

07;15

Влияние температуры окружающей среды на собственные частоты квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора

© А.В. Дормидонтов, Ю.В. Прокопенко

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

Поступило в Редакцию 29 августа 2012 г.

Проведено исследование влияния температуры и индекса рефракции окружающего воздушного пространства на собственные параметры цилиндрического диэлектрического резонатора с колебаниями „шепчущей галереи“. Впервые предпринята попытка разделения влияний указанных факторов на спектральные и энергетические характеристики фторопластового резонатора миллиметрового диапазона длин волн. Обнаружен различный характер поведения собственных частот резонатора и стабильность его добротностей при изменении температуры в интервале от -60 до $+60^\circ\text{C}$ и диэлектрической проницаемости воздуха в пределах $1-1.0004$. Показано, что резонатор может быть использован в качестве датчика температуры окружающей среды, обеспечивающего точность 10^{-4}°C при измерении его резонансных частот с точностью 1 kHz в диапазоне миллиметровых длин волн.

Интерес к квазиоптическим диэлектрическим резонаторам обусловлен чувствительностью полей их собственных колебаний к состояниям их внутренних и внешних сред. В настоящее время они широко применяются в качестве датчиков в устройствах для определения электрофизических параметров веществ [1–4]. Особенностью таких резонаторов является наличие электромагнитных полей вблизи их криволинейных поверхностей. Для собственных слабозатухающих колебаний „шепчущей галереи“ в резонаторе всегда выполняется условие $\varepsilon'_1 > \varepsilon'_2$, где ε'_1 и ε'_2 — относительные диэлектрические проницаемости материала резонатора и окружающей среды соответственно. Основная часть поля этих колебаний сосредоточена внутри диэлектрика, что обеспечивает

высокую добротность резонатора, но имеется некоторая часть поля и вне диэлектрика, т.е. в окружающем пространстве [5,6]. Отметим, что чем меньше разность $\epsilon'_1 - \epsilon'_2$, тем больше глубины проникновений полей собственных колебаний резонатора во внешнюю среду [7]. При этом окружающее пространство является неотъемлемой частью резонатора, вследствие чего собственные параметры (собственные частоты и добротности) такого резонатора полностью зависят от электрофизических параметров окружающего пространства. Следовательно, квазиоптический диэлектрический резонатор может быть использован в качестве контактного параметрического сенсора окружающей его среды.

В данной работе выясняются степени влияния температуры и диэлектрической проницаемости атмосферы ϵ'_2 на спектральные и энергетические характеристики квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора (ЦДР). Необходимость этих исследований обусловлена выявлением возможности использования высокодобротных ЦДР в качестве датчиков резонаторных рефрактометров, в которых обеспечивается измерение частот с точностью до десятков герц [8,9]. Преобладающей особенностью ЦДР является то, что он всегда непосредственно контактирует с окружающей средой, которая является непосредственной его частью. При этом нет необходимости обеспечения принудительного отбора некоторого объема воздуха с целью его внедрения в резонаторный сенсор для диагностирования электрофизических параметров среды в контролируемой точке пространства. Достаточно поместить резонатор в эту точку.

Исследования собственных частот ω'_p и добротностей Q^j ЦДР с проводящими торцевыми поверхностями, окруженного воздушным пространством без электрофизических потерь ($\text{tg } \delta_2 = 0$), проведены на фторопластовом ($\epsilon'_1 = 2.4$; $\text{tg } \delta_1 = 1.7 \cdot 10^{-4}$) образце с радиусом $\rho_0 = 3.9$ см и продольным размером $L = 0.7$ см. Электродинамический анализ исследуемого ЦДР проведен, в частности, в работе [10]. Нами проведены исследования резонатора с модами Е- и Н-типов, имеющими модовые индексы $p \equiv msl$: азимутальный $m = 36$, радиальный $s = 1; 2$ и продольный (аксиальный) $l = 0; 1$. Выбор собственных мод с азимутальным индексом $m = 36$ обусловлен рабочим частотным диапазоном 34–43 GHz.

Изменения собственных частот ЦДР, вызванные изменением температуры T атмосферы и, следовательно, резонатора, приведены на рис. 1. При этом диэлектрическая проницаемость воздушной внешней

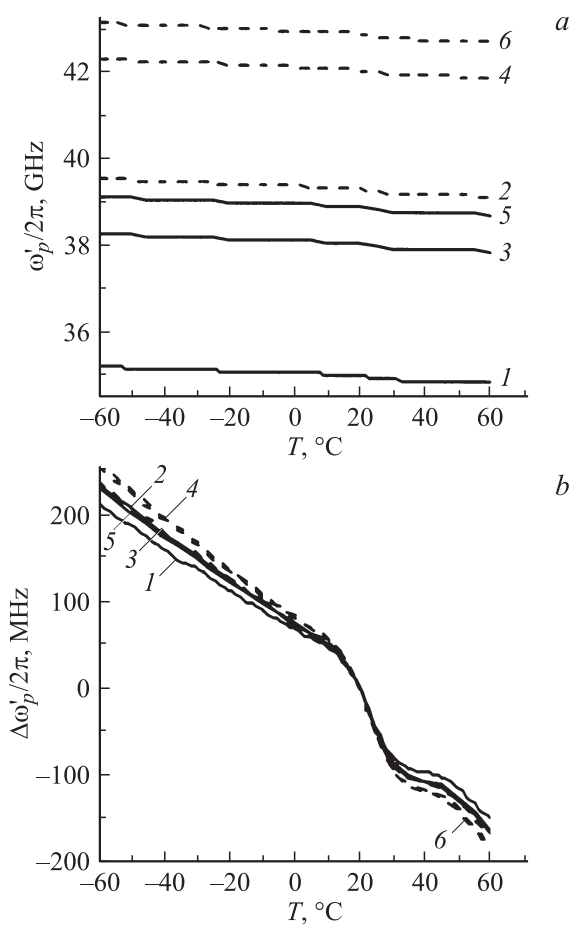


Рис. 1. Температурные зависимости *a* — собственных частот ($\omega_p'/2\pi$) и *b* — их изменений ($\Delta\omega_p'/2\pi$) ЦДР с модами: 1 — TM_{3610} ; 2 — TM_{3620} ; 3 — HE_{3611} ; 4 — HE_{3621} ; 5 — EH_{3611} ; 6 — EH_{3621} .

среды $\varepsilon_2' = 1$. Неравномерность частотных характеристик в интервале температур от -10 до $+50^{\circ}\text{C}$ обусловлена неравномерностью коэффициента линейного расширения фторопласта, величина которого

Таблица 1. Собственные добротности ЦДР с Е- и Н-типами колебаний

Мода	Q^j
TM _{36 10}	4870
TM _{36 20}	457
HE _{36 11}	6117
HE _{36 21}	3062
EH _{36 11}	6179
EH _{36 21}	3007

при температурах $-60 - -10^\circ\text{C}$ изменяется мало и в среднем равна $8 \cdot 10^{-5}$, а затем резко возрастает, достигая максимального значения $25 \cdot 10^{-5}$ при $+20^\circ\text{C}$, и снова резко убывает до $11 \cdot 10^{-5}$ при 50°C [10]. Собственные добротности Q^j резонатора с модами j -типов во всем температурном интервале $-60 - +60^\circ\text{C}$ не изменяются и имеют значения, приведенные в табл. 1.

Электромагнитные поля собственных Е- и Н-типов колебаний в основном сосредоточены внутри диэлектрического резонатора вблизи его цилиндрической боковой поверхности. Проникновение полей в окружающее пространство позволяет, с одной стороны, осуществлять эффективное возбуждение мод „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 [7]. Из-за большей глубины проникновения поля моды TM_{36 20}, по сравнению с полем моды TM_{36 10}, собственная добротность резонатора с этой модой ($Q^E = 457$) имеет значение на порядок ниже, чем с модой TM_{36 10} ($Q^E = 4870$). Собственные добротности резонатора с аксиально-неоднородными модами с радиальными индексами $s = 1$ (одной вариацией поля вдоль радиальной координаты) и $s = 2$ (двумя вариациями поля вдоль радиальной координаты) отличаются порядка двух раз (табл. 1). Отметим, что резонатор с модой EH_{36 11} имеет наибольшую добротность $Q^H = 6179$. Флуктуации температуры в пределах $\pm 0.01^\circ\text{C}$ при $T = 20^\circ\text{C}$ приводят к смещению собственных частот резонатора в пределах ± 87 и ± 98 kHz соответственно для мод TM_{36 10} и TM_{36 20}. Аналогично собственные частоты резонатора с модами HE_{36 11} и HE_{36 21} смещаются в пределах ± 95 и ± 105 kHz, а с модами EH_{36 11} и EH_{36 21} — ± 97 и ± 107 kHz соответственно.

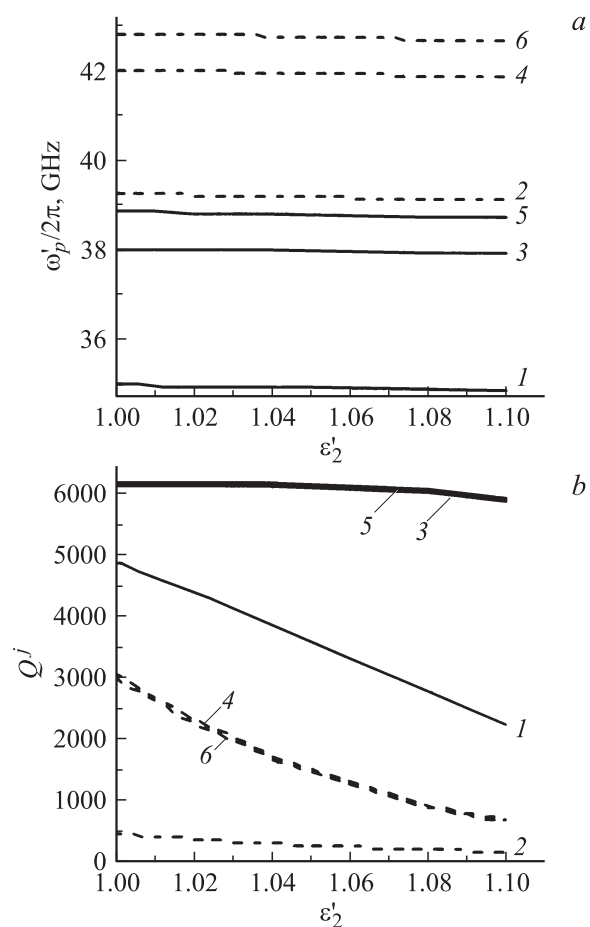


Рис. 2. *a* — собственные частоты ($\omega_p'/2\pi$) и *b* — добротности (Q^j) ЦДР с модами: 1 — ТМ₃₆₁₀; 2 — ТМ₃₆₂₀; 3 — НЕ₃₆₁₁; 4 — НЕ₃₆₂₁; 5 — ЕН₃₆₁₁; 6 — ЕН₃₆₂₁ — при различных диэлектрических проницаемостях окружающей среды.

На рис. 2 приведены зависимости собственных частот и добротностей ЦДР от диэлектрической проницаемости окружающей среды. Температура окружающего пространства равна 20°C.

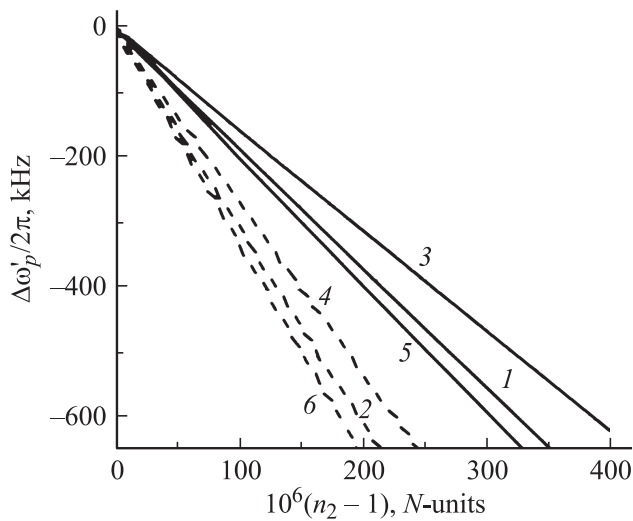


Рис. 3. Изменение собственных частот резонатора с модами: 1 — TM_{3610} ; 2 — TM_{3620} ; 3 — HE_{3611} ; 4 — HE_{3621} ; 5 — EH_{3611} ; 6 — EH_{3621} — при изменении индекса рефракции воздуха.

Чувствительность резонаторного микроволнового рефрактометра определяется степенью изменения собственных параметров резонатора (частоты ω'_p и добротности Q^j резонатора с p -й модой j -типа) к изменению диэлектрической проницаемости окружающей воздушной среды ϵ'_2 и, следовательно, 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 в четвертом знаке после запятой [9]). На рис. 3 приведены зависимости изменений собственных параметров исследуемого ЦДР от индекса рефракции N . Повышение диэлектрической проницаемости внешней среды приводит к снижению собственных частот и добротностей резонатора. Отметим, что при изменении индекса рефракции воздуха в пределах 0–11 N -units добротности резонатора с модами TM_{3610} и TM_{3620} не изменяются. Постоянство добротностей резонатора с аксиально-неоднородными (HE_{3611} , HE_{3621} , EH_{3611} и EH_{3621}) модами сохраняется при изменении

индекса рефракции воздуха в пределах 0–40 N -units. Флуктуации индекса рефракции порядка 0.05 N -units, что эквивалентно увеличению ϵ'_2 на 10^{-7} , приводят к смещению собственных частот резонатора на 92 и 151 Hz в сторону уменьшения соответственно для мод $TM_{36,10}$ и $TM_{36,20}$. Аналогично собственные частоты резонатора с модами $HE_{36,11}$ и $HE_{36,21}$ уменьшаются на 78 и 133 Hz, а с модами $EH_{36,11}$ и $EH_{36,21}$ — на 98 и 164 Hz соответственно.

Следовательно, высокий температурный коэффициент частоты, обусловленный главным образом температурной зависимостью линейного коэффициента расширения диэлектрика резонатора, практически затрудняет использование ЦДР в качестве измерительной ячейки рефрактометра. Преодоление отмеченной трудности достигается измерением температуры окружающей среды с точностью $\pm 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$, что обеспечивает определение диэлектрической проницаемости (индекса рефракции) воздуха по собственным частотам резонатора с учетом их смещений из-за теплового расширения его объема. При этом необходимая точность измерения частоты должна быть равна 10 Hz. Отметим, что использование диэлектрика с меньшим порядком коэффициента линейного расширения (например, ситалла, у которого он на три порядка ниже, чем у фторопласта) и со сравнимыми диэлектрическими потерями значительно снизит требование к точности измерения температуры до приемлемых значений. В то же время исследованный квазиоптический ЦДР может быть использован в качестве датчика температуры, обеспечивающего точность $10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ при измерении его резонансных частот с точностью 1 kHz. При этом допустимое изменение индекса рефракции атмосферы не должно превышать значение 0.05 N -units, обеспечивающее смещение собственных частот резонатора в пределах 150 Hz.

В табл. 2 приведены чувствительности изменений собственных частот исследуемого фторопластового резонатора с E- и H-типами колебаний к изменениям индекса рефракции и температуры воздуха. Их отрицательные значения указывают на уменьшение собственных частот резонатора с ростом индекса рефракции и/или температуры окружающего воздушного пространства, что соответствует общим физическим законам. Максимальные значения модулей чувствительностей ЦДР к изменениям температуры имеют место при максимальном, а минимальные — при минимальном значении коэффициента линейного расширения фторопласта.

Таблица 2. Чувствительности ЦДР с Е- и Н-типами колебаний

Мода	$\frac{\Delta\omega'_p}{2\pi\Delta N}$, $\frac{\text{kHz}}{\text{N-unit}}$	$\frac{\Delta\omega'_p}{\Delta T}$, $\frac{\text{MHz}}{^\circ\text{C}}$
ТМ _{36 10}	-1.84 ± 0.03	$-(1.0-8.7)$
ТМ _{36 20}	-3.03 ± 0.03	$-(1.1-9.8)$
НЕ _{36 11}	-1.55 ± 0.01	$-(1.1-9.5)$
НЕ _{36 21}	-2.65 ± 0.01	$-(1.2-10.5)$
ЕН _{36 11}	-1.97 ± 0.01	$-(1.1-9.7)$
ЕН _{36 21}	-3.28 ± 0.02	$-(1.3-10.7)$

Изученная возможность разделения влияния двух факторов — изменений температуры и диэлектрической проницаемости окружающей среды на собственные параметры высокочастотного квазиоптического ЦДР позволяет констатировать следующее. С одной стороны, не исключается возможность использования резонатора в качестве измерительной ячейки индекса рефракции воздуха в рефрактометре, для чего необходимо высокоточное измерение температуры, что весьма затруднительно. Нами были проведены аналогичные исследования в том же частотном диапазоне лейкосапфирового резонатора с радиусом 2.83 см. Такой резонатор, например, с модой ТМ_{64 10} обладает чувствительностями $(0.05 \pm 0.005) \text{ kHz/1 N-unit}$ и $(1.75 \pm 0.01) \text{ MHz/}^\circ\text{C}$, а с модой ТМ_{64 20} — $(0.061 \pm 0.002) \text{ kHz/1 N-unit}$ и $(1.89 \pm 0.01) \text{ MHz/}^\circ\text{C}$. При этом резонатор с обеими модами имеет добротности $Q^E = 100\ 160$ в интервале температуры $-60-+60^\circ\text{C}$. Из-за меньших смещений собственных частот лейкосапфирового резонатора, что обусловлено малой глубиной проникновения поля в окружающее пространство, для разделения отмеченных двух факторов необходим контроль температуры той же точности, что и для исследованного фторопластового резонатора. Отметим, что ЦДР обладает приемлемыми чувствительностями изменений собственных частот к изменениям индекса рефракции окружающего воздушного пространства, которые соизмеримы с чувствительностями других резонансных сенсоров рефрактометров [8]. С другой стороны, ЦДР является высокоточным сенсором температуры окружающего пространства, обеспечивающим точность 10^{-4}°C при измерении его резонансных частот с точностью 1 kHz, что приемлемо для современной измерительной аппаратуры. При этом смещения собственных частот резонатора из-за изменения индекса рефракции воздуха не влияют на

точность определения температуры. Наличие строгого электродинамического решения спектральной задачи ЦДР исключает необходимость калибровки сенсора.

Таким образом, определены степени влияния изменений температуры и диэлектрической проницаемости воздушной внешней среды на изменения собственных частот и добротностей ЦДР с колебаниями „шепчущей галереи“. Определены абсолютные чувствительности фторопластового резонатора как средства измерения параметров указанных факторов в диапазоне частот 34–43 GHz. Решения обратной задачи электродинамики, с учетом поправок к спектральным характеристикам квазиоптического резонатора из-за объемного теплового расширения и/или изменения диэлектрической проницаемости воздуха, позволяют определять температуру и/или проницаемость воздушного внешнего пространства на основе экспериментально измеренных резонансных частот резонатора с точностью 10 Hz.

Список литературы

- [1] Ильченко М.Е., Взятыйшев В.Ф., Гасанов Л.Г. и др. Диэлектрические резонаторы. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
- [2] Barannik A.A., Cherpak N.T., Prokopenko Yu.V. et al. // Measurement Science Technology. 2007. V. 18. N 6. P. 2231–2238.
- [3] Кириченко А.Я., Прокопенко Ю.В., Суворова О.А. и др. // Радиофизика и электроника. Сборник. Харьков: ИРЭ НАН Украины, 2009. Т. 14. № 3. С. 275–281.
- [4] Barannik A.A., Bunyaev S.A., Cherpak N.T. et al. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2010. V. 58. N 10. P. 2682–2691.
- [5] Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Шитилова И.А. и др. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 2. С. 102–111.
- [6] Derkach V.N., Filippov Yu.F., Plevako A.S. et al. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 2004. V. 25. N 1. P. 139–148.
- [7] Кириченко А.Я., Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Черпак Н.Т. Квазиоптические твердотельные резонаторы. Киев: Наук. думка, 2008. 286 с.
- [8] Бин Б.Р., Даттон Е.Д. Радиометеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 362 с.
- [9] Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. // Распространение радиоволн. М.: Наука, 1975. 368 с.
- [10] Горяинова А.В., Божков Г.К., Тихонова М.С. Фторопласты в машиностроении. М.: Машиностроение, 1971. 233 с.