

11

## Влияние величины зазора между дисками на добротность диэлектрического пластинчатого резонатора

© Г.В. Голубничая, А.Я. Кириченко, Е.В. Кривенко, В.И. Луценко

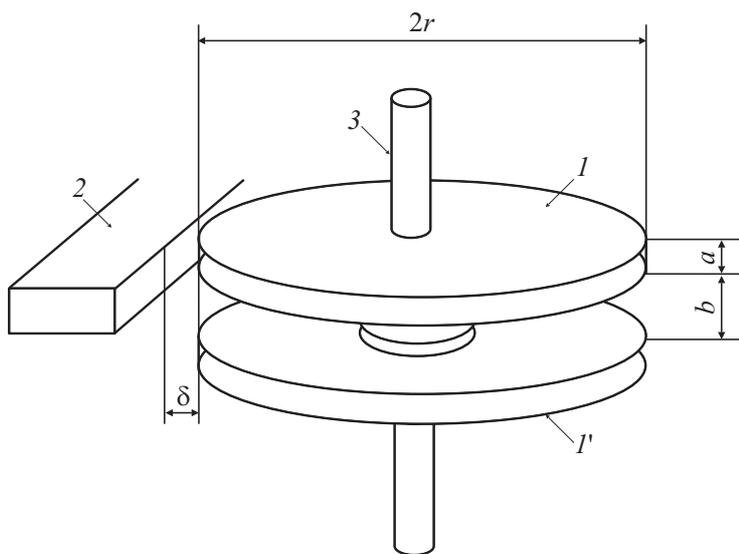
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины,  
Харьков  
E-mail: kharkovs@ire.kharkov.ua

Поступило в Редакцию 28 октября 2014 г.

Проведено исследование влияния расстояния между дисками диэлектрического пластинчатого резонатора с колебаниями „шепчущей галереи“ на величину добротности и сдвига частоты резонансной моды. Показано, что увеличение воздушного зазора между дисками приводит к повышению частоты  $f$  резонатора на выбранной моде колебаний и также может повышать добротность пластинчатого резонатора по сравнению с добротностью сплошного резонатора.

В середине 80-х годов прошлого века было заявлено и получено авторское свидетельство на оригинальную конструкцию диэлектрического резонатора — пластинчатый резонатор [1]. Важной особенностью такого резонатора явилась возможность повышения связи полей, сосредоточенных в диэлектрике, с окружающей средой, в которую он погружен. Это открывало, по мнению авторов, перспективу увеличения чувствительности резонатора как измерительной ячейки для исследования диэлектрической проницаемости жидких и газообразных сред, его окружающих. Однако ни в материалах описания авторского свидетельства, ни в публикации авторов [1] не приведено данных по добротности таких резонаторов, что весьма важно при их использовании в качестве измерительной ячейки диэлектрометра.

Проведенными нами предварительными экспериментальными исследованиями [2] было установлено, что при выбранной толщине пластин пластинчатого резонатора, изучаемого в [1,2], добротность его резко падает (иногда даже на порядок) по сравнению с добротностью монолитного, не разделенного на пластины дискового диэлектрического резонатора, имеющего такие же общие габариты. Такое снижение



**Рис. 1.** Пластинчатый диэлектрический резонатор:  $1, 1'$  — диэлектрические диски;  $2$  — возбуждающий диэлектрический волновод;  $3$  — диэлектрический скрепляющий стержень.

добротности обусловлено вносимыми в предлагаемый резонатор аксиальными неоднородностями (в форме воздушных зазоров) и, следовательно, дополнительными радиационными потерями. В данной работе проведены исследования влияния ширины воздушного промежутка между дисками на значение добротности пластинчатого дискового резонатора, состоящего из двух дисков.

В исследованиях использовались диэлектрические резонаторы, выполненные из пары дисков флана и поликора, а также из двух пар дисков плавленного кварца (кварцевый резонатор № 1 и кварцевый резонатор № 2), различающихся диаметром и толщиной (рис. 1). Диски  $1$  и  $1'$  разделены воздушным зазором  $b$ . Геометрические размеры и диэлектрические характеристики дисков приведены в таблице.

Диски имели центральное отверстие диаметром 6 мм, через которое пропускался диэлектрический стержень  $3$  с резьбой и прижимной гайкой для центрирования и скрепления в стопку. Зазор между

Геометрические размеры и диэлектрические характеристики дисков

Диэлектрик	Диаметр диска $2r$ , mm	Толщина диска $a$ , mm	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon'$	$\text{tg } \delta$
Флан	$20 \pm 0.1$	$1 \pm 0.03$	10	$1.5 \cdot 10^{-3}$
Поликор	$22 \pm 0.15$	$1.65 \pm 0.02$	9.6	$10^{-4}$
Кварц № 1	$28 \pm 0.2$	$1.75 \pm 0.03$	3.8	$2 \cdot 10^{-4}$
Кварц № 2	$23 \pm 0.15$	$1.5 \pm 0.05$	3.8	$2 \cdot 10^{-4}$

пластинами создавался с помощью набора круглых шайб толщиной от 0.1 до 0.5 mm, насаживаемых на крепежный стержень. Измерение амплитудно-частотной характеристики дисковых резонаторов осуществлялось в длинноволновой части миллиметрового диапазона волн с помощью измерителя коэффициента стоячей волны и ослабления типа Р2-65. Возбуждение резонаторов производилось на модах НЕ путем распределенной связи диэлектрического волновода 2, выполненного из фторопласта.

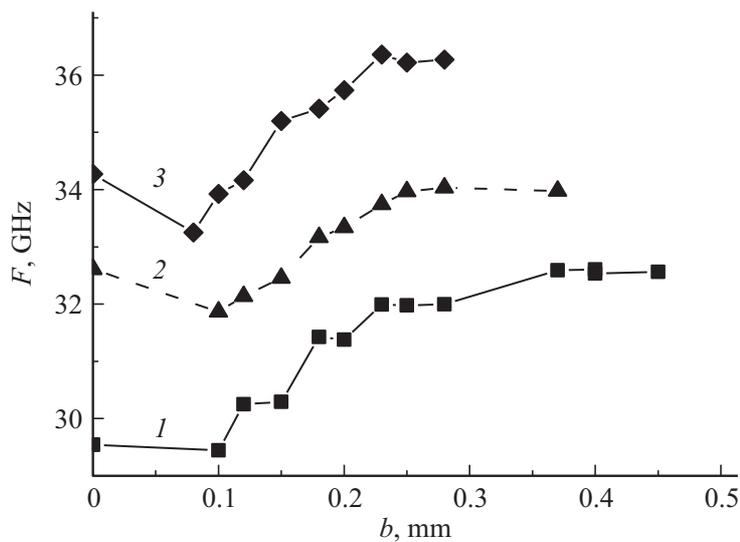
Объектом измерений служил пластинчатый резонатор, составленный из двух спаренных диэлектрических дисков, расстояние между которыми изменялось в процессе исследований. В отличие от предыдущих исследований пластинчатых резонаторов [1,2] толщина пластин была большей, и эксперименты производились на резонаторах, состоящих только из двух дисков. Диэлектрический резонатор такой формы при заполнении воздушной щели диэлектрическим материалом использовался как измерительная ячейка диэлектрометра, обладающая широкополосностью и в тоже время совмещающая в себе чувствительность и точность резонаторных систем [3,4].

Естественно, что воздушный зазор между дисками являлся аксиальной неоднородностью, вносящей радиационные потери энергии электромагнитных колебаний резонатора, что должно было приводить к снижению его добротности. Однако экспериментально полученные зависимости добротности  $Q$  от величины зазора  $b$  оказались более сложными. Увеличение воздушного зазора при постоянной толщине отдельных диэлектрических дисков приводит к увеличению аксиальной толщины резонатора и изменению его амплитудно-частотной харак-

теристики. Известно, что с ростом аксиальной толщины дискового резонатора частота выбранной резонансной моды должна снижаться [5]. Физику такого поведения частоты легко понять при использовании понятия эффективной диэлектрической постоянной, которая возрастает с увеличением толщины диэлектрического диска и достигает реального значения  $\epsilon'$  материала, когда толщина диска стремится к бесконечности, и снижается при стремлении толщины диска к нулю.

В отличие от этого увеличение толщины пластинчатого резонатора, сформированного из двух дисков, за счет увеличения воздушного зазора  $0 < b < 0.5 \text{ mm}$  между ними (при фиксированных размерах дисков, составляющих резонатор) приводит к повышению частоты  $f$  резонатора на выбранной моде колебаний на несколько гигагерц. При использовании представлений об эффективной диэлектрической проницаемости увеличение частоты можно объяснить снижением эффективного значения  $\epsilon$  при включении в резонатор воздуха, имеющего более низкое значение диэлектрической проницаемости по сравнению с диэлектрической проницаемостью диэлектрика, из которого изготовлены диски, и меньшим значением потерь, чем в материале диска. Такое поведение резонансной частоты на HE-моды колебаний диэлектрического дискового резонатора из флана, составленного из двух дисков, при изменении зазора  $b$  между спаренными дисками можно увидеть на рис. 2 для трех резонансных HE-мод. При этом общая толщина резонатора из флана при  $b = 0$  составляла  $\sim 2 \text{ mm}$ . Разброс экспериментальных точек резонансных частот связан с влиянием на измеряемую резонансную частоту выбранной HE-моды резонансных колебаний многочисленных мешающих мод, возникающих при изменении формы резонатора. Однако, за исключением изменения частоты резонатора при воздушном зазоре между дисками  $b < 0.1 \text{ mm}$ , общая тенденция изменения частоты при увеличении воздушного зазора  $b$  указывает на ее возрастание.

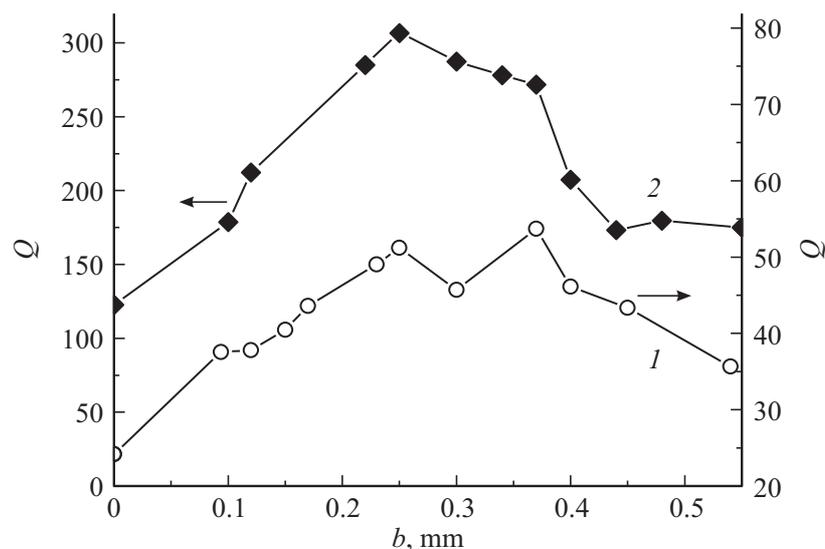
Еще более сильное влияние мешающие моды оказывают на измерение добротности резонатора на выбранной моде, что затрудняет ее измерение и зачастую может приводить к большим ошибкам получаемых результатов и низкой их повторяемости. Это влияние проявляется в искажении формы кривой резонанса, что требует многократных измерений добротности с учетом формы наблюдаемой резонансной кривой, которая может резко отличаться от лоренцевой при отдельных значениях  $b$ . Зависимости  $Q(b)$  для пластинчатого резонатора из флана



**Рис. 2.** Зависимости резонансных частот  $F$  пластинчатого диэлектрического резонатора из двух фланговых дисков от расстояния между дисками  $b$ . Частота резонанса  $F_0$  при  $b = 0$ , GHz: 1 — 29.6 ; 2 — 32.6; 3 — 34.3.

указывают на сложное поведение добротности от величины воздушного зазора. Однако во всех случаях существует тенденция к падению добротности резонатора при возрастании воздушного зазора  $b$ , но в интервале от  $0 < b < 0.1$  mm наблюдается скачкообразное повышение добротности. Кроме этого, можно заметить корреляцию в поведении кривых и при некоторых значениях зазора  $b$ .

Кривые изменения добротности для пластинчатого резонатора из поликора указывают на тенденцию возрастания (более чем в 6 раз) при увеличении зазора между дисками от  $b = 0$  до  $b = 0.5$  mm. Сравнения кривых при разных значениях прицельного расстояния  $\delta$  показали, что изменением связи диэлектрического волновода с резонатором не удастся ослабить влияние мешающих мод колебаний на зависимость  $Q(\delta)$ . Кривые 1 и 2 (рис. 3) показывают характер изменения добротности кварцевых резонаторов № 1 и 2 соответственно при изменении воздушного зазора  $0 < b < 0.5$  mm. На зависимости, полученной для



**Рис. 3.** Зависимости добротностей  $Q$  пластинчатых диэлектрических резонаторов, изготовленных из плавленного кварца (кривая 1 — резонатор № 1, кривая 2 — резонатор № 2), от расстояния между дисками  $b$ .

резонатора № 1, наблюдается максимальное значение добротности в области  $0.25 < b < 0.35$  мм.

Результаты измерения добротности резонаторов, изготовленных из плавленного кварца приведены на рис. 3. Кривая 2 для кварцевого резонатора № 2 достигает максимума добротности ( $Q \sim 300$ ) при воздушном зазоре между дисками  $b \sim 0.25$  мм. В обоих кварцевых резонаторах наблюдается повышение добротности резонатора при  $b = 0.25$  мм примерно в несколько раз по сравнению с резонатором при  $b = 0$ . Видно, что величина добротности резонатора № 2 имеет большее значение как при  $b = 0$ , так и при  $b \sim 0.25$  мм. Это связано с более тщательной полировкой как плоской, так и криволинейной поверхности кварцевых дисков резонатора № 2, что и обеспечило более высокое значение добротности  $Q$ , этого резонатора при  $b \sim 0.25$  мм по сравнению с кварцевым резонатором № 1.

Приведенные результаты по измерению добротности пластинчатых дисковых резонаторов при изменении величины воздушного зазора между дисками указывают на противоборство двух тенденций, обуславливающее результирующую величину добротности в таких резонаторах. Первая тенденция определяется появлением в дисковом резонаторе аксиальной неоднородности, приводящей к радиационным потерям, которые возрастают с ростом величины воздушного зазора. Вторая тенденция связана с интегральными резистивными потерями в материале составного резонатора, которые могут снижаться за счет меньшего поглощения электромагнитных полей в воздухе по сравнению с потерями в диэлектрическом материале исследуемых дисков. Смещение максимумов добротности в измерениях пластинчатых резонаторов, выполненных из различных диэлектрических материалов, можно объяснить максимальной компенсацией радиационных потерь, вызванных воздушной щелью, и собственных потерь в материалах „нулевыми“ потерями воздушной среды. Величина смещения будет зависеть от величины собственных потерь в материале диэлектрика резонатора. Так более высокие значения собственных потерь во флане возможно скомпенсировать лишь при малой ширине при  $b \sim 0.1 \text{ mm}$  воздушного зазора. Увеличение последнего приводит к возрастанию радиационных потерь. Более низкие значения собственных потерь в материале дисков из кварца и тем более из поликора позволяют достичь компенсации их, а также и радиационных потерь в воздушном зазоре при больших величинах зазора, несмотря на рост радиационных потерь с ростом  $b$ .

Таким образом, аксиальные неоднородности в дисковом резонаторе в виде воздушного зазора между отдельными дисками, превращающие его в пластинчатый резонатор, могут повышать добротность пластинчатого резонатора по сравнению с добротностью дискового резонатора с  $b = 0$ . При этом существует величина воздушного зазора  $b$ , при которой наблюдается максимальное значение добротности.

Авторы выражают благодарность О.Т. Николову и Г.П. Ермаку за помощь в проведении исследований.

## Список литературы

- [1] Добромыслов В. С., Береза А.Е. Особенности собственных колебаний пластинчатых диэлектрических резонаторов. // Научные труды Московского энергетического института . Межвузовский тематический сборник. М., 1984. № 48. С. 38–44.
- [2] Кириченко А.Я., Голубничая Г.В., Максимчук И.Г. и др. // Радиофизика и электроника. 2013. Т. 4(18). № 2. С. 91–95.
- [3] Annino G., Bertolini D., Fittipald M. et al. // J. Chemical Physics. 2000. V. 112. N 5. P. 2308–2314.
- [4] Egorov V.N., Masalovi V.L., Nefyedov Yu.A. et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. V. 53. N 2. P. 627–635.
- [5] Кириченко А.Я., Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Черняк Н.Т. Квазиоптические твердотельные резонаторы. Киев: Наук. думка, 2008. 286 с.