного пространства при использовании в качестве датчиков высокодобротных квазиоптических цилиндрических диэлектрических резонаторов в микроволновых рефрактометрах.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассмотрим квазиоптический цилиндрический диэлектрический резонатор с идеально проводящими торцевыми поверхностями (рис. 1). Он изготовлен из анизотропного одноосного монокристалла и погружён в аналогичную среду так, что их оси анизотропии C совпадают и ориентированы параллельно продольной оси z резонатора (т.е. $\vartheta = 0$). В общем случае компоненты тензоров диэлектрической проницаемости каждой среды являются комплексными: $\varepsilon_{\perp \nu} = \varepsilon'_{\perp \nu} \times (1 + i \text{tg } \delta_{\perp \nu})$ и $\varepsilon_{\parallel \nu} = \varepsilon'_{\parallel \nu} (1 + i \text{tg } \delta_{\parallel \nu})$, где $\nu = 1, 2$ — порядковый номер среды, отсчитываемый от центра резонатора, $i = \sqrt{-1}$. Среда обладают изотропными магнитными свойствами и характеризуются комплексными магнитными проницаемостями $\mu_{\nu} = \mu'_{\nu} + i\mu''_{\nu}$. Собственные колебания такого резонатора являются квазимонохроматическими, т.е. векторы напряжённостей электрического \mathbf{E}_{ν} и магнитного \mathbf{H}_{ν} полей пропорциональны $\exp(-i\omega_p t)$, где t — время и $\omega_p = \omega'_p - i\omega''_p$ — собственная комплексная частота p -й моды резонатора. Модовый индекс $p \equiv msl$, где азимутальный индекс m принимает значения $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ и соответствует половине числа вариаций поля по углу φ ; радиальный индекс s

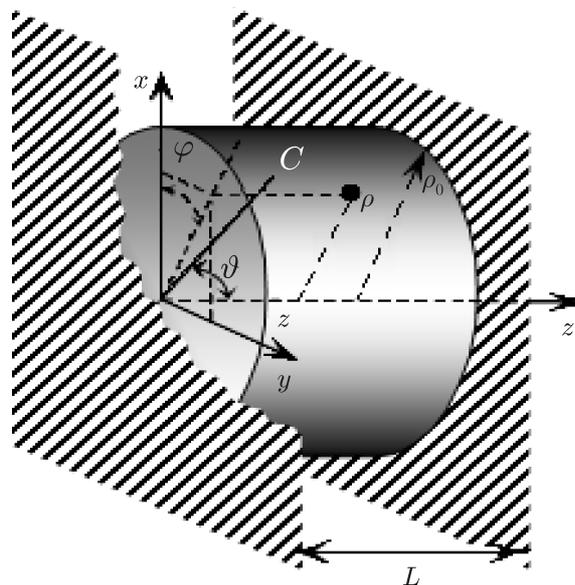


Рис. 1. Цилиндрический диэлектрический резонатор

отображает количество вариаций поля вдоль радиальной координаты ρ ; аксиальный (продольный) индекс $l = 0, 1, 2, \dots$ соответствует числу вариаций поля по продольной (аксиальной) координате z , меняющейся от 0 до L .

Собственные частоты ω_p цилиндрического диэлектрического резонатора с модами H - и E -типов определяются решениями характеристического уравнения

$$(\mu_1 \alpha_1^H - \mu_2 \alpha_0^H) (\varepsilon_{\parallel 1} \alpha_1^E - \varepsilon_{\parallel 2} \alpha_0^E) = a^2, \quad (1)$$

где

$$\alpha_1^j = \frac{1}{q_{j1} \rho_0} \frac{J'_m(q_{j1} \rho_0)}{J_m(q_{j1} \rho_0)}, \quad \alpha_0^j = \frac{1}{q_{j2} \rho_0} \frac{H_m^{(1)'}(q_{j2} \rho_0)}{H_m^{(1)}(q_{j2} \rho_0)}, \quad a = \frac{k_p k_z m}{q_{H1}^2 q_{H2}^2 \rho_0^2} (\varepsilon_{\perp 1} \mu_1 - \varepsilon_{\perp 2} \mu_2).$$

Под j подразумевается E или H ; $q_{H\nu} = \sqrt{\varepsilon_{\perp \nu} \mu_\nu k_p^2 - k_z^2}$ и $q_{E\nu} = \sqrt{\varepsilon_{\parallel \nu} / \varepsilon_{\perp \nu}} q_{H\nu}$ — поперечные (радиальные) компоненты волнового вектора для H - и E -типов колебаний соответственно; $k_p = \omega_p / c = k'_p - i k''_p$ — комплексное волновое число собственной p -й моды резонатора; $\nu = 1$ при $\rho \leq \rho_0$ и $\nu = 2$ при $\rho > \rho_0$; $k_z = l\pi / L$ — продольное (аксиальное) волновое число. Штрих обозначает дифференцирование по аргументу, т. е. $R'_m(u) = dR_m(u) / du$. Функция $R_m(u)$ обозначает одну из цилиндрических функций m -го порядка: $J_m(u)$ — функцию Бесселя, или $H_m^{(1)}$ — функцию Ханкеля первого рода.

Отметим, что в случае аксиально-однородных ($k_z = 0$) и азимутально-однородных ($m = 0$) колебаний модовые индексы s соответствуют порядковым номерам корней однородных характеристических уравнений, на которые распадается уравнение (1).

Продольные (т. е. аксиальные) компоненты электромагнитных полей собственных колебаний цилиндрического диэлектрического резонатора имеют вид [4–6]

$$E_{z\nu} = D_m \psi_c G_{E\nu}(\rho), \quad H_{z\nu} = C_m \psi_s G_{H\nu}(\rho). \quad (2)$$

Здесь D_m и C_m — функционально связанные между собой постоянные, причём одна является свободным параметром, который определяют из условия нормировки или через параметр (например плотность электрического тока) источника возбуждения; $\psi_c = \cos(k_z z) \exp[i(m\varphi - \omega_p t)]$ и $\psi_s = \sin(k_z z) \exp[i(m\varphi - \omega_p t)]$. Функции

$$G_{j\nu}(\rho) = \begin{cases} J_m(q_{j1} \rho), & \nu = 1, \rho \leq \rho_0; \\ \frac{J_m(q_{j1} \rho_0)}{H_m^{(1)}(q_{j2} \rho_0)} H_m^{(1)}(q_{j2} \rho), & \nu = 2, \rho \geq \rho_0 \end{cases}$$

характеризуют распределения компонент поля по радиусу в среде с номером ν .

Поперечные компоненты электромагнитного поля собственных колебаний цилиндрического диэлектрического резонатора определяются через продольные компоненты (2), выражения для которых приведены, например, в работах [4, 6].

Условием существования колебаний типа «шепчущей галереи», поле которых локализовано между наружной и внутренней каустиками резонатора, является неравенство

$$\min[\operatorname{Re}(q_{H2} \rho_0), \operatorname{Re}(q_{E2} \rho_0)] \leq m \leq \min[\operatorname{Re}(q_{H1} \rho_0), \operatorname{Re}(q_{E1} \rho_0)].$$

В резонаторе существуют независимые EH (H -типа) и HE (E -типа) колебания. Однозначное соответствие решений уравнения (1) определённому типу колебаний (H или E) можно идентифицировать только после определения доминирующей продольной (аксиальной) компоненты поля,

т. е. сравнения максимальных значений модулей $|H_{z\nu}|$ и $|E_{z\nu}|$. Как правило, это сравнение можно провести для модулей компонент $|H_{z\nu}|$ при $\sin(k_z z) = 1$, $\varphi = 0$ и $|E_{z\nu}|$ при $\cos(k_z z) = 1$, $\varphi = 0$ на боковой поверхности цилиндрического диэлектрического резонатора при $\rho = \rho_0$. В этом случае разделение независимых EH и HE колебаний осуществляется согласно неравенству

$$|(\mu_1 \alpha_1^H - \mu_2 \alpha_0^H) / (\varepsilon_{\parallel 1} \alpha_1^E - \varepsilon_{\parallel 2} \alpha_0^E)|^{1/2} \gg 1, \quad (3)$$

при выполнении которого в резонаторе имеют место HE колебания. При этом постоянная D_m определяется через параметр источника возбуждения или из условия нормировки, а $C_m = D_m a \times J_m(q_{E1} \rho_0) / [(\mu_1 \alpha_1^H - \mu_2 \alpha_0^H) J_m(q_{H1} \rho_0)]$. В противном случае в резонаторе будут иметь место EH -колебания, для которых постоянная C_m определяется дополнительно, а $D_m = C_m a \times J_m(q_{H1} \rho_0) / [(\varepsilon_{\parallel 1} \alpha_1^E - \varepsilon_{\parallel 2} \alpha_0^E) J_m(q_{E1} \rho_0)]$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нами были исследованы высокодобротные квазиоптические цилиндрические диэлектрические резонаторы с колебаниями типа «шепчущей галереи». Резонаторы размещались в воздушном пространстве без электрофизических потерь ($\text{tg } \delta_2 = 0$). Основным условием существования в них слабозатухающих колебаний типа «шепчущей галереи» является превышение значений относительных диэлектрических проницаемостей резонатора (ε'_1 в случае изотропного вещества резонатора и $\varepsilon'_{\perp 1}$ и $\varepsilon'_{\parallel 1}$ в случае его анизотропии) над проницаемостью окружающей среды (ε'_2), при выполнении которого реализуется явление полного внутреннего отражения электромагнитных волн от границы раздела сред. Радиус фторопластового резонатора $\rho_0 = 3,9$ см, а его продольный размер $L = 0,7$ см. Геометрические параметры лейкосапфирового резонатора были $\rho_0 = 2,83$ см и $L = 0,24$ см.

Собственные моды (E - и H -типов) исследуемых цилиндрических диэлектрических резонаторов обладали следующими модовыми индексами $p \equiv msl$: азимутальным $m = 36$ во фторопластовом и $m = 64$ в лейкосапфировом резонаторах, радиальным $s = 1, 2, 3$ и продольным (аксиальным) $l = 0, 1$. Выбор собственных мод с указанными индексами обусловлен рабочим частотным диапазоном $35 \div 47$ ГГц. Электромагнитные поля собственных колебаний в основном сосредоточены внутри диэлектрического резонатора вблизи его цилиндрической боковой поверхности (рис. 2). Проникновение полей в окружающее пространство позволяет, с одной стороны, осуществлять эффективное возбуждение мод типа «шепчущей галереи», а с другой — реагировать на изменения параметров окружающей среды. Выбор возбуждаемой моды резонатора осуществляется подбором прицельного расстояния между ним и источником возбуждения совместно с частотной селекцией [4]. Не менее эффективное возбуждение цилиндрического диэлектрического резонатора осуществляется щелевым излучателем (или системой щелевых излучателей) в его торцевой проводящей поверхности, расположенным (расположенных) в области максимума (в максимумах пространственных вариаций) поля собственных колебаний резонатора.

2.1. Влияние индекса рефракции окружающего воздушного пространства на собственные параметры цилиндрического диэлектрического резонатора с колебаниями типа «шепчущей галереи»

Чувствительность резонаторного микроволнового рефрактометра определяется степенью изменения собственных параметров резонатора, т. е. частоты ω'_p и добротности Q^j p -й моды j -го типа, при изменении диэлектрической проницаемости окружающей среды ε'_2 и, следовательно, её

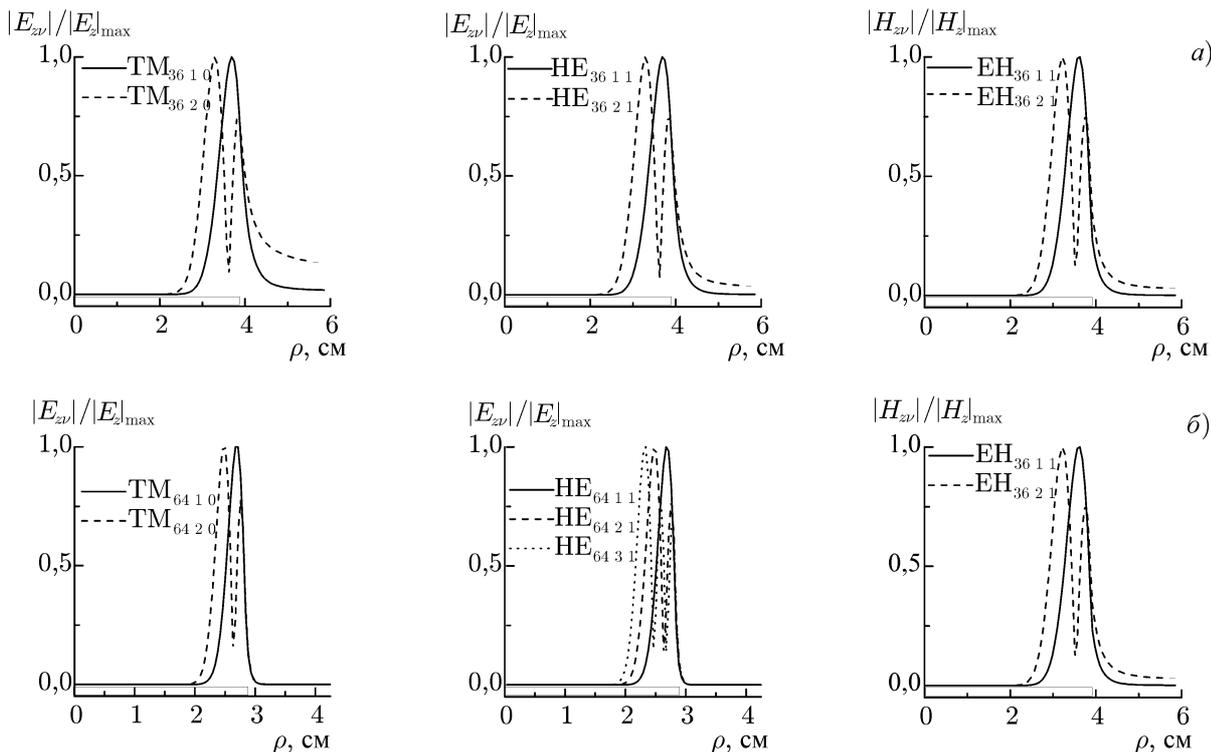


Рис. 2. Нормированные распределения модулей продольных компонент полей собственных мод цилиндрических фторопластового (а) и лейкосапфирового (б) резонаторов вдоль радиальной координаты

индекса рефракции $N = 10^6 (n_2 - 1)$, где $n_2 = \sqrt{\epsilon'_2}$ — коэффициент преломления воздуха. Использование количественного параметра N обусловлено малым отличием величины n_2 от единицы. Так, у поверхности Земли он отличается от единицы в четвёртом знаке после запятой [7, 8].

На рис. 3 приведены зависимости собственных параметров исследуемых цилиндрических диэлектрических резонаторов от диэлектрической проницаемости окружающей среды. Температура окружающего пространства равна 20 °С. Зависимости изменений собственных частот $\Delta\omega'_p$ резонаторов от индекса рефракции N воздуха приведены на рис. 4.

Рост реальной части относительной диэлектрической проницаемости среды приводит к снижению собственных частот резонаторов. Это обусловлено увеличением объёмов, занимаемых полями собственных колебаний из-за их более глубокого проникновения в окружающее пространство. Поскольку разность между диэлектрическими проницаемостями резонатора и окружающей среды для фторопластового резонатора меньше, чем для лейкосапфирового ($\epsilon'_1 - \epsilon'_2 < (\epsilon'_{11} + \epsilon'_{11})/2 - \epsilon'_2$), то степень проникновения полей его собственных колебаний во внешнюю среду больше (рис. 2). Данный факт приводит к снижению собственных добротностей фторопластового резонатора при повышении диэлектрической проницаемости окружающей среды из-за увеличения радиационных потерь (рис. 3а). Собственные добротности резонатора с модой TM_{3620} (например, при $\epsilon'_2 = 1$ добротность $Q^E = 457$) имеют значения на порядок ниже, чем с модой TM_{3610} (при $\epsilon'_2 = 1$ добротность $Q^E = 4870$), что обусловлено большей глубиной проникновения поля моды TM_{3620} в окружающее пространство по сравнению с полем моды TM_{3610} (рис. 2а). Собственные добротности резонатора с гибридными модами с радиальными индексами $s = 1$ (т.е. с одной вариацией поля вдоль радиальной координаты) и $s = 2$ (т.е. с двумя вариациями поля вдоль радиальной координаты) отличаются примерно в два раза (рис. 3а). Отметим, что резонатор с модой EH_{3611} имеет наибольшую добротность $Q^H = 6179$. В лейкосапфировом резо-

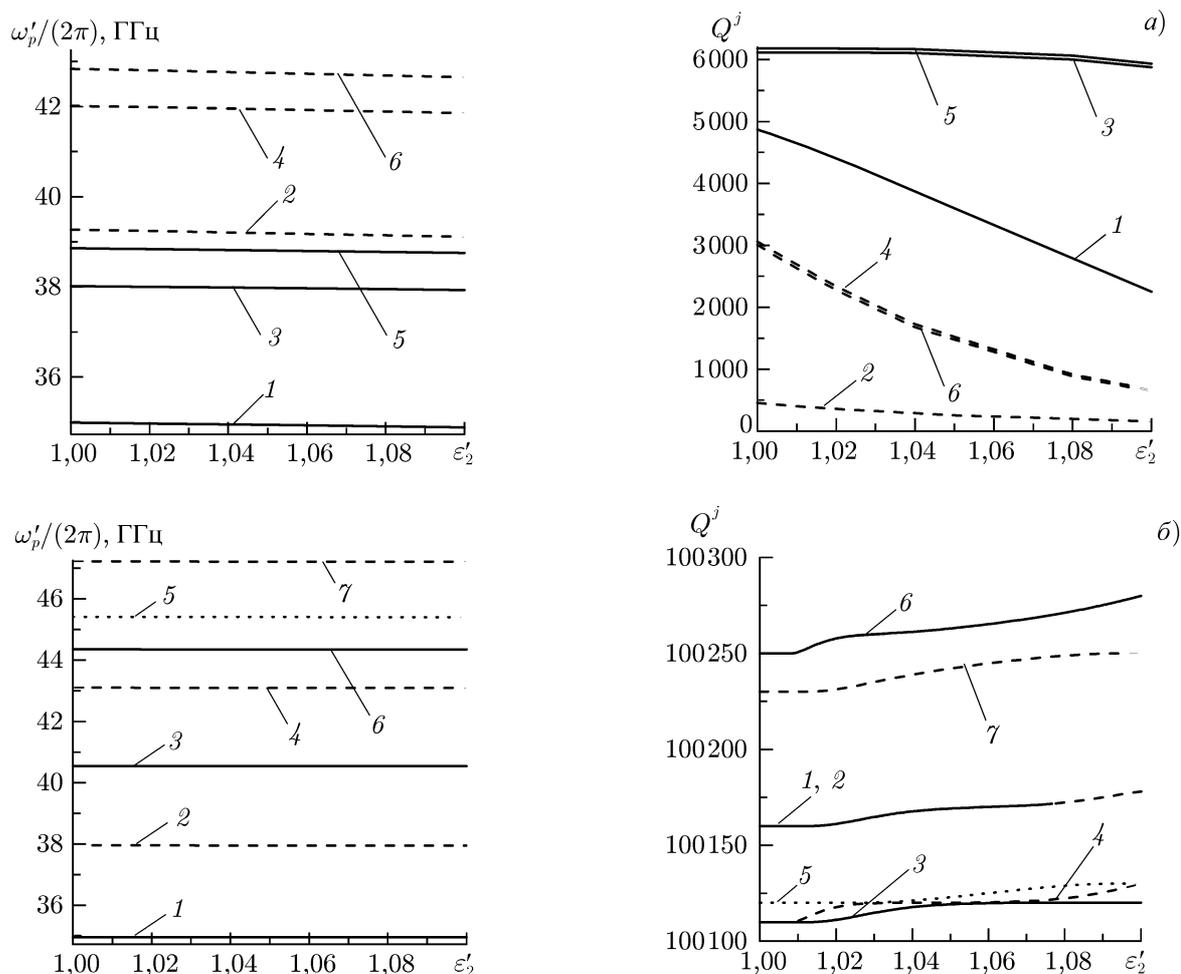


Рис. 3. Действительные части собственных частот ω_p' и добротности Q^j цилиндрических диэлектрических резонаторов при различных диэлектрических проницаемостях окружающей среды: панель (а) — фторопластовый резонатор с модами TM_{3610} (кривые 1), TM_{3620} (2), HE_{3611} (3), HE_{3621} (4), EH_{3611} (5), EH_{3621} (6); панель (б) — лейкосапфировый резонатор с модами TM_{6410} (кривые 1), TM_{6420} (2), HE_{6411} (3), HE_{6421} (4), HE_{6431} (5), EH_{6411} (6) и EH_{6421} (7)

наторе увеличение ϵ_2' от 1 до 1,1 приводит к незначительному росту добротностей (не более, чем на 25, рис. 3б), что обусловлено уменьшением диэлектрических потерь внутри резонатора из-за уменьшения объёма локализации поля собственных колебаний вблизи цилиндрической поверхности. Поскольку уменьшение объёма сосредоточения поля внутри резонатора не превосходит увеличение объёма проникновения поля во внешнюю среду, то наблюдается слабое снижение собственных частот лейкосапфирового резонатора (рис. 4). При этом темпы снижения собственных частот лейкосапфирового резонатора примерно в 30 раз ниже, чем собственных частот фторопластового резонатора. Дальнейшее увеличение ϵ_2' окружающей среды приводит к достижению максимальных значений добротности с последующим её резким убыванием. Например, резонатор с модой TM_{6410} имеет максимальную добротность $Q^E \approx 102\,320$ при его расположении в прозрачной среде с $\epsilon_2' \approx 6$, тогда как в вакууме $Q^E = 100\,160$. Очень слабое проявление аналогичного явления наблюдается и во фторопластовом резонаторе с модами HE_{3611} и EH_{3611} . Максимальными добротностями $Q^E = 6\,118$ и $Q^H = 6\,181$ он обладает при окружении его прозрачной средой

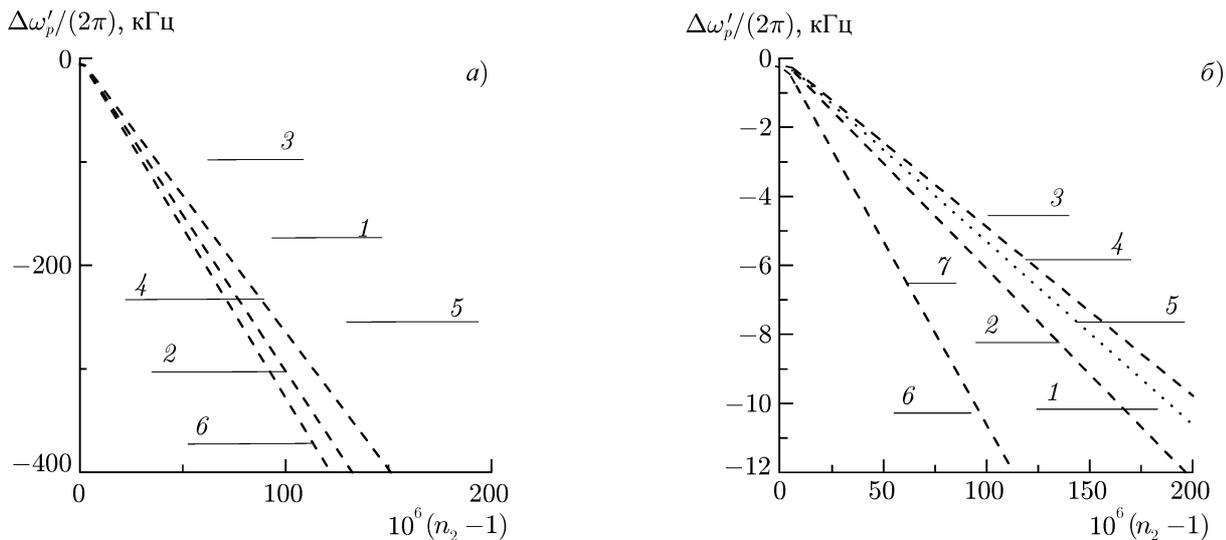


Рис. 4. Изменения действительных частей собственных частот цилиндрических диэлектрических резонаторов при изменении индекса рефракции воздуха: панель (а) фторопластовый резонатор с модами TM_{3610} (кривые 1), TM_{3620} (2), HE_{3611} (3), HE_{3621} (4), EH_{3611} (5), EH_{3621} (6); панель (б) — лейкосапфировый резонатор с модами TM_{6410} (кривые 1), TM_{6420} (2), HE_{6411} (3), HE_{6421} (4), HE_{6431} (5), EH_{6411} (6) и EH_{6421} (7)

с $\epsilon'_2 = 1,01$, тогда как при помещении в вакуум его добротности соответственно равны 6 117 и 6 179. Отметим, что при $1 < \epsilon'_2 < 1,1$ лейкосапфировый резонатор с модой EH_{6411} имеет наибольшую добротность Q^H , превышающую значение 100 250, а с модами E -типа — наименьшую добротность $Q^E \approx 100\,115 \pm 5$. Однако при изменении индекса рефракции воздуха N в пределах $0 \div 10^4$ (что соответствует $1 < \epsilon'_2 \leq 1,02$) лейкосапфировый резонатор обладает постоянными добротностями, приведёнными в табл. 1. В табл. 2 приведены добротности фторопластового резонатора, расположенного в вакууме ($\epsilon'_2 = 1$). Добротности резонатора с аксиально-однородными модами TM_{3610} и TM_{3620} не изменяются при изменении индекса рефракции воздуха N только в пределах $0 \div 11$ (что соответствует $1 < \epsilon'_2 \leq 1,00002$). Постоянство добротностей резонатора с гибридными модами HE_{3611} , HE_{3621} , EH_{3611} и EH_{3621} сохраняется при изменении индекса рефракции воздуха N в пределах $0 \div 40$ (что соответствует $1 < \epsilon'_2 \leq 1,00008$).

Флуктуации индекса рефракции воздуха порядка 0,05, что эквивалентно увеличению ϵ'_2 на 10^{-7} , приводят к смещению собственных частот фторопластового резонатора на 92 и 151 Гц в сторону уменьшения для мод TM_{3610} и TM_{3620} соответственно. Собственные частоты резонатора

Таблица 1. Собственные добротности лейкосапфирового резонатора с E - и H -типами колебаний

Мода	Q^j
TM_{6410}	100 160
TM_{6420}	100 160
HE_{6411}	100 110
HE_{6421}	100 110
HE_{6431}	100 120
EH_{6411}	100 250
EH_{6421}	100 230

Таблица 2. Собственные добротности фторопластового резонатора с E - и H -типами колебаний

Мода	Q^j
TM_{3610}	4 870
TM_{3620}	457
HE_{3611}	6 117
HE_{3621}	3 062
EH_{3611}	6 179
EH_{3621}	3 007

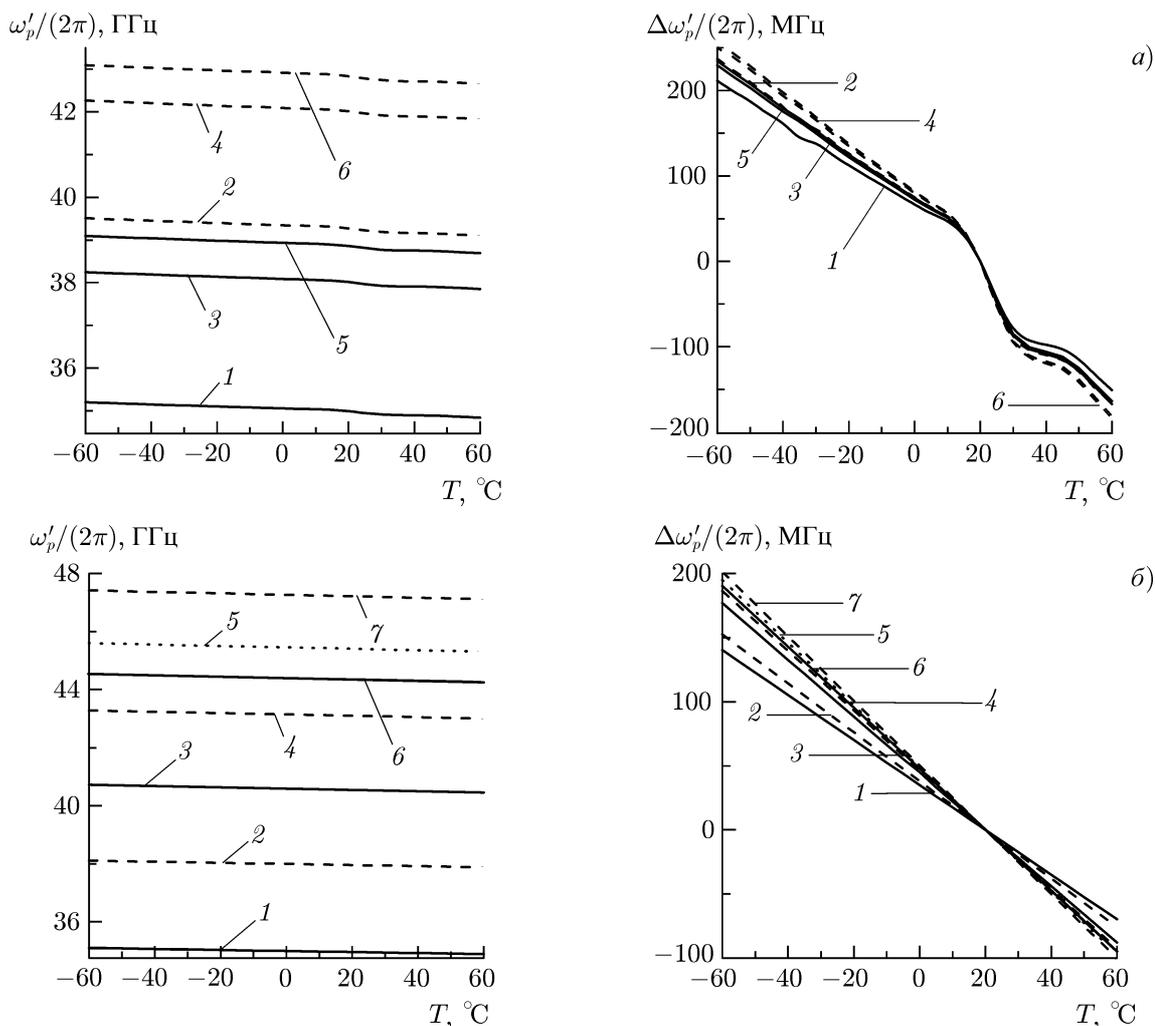


Рис. 5. Температурные зависимости действительных частей собственных частот ω_p' и их изменений $\Delta\omega_p'$ цилиндрических диэлектрических резонаторов: панель (а) — фторопластовый резонатор с модами TM_{3610} (кривые 1), TM_{3620} (2), HE_{3611} (3), HE_{3621} (4), EH_{3611} (5), EH_{3621} (6); панель (б) — лейкосапфировый резонатор с модами TM_{6410} (кривые 1), TM_{6420} (2), HE_{6411} (3), HE_{6421} (4), HE_{6431} (5), EH_{6411} (6) и EH_{6421} (7)

с модами HE_{3611} и HE_{3621} уменьшаются на 78 и 133 Гц, а с модами EH_{3611} и EH_{3621} — на 98 и 164 Гц соответственно. Аналогичные флуктуации индекса N уменьшают собственные частоты лейкосапфирового резонатора на несколько герц. Так, частоты резонатора с модами E -типа уменьшаются на 3 Гц, а с модами H -типа — на 6 и 5 Гц для мод EH_{6411} и EH_{6421} соответственно.

2.2. Влияние температуры окружающего воздушного пространства на собственные параметры цилиндрического диэлектрического резонатора с колебаниями типа «шепчущей галереи»

Собственные частоты цилиндрического диэлектрического резонатора в интервале температур окружающей среды от -60 до $+60$ °С и их изменения при отклонении температуры T атмосферы от $+20$ °С приведены на рис. 5. При этом считается, что диэлектрическая проницаемость внешней воздушной среды $\epsilon_2' = 1$.

Увеличение температуры окружающего пространства и, следовательно, цилиндрического ди-

Таблица 3. Чувствительности собственных частот фторопластового резонатора с E - и H -типами колебаний к изменениям индекса рефракции и температуры окружающего воздушного пространства

Мода	$\frac{\Delta\omega'_p}{2\pi \Delta N} \Big _{\Delta T=0}$, кГц	$\frac{\Delta\omega'_p}{2\pi \Delta T} \Big _{\Delta N=0}$, МГц/°С
TM _{36 10}	$-1,84 \pm 0,03$	$-(1,0 \div 8,7)$
TM _{36 20}	$-3,03 \pm 0,03$	$-(1,1 \div 9,8)$
HE _{36 11}	$-1,55 \pm 0,01$	$-(1,1 \div 9,5)$
HE _{36 21}	$-2,65 \pm 0,01$	$-(1,2 \div 10,5)$
EH _{36 11}	$-1,97 \pm 0,01$	$-(1,1 \div 9,7)$
EH _{36 21}	$-3,28 \pm 0,02$	$-(1,3 \div 10,7)$

Таблица 4. Чувствительности собственных частот лейкосапфирового резонатора с E - и H -типами колебаний к изменениям индекса рефракции и температуры окружающего воздушного пространства

Мода	$\frac{\Delta\omega'_p}{2\pi \Delta N} \Big _{\Delta T=0}$, кГц	$\frac{\Delta\omega'_p}{2\pi \Delta T} \Big _{\Delta N=0}$, МГц/°С
TM _{64 10}	-55 ± 3	$-1,75 \pm 0,02$
TM _{64 20}	-61 ± 3	$-1,90 \pm 0,01$
HE _{64 11}	-45 ± 3	$-2,20 \pm 0,02$
HE _{64 21}	-48 ± 3	$-2,32 \pm 0,01$
HE _{64 31}	-53 ± 3	$-2,43 \pm 0,02$
EH _{64 11}	-111 ± 5	$-2,38 \pm 0,02$
EH _{64 21}	-106 ± 5	$-2,50 \pm 0,02$

электрического резонатора приводит к снижению его собственных частот, что обусловлено увеличением его геометрического объёма. Неравномерность частотных характеристик фторопластового резонатора в интервале температур от -10 до $+50$ °С обусловлена неравномерностью коэффициента линейного теплового расширения α фторопласта, величина которого при температурах $-(60 \div 10)$ °С изменяется мало и в среднем равна $8 \cdot 10^{-5}$, затем резко возрастает, достигая максимального значения $25 \cdot 10^{-5}$ при $+20$ °С, а потом снова резко убывает до $11 \cdot 10^{-5}$ при 50 °С [9]. Коэффициенты линейного теплового расширения лейкосапфира имеют значения $\alpha_{\perp} = 5 \cdot 10^{-6}$ и $\alpha_{\parallel} = 6,7 \cdot 10^{-6}$ соответственно в перпендикулярном и параллельном к оптической оси кристалла направлениях. Собственные добротности Q^j резонаторов с модами типов j во всём температурном интервале $-60 \div 60$ °С не изменяются и имеют значения, приведённые в табл. 1 и 2.

Флуктуации температуры в пределах $\pm 0,01$ °С относительно $T = 20$ °С приводят к смещению собственных частот фторопластового резонатора в пределах ∓ 87 и ∓ 98 кГц для мод TM_{36 10} и TM_{36 20} соответственно. Аналогично, собственные частоты резонатора с модами HE_{36 11} и HE_{36 21} смещаются в пределах ∓ 95 и ∓ 105 кГц, а с модами EH_{36 11} и EH_{36 21} — ∓ 97 и ∓ 107 кГц соответственно. Собственные частоты лейкосапфирового резонатора с аксиально-однородными модами TM_{64 10} и TM_{64 20} смещаются соответственно в пределах $\mp 17,4$ и $\mp 18,98$ кГц. Собственные частоты резонатора с модами HE_{64 11}, HE_{64 21} и HE_{64 31} смещаются в пределах $\mp 22,03$, $\mp 23,19$ и $\mp 24,27$ кГц, а с модами EH_{64 11} и EH_{64 21} — $\mp 23,78$ и $\mp 25,09$ кГц соответственно. Температурные коэффициенты частот лейкосапфирового резонатора имеют значения порядка $-5 \cdot 10^{-5}$ °С⁻¹, а фторопластового резонатора — в пределах от $-2,5 \cdot 10^{-4}$ до $-2,9 \cdot 10^{-5}$ °С⁻¹. При температуре 20 °С фторопластовый резонатор имеет температурный коэффициент частоты $-2,5 \cdot 10^{-4}$ °С⁻¹, что обусловлено наибольшим значением коэффициента линейного расширения фторопласта при этой температуре.

2.3. Чувствительности собственных частот цилиндрического диэлектрического резонатора к изменениям индекса рефракции и температуры окружающего воздушного пространства

В табл. 3 и 4 приведены чувствительности собственных частот исследуемых цилиндрических диэлектрических резонаторов с E - и H -типами колебаний к изменениям индекса рефракции (т. е. величины $(\Delta\omega'_p/\Delta N) \Big|_{\Delta T=0}$) и температуры (т. е. величины $(\Delta\omega'_p/\Delta T) \Big|_{\Delta N=0}$) окружающего воз-

душного пространства и, следовательно, резонаторов. Их отрицательные значения указывают на уменьшение собственных частот резонаторов с ростом индекса рефракции и/или температуры воздуха, что соответствует общим физическим принципам. Исследуемые цилиндрические фторопластовый и лейкосапфировый резонаторы с аксиально-однородными колебаниями обладают минимальными значениями величины $|\Delta\omega'_p/(2\pi \Delta T)|_{\Delta N=0}$. Фторопластовый резонатор с E - и H -типами колебаний имеет максимальные значения $|\Delta\omega'_p/(2\pi \Delta T)|_{\Delta N=0}$ (табл. 3) при максимальном, а минимальные — при минимальном значениях коэффициента линейного расширения фторопласта. Относительные изменения собственных частот фторопластового и лейкосапфирового резонаторов из-за изменения индекса рефракции воздуха (т. е. величины $[\Delta\omega'_p/(\omega'_p \Delta N)]_{\Delta T=0}$) соответственно на три и на четыре порядка ниже, чем их температурные коэффициенты частот (т. е. величины $[\Delta\omega'_p/(\omega'_p \Delta T)]_{\Delta N=0}$).

3. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

Большие температурные коэффициенты частот, обусловленные главным образом тепловым расширением резонаторов, затрудняют практическое использование цилиндрических диэлектрических резонаторов в качестве измерительных ячеек рефрактометров. Преодоление отмеченной трудности достигается измерением температуры окружающей среды с точностью $\pm 10^{-5}$ °C, что обеспечивает определение диэлектрической проницаемости (или индекса рефракции) воздуха по собственным частотам резонатора с учётом их смещений из-за теплового расширения его объёма. При этом необходимая точность измерения частоты должна быть равна 10 Гц для фторопластового и 3 Гц для лейкосапфирового резонаторов. Модули чувствительностей собственных частот к изменениям индекса рефракции воздуха для фторопластового резонатора более чем на порядок выше аналогичных величин для лейкосапфирового резонатора. Эта особенность проявляется благодаря большей степени проникновения во внешнюю среду полей собственных колебаний фторопластового резонатора, чем лейкосапфирового резонатора. Следовательно, фторопластовый резонатор является более предпочтительным для использования в качестве сенсора рефрактометра.

Отметим, что применение диэлектрика с меньшим коэффициентом линейного расширения (например ситалла, у которого он на три порядка ниже, чем у фторопласта [10]) и со сравнимыми диэлектрическими потерями значительно (до приемлемых значений) снизит требование к точности измерения температуры.

В то же время исследованные квазиоптические цилиндрические диэлектрические резонаторы могут быть использованы в качестве датчиков температуры, обеспечивающих точность 10^{-4} °C при измерении их резонансных частот с точностью 100 Гц. При этом допустимое изменение индекса рефракции атмосферы не должно превышать 0,03 или 1 при использовании фторопластового или лейкосапфирового резонатора соответственно. Как датчик температуры предпочтительнее использовать лейкосапфировый резонатор. В предположении, что естественные флуктуации индекса рефракции воздуха не превышают 0,05 (что обеспечивает смещения собственных частот лейкосапфирового резонатора в пределах 6 Гц), такой датчик в состоянии обеспечить измерение температуры с точностью 10^{-5} °C при измерении резонансных частот с точностью 10 Гц.

3.1. Методика определения диэлектрической проницаемости (или индекса рефракции) окружающей воздушной среды

Изученная возможность разделения влияния изменений температуры и диэлектрической проницаемости окружающей среды на собственные параметры высокочастотного квазиоптического

го цилиндрического диэлектрического резонатора позволяет констатировать следующее. С одной стороны, не исключается возможность использования резонатора в качестве измерительной ячейки индекса рефракции воздуха в рефрактометре. Однако для этого необходимо обеспечить высокоточное измерение температуры воздуха, что весьма затруднительно. Из исследованных цилиндрических диэлектрических резонаторов для этой цели более приемлемым является фторопластовый резонатор, который обладает модулем чувствительности более 1,55 кГц на единицу индекса рефракции. При этом резонатор с E - и H -типами колебаний имеет приемлемые значения добротностей Q^j в интервале температуры окружающей среды $-60 \div 60^\circ\text{C}$. Отметим, что чувствительности собственных частот фторопластового резонатора к изменениям индекса рефракции окружающего воздушного пространства соизмеримы с аналогичными чувствительностями известных (например, упомянутых в [1]) сенсоров резонаторных рефрактометров. С другой стороны, цилиндрические диэлектрические резонаторы являются высокоточными сенсорами температуры окружающего пространства, обеспечивающими точность её измерения 10^{-4}°C при измерении их резонансных частот с точностью 100 Гц. Однако, как показано выше, лейкосапфировый резонатор в состоянии обеспечить точность измерения температуры 10^{-5}°C при измерении его собственных частот с точностью 10 Гц, которая является вполне достижимой для современной измерительной аппаратуры. При этом смещения собственных частот резонатора из-за изменения индекса рефракции воздуха не влияют на точность определения температуры.

Следовательно, при изменении температуры окружающего воздушного пространства для определения его диэлектрической проницаемости (или индекса рефракции) представляется применимой следующая методика, состоящая из двух этапов. На первом этапе уточняется температура окружающего пространства с точностью до 10^{-5}°C , что позволяет учесть изменения собственных параметров резонансной измерительной ячейки из-за теплового расширения её объёма. На втором этапе определяется диэлектрическая проницаемость внешней среды квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора.

Итак, на первом этапе проводится измерение температуры T окружающего воздушного пространства с использованием цилиндрического лейкосапфирового резонатора с модами E -типа (предпочтительнее HE_{6411} и HE_{6421}). Для этого измеряется (оценивается) температура T окружающего пространства с точностью 10^{-1}°C с помощью, например, ртутного термометра. Затем измеряются резонансные частоты с точностью 10 Гц и идентифицируется рабочая мода резонатора по структуре распределения её поля. В результате получается трансцендентное уравнение, составленное на основе соответствующего аксиально-однородным или гибридным модам характеристического уравнения резонатора (1) при подстановке в него измеренной резонансной частоты и учёте того, что радиус $\rho_0 = \rho_0|_{T=T_0} [1 + \alpha_{\perp} (T - T_0)]$ и продольный размер $L = L|_{T=T_0} [1 + \alpha_{\parallel} (T - T_0)]$, где $\rho_0|_{T=T_0}$ и $L|_{T=T_0}$ — исходные геометрические параметры резонатора, измеренные при температуре T_0 с точностью 10^{-3} см. Затем полученное уравнение решается относительно температуры T или её изменения $\Delta T = T - T_0$, знания которого достаточно в случае, когда исходные геометрические параметры лейкосапфирового и фторопластового резонаторов измерены при одной и той же температуре T_0 . В итоге из решений трансцендентного уравнения, найденных с точностью 10^{-5}°C , выбираем то, которое соответствует оценочной температуре и при котором структура распределения поля собственной моды резонатора соответствует рабочей моде.

На втором этапе определяется индекс рефракции воздуха с использованием цилиндрического фторопластового резонатора (предпочтительнее с модами с двумя вариациями поля вдоль радиальной координаты). Для этого измеряются резонансные частоты цилиндрического фторопластового резонатора с точностью 10 Гц и идентифицируется рабочая мода резонатора по структуре распределения её поля. Затем уточняются истинные размеры фторопластового резонатора $\rho_0 =$

$= \rho_0|_{T=T_0} [1 + \alpha(T - T_0)]$ и $L = L|_{T=T_0} [1 + \alpha(T - T_0)]$ (или их поправки $\Delta\rho_0 = \rho_0 - \rho_0|_{T=T_0}$ и $\Delta L = L - L|_{T=T_0}$) при измеренной температуре T (или её изменении ΔT). В результате получается трансцендентное уравнение, составленное на основе соответствующего аксиально-однородным или гибридным модам характеристического уравнения резонатора (1) при подстановке в него измеренной резонансной частоты и учёте истинных значений радиуса ρ_0 и продольного размера L (или их поправок $\Delta\rho_0$ и ΔL). Полученное уравнение решается относительно диэлектрической проницаемости окружающей прозрачной воздушной среды ε'_2 с точностью 10^{-7} . Из его решений выбираем то, при котором структура распределения поля собственной моды резонатора соответствует рабочей моде. В итоге определяем индекс рефракции воздуха $N = 10^6 (\sqrt{\varepsilon'_2} - 1)$ с точностью 10^{-2} .

Таким образом, при проведении экспериментальных исследований индекса рефракции окружающего воздушного пространства с применением вышеприведённой методики необходимо обеспечить измерение резонансных частот квазиоптических цилиндрических диэлектрических резонаторов с точностью 10 Гц и чётко идентифицировать рабочие моды резонаторов, для чего следует изучить пространственную структуру распределения их полей. Наличие строгого электродинамического решения задачи нахождения распределения полей мод и собственных частот цилиндрического диэлектрического резонатора исключает необходимость калибровки сенсора.

3.2. Сенсор двухрезонаторного микроволнового рефрактометра

Основной недостаток микроволнового рефрактометра обусловлен малыми относительными изменениями резонансной частоты резонатора, которые составляют сотые и тысячные доли ширины его резонансной кривой. Следовательно, с одной стороны, резонатор должен обладать высокой добротностью, а с другой стороны — сверхмалым значением температурного коэффициента частоты, что практически невыполнимо. Преодоление отмеченного влияния температуры на проводимые с помощью резонаторного рефрактометра измерения достигается использованием сенсора на основе двух цилиндрических диэлектрических резонаторов со слаботатухающими колебаниями типа «шепчущей галереи» (рис. 6). Такой сенсор отвечает двухрезонаторной модели рефрактометра [2], обеспечивающей измерения разности собственных частот двух идентичных цилиндрических диэлектрических резонаторов, окружённых различными внешними средами. Кроме того, общие торцевые проводящие поверхности таких цилиндрических диэлектрических резонаторов, обладающие высокой теплопроводностью, обеспечивают идентичность температурных режимов, что при дифференциальных измерениях исключает влияние температуры окружающей среды на измеряемый параметр сенсора. Один из резонаторов, являющийся эталонным, расположен во внутренней вакуумной среде ($\varepsilon'_2 = 1$) сильфона. Радиус сильфона превышает $1,5\rho_0$. Второй резонатор, являющийся измерительным, окружён исследуемой средой. Расстояние между центрами этих резонаторов не менее $3\rho_0$. При такой конфигурации сенсора проводящие стенки сильфона не влияют на структуру полей собственных колебаний резонаторов (рис. 2). Измеряемая разность собственных частот двух резонаторов с идентичными модами полностью определяется различиями физических параметров окружающих их сред, температура которых одинакова.

Зависимости разности собственных частот $\Delta\omega'_p$ резонаторов сенсора от индекса рефракции N

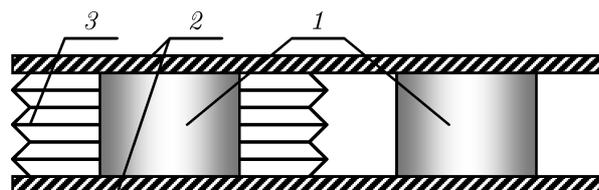


Рис. 6. Сенсор двухрезонаторного микроволнового рефрактометра: 1 — цилиндрические диэлектрические резонаторы, 2 — торцевые поверхности, 3 — сильфон

воздуха приведены на рис. 4а. Добротности эталонного резонатора, расположенного в вакууме ($\epsilon'_2 = 1$), приведены в табл. 2. Отметим, что добротности измерительного и эталонного резонаторов с модами TM_{3610} и TM_{3620} совпадают при изменении индекса рефракции воздуха в пределах $0 \div 11$, а с модами HE_{3611} , HE_{3621} , EH_{3611} и EH_{3621} — в пределах $0 \div 40$. Сенсор рефрактометра (рис. 6) фактически фиксирует смещения собственных частот измерительного резонатора. В табл. 3 приведены абсолютные чувствительности сенсора как средства измерения индекса рефракции окружающего пространства в диапазоне частот $35 \div 43$ ГГц. В случае естественных флуктуаций диэлектрической проницаемости воздуха при измерении разности собственных частот резонаторов с точностью 10 Гц сенсор в состоянии обеспечить точность определения индекса рефракции воздуха на уровне 10^{-2} .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе определены степени влияния изменений температуры и диэлектрической проницаемости внешней воздушной среды на собственные частоты и добротности цилиндрических диэлектрических резонаторов с колебаниями типа «шепчущей галереи». Впервые предпринята попытка разделения влияний указанных факторов на спектральные и энергетические характеристики фторопластового и лейкосапфирового резонаторов миллиметрового диапазона длин волн. Обнаружен различный характер поведения собственных частот резонаторов и стабильность их добротностей при изменении температуры в интервале от -60°C до 60°C и диэлектрической проницаемости воздуха в пределах $1 \div 1,00002$ для фторопластового и $1 \div 1,02$ для лейкосапфирового резонаторов. Определены чувствительности собственных параметров фторопластового ($\rho_0 = 3,9$ см и $L = 0,7$ см) и лейкосапфирового ($\rho_0 = 2,83$ см и $L = 0,24$ см) резонаторов к изменениям диэлектрической проницаемости и температуры окружающего прозрачного воздушного пространства в диапазоне частот $35 \div 47$ ГГц. Установлено, с одной стороны, что для выявления изменений диэлектрической проницаемости (или индекса рефракции) воздуха при температуре 20°C по изменениям собственных частот резонатора необходимо измерять температуру окружающей среды с точностью до 10^{-5}°C , что позволяет корректно учесть смещение собственных частот резонатора из-за теплового расширения его объёма. При этом необходимая точность измерения частоты равна 10 Гц. С другой стороны, показана возможность использования квазиоптических цилиндрических диэлектрических резонаторов в качестве датчиков температуры внешней воздушной среды, обеспечивающих точность её измерения 10^{-4}°C при измерении их резонансных частот с точностью 100 Гц. При этом допустимое изменение индекса рефракции атмосферы не должно превышать значение 0,03 или 1 при использовании фторопластового или лейкосапфирового резонатора соответственно. Однако лейкосапфировый резонатор в состоянии обеспечить измерение температуры атмосферы с точностью до 10^{-5}°C при измерении его резонансных частот с точностью 10 Гц, поскольку при естественных флуктуациях индекса рефракции воздуха в пределах 0,05 смещения его собственных частот находятся в пределах 6 Гц.

Показано, что решения обратной задачи электродинамики с учётом поправок к спектральным характеристикам квазиоптического резонатора из-за теплового объёмного расширения и/или изменения диэлектрической проницаемости воздуха позволяют определить температуру и/или проницаемость внешнего воздушного пространства на основе экспериментально измеренных резонансных частот резонатора с точностью 10 Гц, которая вполне достижима для современной измерительной аппаратуры. Разработана методика определения индекса рефракции воздуха с использованием исследованных квазиоптических цилиндрических диэлектрических резонаторов в качестве сенсора температуры и измерительной ячейки резонаторного рефрактометра.

Разработан сенсор микроволнового рефрактометра на основе двух цилиндрических диэлектрических резонаторов с колебаниями типа «шепчущей галереи». В нём реализована компенсация

влияния изменений температуры окружающего пространства на измеряемую разность собственных частот резонаторов с модами с идентичной структурой полей, что достигается с помощью использования дифференциального двухрезонаторного рефрактометра. При этом необходимая точность измерения разности частот должна быть равна 10 Гц. Точность определения индекса рефракции воздуха обеспечивается на уровне 10^{-2} . Отметим, что чувствительности собственных частот измерительного фторопластового резонатора к изменениям индекса рефракции окружающего воздушного пространства порядка чувствительностей известных (например, упомянутых в [1]) сенсоров резонаторных рефрактометров. Достоинство разработанного сенсора заключается в том, что он всегда расположен в исследуемом окружающем пространстве, т. е. он погружён в исследуемую среду, а не среда в него.

Работа выполнена при частичной поддержке Государственного агентства по вопросам науки, инноваций и информатизации Украины (договор ДЗ/467–2011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бин Б. Р. Радиометеорология / Пер. с англ. под ред. А. А. Семёнова. Л.: Гидрометеиздат, 1971.
2. Гаташ С. В. // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАНУ, 1999. Т. 4, № 1. С. 129.
3. Баранник А. А., Прокопенко Ю. В., Филиппов Ю. Ф., Черпак Н. Т. // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАНУ, 2000. Т. 5, № 3. С. 104.
4. Кириченко А. Я., Прокопенко Ю. В., Филиппов Ю. Ф., Черпак Н. Т. Квазиоптические твёрдотельные резонаторы. Киев: Наукова думка, 2008.
5. Прокопенко Ю. В., Филиппов Ю. Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72, № 6. С. 79.
6. Акау М. Ф., Prokopenko Yu., Kharkovsky S. // Microwave and Opt. Tech. Lett. 2004. V. 40, No. 2. P. 96.
7. Паршуков В. А. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 2. С. 172.
8. Казаков Л. Я., Ломакин А. Н. // Распространение радиоволн. М.: Наука, 1975.
9. Горяинова А. В., Божков Г. К., Тихонова М. С. Фторопласты в машиностроении. М.: Машиностроение, 1971.
10. Бережной А. И. Ситаллы и фотоситаллы. М.: Машиностроение, 1981.

Поступила в редакцию 22 мая 2013 г.; принята в печать 28 июня 2013 г.

INFLUENCE OF THE REFRACTIVE INDEX AND TEMPERATURE OF THE AMBIENT MEDIUM ON THE EIGENFREQUENCIES OF QUASIOPTICAL CYLINDRICAL DIELECTRIC RESONATORS

A. V. Dormidontov and Yu. V. Prokopenko

We have made the first effort to separate the influences of the temperature and refractive index of the ambient air space on the spectrum and energy characteristics of cylindrical Teflon and leucosapphire resonators with the whispering gallery modes in the millimeter wavelength band. It is found that the degree of temperature influence on the resonator eigenfrequencies is greater under the conditions of natural fluctuations of the above-mentioned factors of the external medium under consideration. We demonstrate that quasioptical cylindrical dielectric resonators can be used as sensors of the temperature

A. V. Дормидонтов, Ю. В. Прокопенко

of the ambient air medium, which ensure an accuracy of 10^{-4} °C when their resonance frequencies are measured with an accuracy of 100 Hz. A method for determination of the refractive index of air has been developed, which involves the use of the considered resonator as temperature sensors and measuring cell of the microwave resonator refractometer. The refractometer sensor has been developed on the basis of two identical resonators with whispering gallery modes. The differential double-resonator refractometer compensates the influence of the changes in the temperature of the ambient medium on the measured difference of the eigenfrequencies of resonators with identical modes. It is found that the accuracy of determination of the refractive index of air is ensured at a level of 10^{-2} , when the frequency difference is measured with an accuracy of 10 Hz.