

А. Я. Кириченко, Г. В. Голубничая, И. Г. Максимчук, В. Б. Юрченко
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
 12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
 E-mail: kharkovs@ire.kharkov.ua

ДОБРОТНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Несмотря на широкое изучение электродинамических свойств диэлектрических резонаторов, до настоящего времени отсутствуют сведения о добротности одного из видов квазиоптических дисковых резонаторов – пластинчатых резонаторов, изготовленных из тонких дисковых пластин с промежутками между пластинами. Это препятствует применению указанных резонаторов для измерения электрических характеристик веществ, окружающих такой резонатор, с которыми вследствие своей конструкции резонатор имеет повышенную связь. Настоящие исследования направлены на устранение этого пробела. Трудности теоретического расчета добротности пластинчатых резонаторов, обусловленные их сложной геометрической формой, заставляют отдать предпочтение экспериментальному изучению моделей таких резонаторов. В данной работе впервые прямыми экспериментальными методами изучены добротность и эффективность возбуждения дисковых пластинчатых резонаторов в зависимости от количества пластин и от ширины воздушного промежутка между пластинами. Найдено минимальное количество пластин, необходимое для возбуждения резонатора, и ширина воздушного промежутка, при котором достигается максимальное значение добротности. Исследования проведены на резонаторах с большим ($n \sim 50$ в случае дисков из плавленого кварца) и меньшим значением азимутального индекса ($n < 20$ для дисков из поликора). Показано, что в обоих случаях добротность пластинчатых резонаторов снижается на порядок по сравнению с добротностью сплошных дисковых диэлектрических резонаторов, выполненных из того же материала, в которых при одинаковых внешних размерах отсутствует неоднородность в аксиальном направлении в форме промежутков между отдельными дисковыми пластинами. Ил. 6. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: диэлектрический резонатор, шепчущая галерея, пластинчатый резонатор, добротность.

Специалисты, работающие в микроволновой области, в последние годы обратили внимание на уникальные свойства квазиоптических диэлектрических резонансных систем при возбуждении в них высших азимутальных мод, получивших название колебания шепчущей галереи. Такие резонаторы применяются для стабилизации частоты автогенераторов, при создании частотных фильтров, измерительных ячеек диэлектрометров и т. п. В первую очередь исследователей электродинамических особенностей этих резонаторов привлекли возможности достижения высоких добротностей таких структур. Так в резонаторе, изготовленном из сапфира в форме диска, в микроволновом диапазоне при комнатной температуре были достигнуты добротности $\sim 10^5$, а при температуре 77 К добротность составила 10^7 [1, 2].

При исследовании высокодобротных диэлектрических резонаторов было обращено внимание на то, что они являются открытыми к окружающему пространству, и хотя основная часть электромагнитной энергии сосредоточена в объеме диэлектрика, часть ее находится во внешнем пространстве. В результате этого электродинамические свойства таких резонаторов заметно зависят от характеристик окружающей среды. Эта особенность определила интерес исследователей к этим системам с целью использования их для изучения электрических характеристик пространства, окружающего резонатор [3].

Относительное повышение энергии поля во внешнем пространстве по сравнению с энергией, сконцентрированной внутри диэлектрика, в таких резонаторах можно достичь путем сниже-

ния их добротности при переходе на более низкие значения азимутального индекса n возбуждаемых мод или выбирая диэлектрический материал с меньшим значением диэлектрической постоянной. Более привлекательным может быть использование пластинчатых диэлектрических резонаторов при возбуждении в них колебаний с высоким индексом азимутальных мод, предложенных специалистами МЭИ [4].

Пластинчатый диэлектрический резонатор реализуется в виде набора тонких диэлектрических дисков (называемых элементарными) толщиной a , собранных соосно в стопку и разделенных воздушными промежутками шириной b . Поперечное сечение резонатора имеет вид гребенчатой структуры (см. вставку на рис. 1).

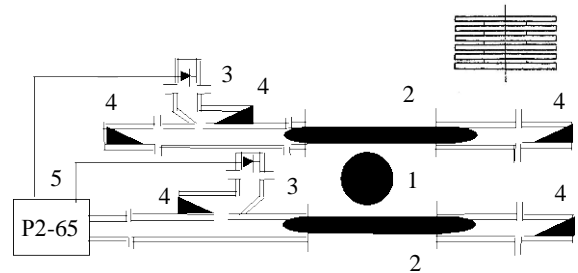


Рис. 1. Схема измерительного стенда: 1 – диэлектрический резонатор; 2 – диэлектрические волноводы; 3 – направленный ответвитель; 4 – согласованная нагрузка; 5 – измеритель коэффициента стоячей волны

Воздушный промежуток между отдельными элементарными дисками должен обеспечивать связь полей между ними, а толщина отдель-

ного тонкого диска должна быть значительно меньше длины электромагнитной волны мод возбуждаемых колебаний. Однако к настоящему времени сведения об измерении добротностей пластинчатых диэлектрических резонаторов в литературе отсутствуют, поэтому целью настоящей работы является частичное заполнение этого пробела путем проведения экспериментальных исследований добротности и эффективности возбуждения колебаний шепчущей галереи в пластинчатых диэлектрических резонаторах.

1. Особенности проведения экспериментов. В проводимых опытах пластинчатые диэлектрические резонаторы набирались из тонких диэлектрических дисков, соосно накладываемых друг на друга, с воздушными промежутками между ними. Воздушные промежутки между диэлектрическими дисками создавались с помощью дисков меньшего размера, располагаемых соосно с основными диэлектрическими дисками, практически не влияя на поля шепчущей галереи резонатора. Количество диэлектрических дисков и воздушный зазор между ними изменялись в процессе исследований. Диски имели центральные отверстия, через которое пропускался металлический стержень с резьбой и прижимной гайкой, с помощью которого диски центрировались и скреплялись.

В проводимых экспериментальных исследованиях возбуждение резонаторов осуществлялось с помощью связи с диэлектрическими волноводами, выполненными из фторопласта и имеющими поперечное сечение $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$. Резонатор размещался между двумя волноводами, согласованными на концах, благодаря чему осуществлялся режим возбуждения резонатора с прохождением волны через него (см. рис. 1).

Расстояния Δ , так называемые прицельные расстояния, между резонатором и волноводом, возбуждающим резонатор, с одной стороны, и резонатором и волноводом, осуществляющим прием сигнала, прошедшего через резонатор, с другой стороны, были одинаковыми. В процессе измерений эти расстояния можно было изменять. С помощью поворота волновода вокруг собственной оси на 90° существовала возможность преимущественного возбуждения резонатора на EH - или HE -модах колебаний шепчущей галереи. Так как в работе [4] было установлено, что для HE -колебаний величина запаса электромагнитной энергии в воздушном промежутке между тонкими диэлектрическими пластинами относительно больше энергии, концентрируемой в этом промежутке в случае возбуждения колебаний EH -мод, исследовались в основном (как и в сообщении [5]) особенности колебаний HE -мод. Анализ сигнала, прошедшего через резонатор, выполнялся с помощью измерителя коэффициента стоячей волны и ослаблений P2-65.

Важной особенностью экспериментов было использование элементарных диэлектрических дисков резонатора с такими геометрическими размерами, в которых из-за значительно превосходящих по площади поверхностей, принадлежащих основаниям цилиндра, по сравнению с площадью его боковой поверхности, наблюдались высокие радиационные потери с плоских оснований цилиндра. Из-за этого в элементарном диске не удастся скомпенсировать потери энергии из плоских оснований диска энергией, подводимой возбуждаемыми элементами, вследствие чего невозможно эффективно возбудить азимутальные колебания высшего порядка. В опытах использовались резонаторы, выполненные из поликора ($\epsilon' \sim 9,6$) и плавленого кварца ($\epsilon' \sim 4,1$). Для расширения возможностей исследования резонаторы возбуждались в одном и том же частотном диапазоне $26,0 \text{ ГГц} < f < 38,0 \text{ ГГц}$. При этом в резонаторе из поликора возбуждались моды с низким значением азимутального индекса $n < 20$, а в кварцевых – при высоких значениях $n \sim 50$. В опытах при создании диэлектрического пластинчатого резонатора использовались тонкие диски толщиной $a = 0,5 \text{ мм}$, выполненные из поликора диаметром $2r = 22 \text{ мм}$ и из плавленого кварца аналогичной толщины но большего диаметра $2r = 75 \text{ мм}$.

2. Стопка из диэлектрических пластин без воздушного промежутка. При выбранной толщине дисков ($a = 0,5 \text{ мм}$) возбуждение мод шепчущей галереи не происходило ни в одиночном диске, ни в стопке из двух дисков без воздушного зазора. Амплитудно-частотная характеристика с резонансами мод шепчущей галереи наблюдалась только в резонаторе, созданном на основе стопки из не менее трех элементарных поликоровых дисков без воздушного зазора на HE -мод. При этом формат резонатора достигал $\Phi = r/L \sim 7,5$ (L – общая толщина диска, набранного из элементарных дисков). Прицельное расстояние Δ от цилиндрической поверхности до волноводов равнялось $\Delta = 2,3 \text{ мм}$. Добротность резонатора достигала только лишь $Q \sim 25$. При постепенном увеличении количества элементарных дисков в стопке добротность резонатора возрастала от $Q \sim 100$ при четырех дисках ($L \sim 2 \text{ мм}$) до $Q \sim 200$ в стопке из восьми элементарных дисков ($L \sim 4 \text{ мм}$). Увеличение прицельного расстояния Δ сопровождалось некоторым возрастанием добротности и заметным снижением амплитуды возбуждаемых мод.

На рис. 2 представлены амплитудно-частотные зависимости поликорового резонатора, выполненного без воздушных зазоров из трех ($L \sim 1,5 \text{ мм}$) (сплошная кривая) и семи ($L \sim 3,5 \text{ мм}$) пластин (пунктирная кривая). Видно, что при меньшей толщине резонатора ($L \sim 1,5 \text{ мм}$) в низко-

частотной части рассматриваемого диапазона частот заметных резонансов не наблюдается.

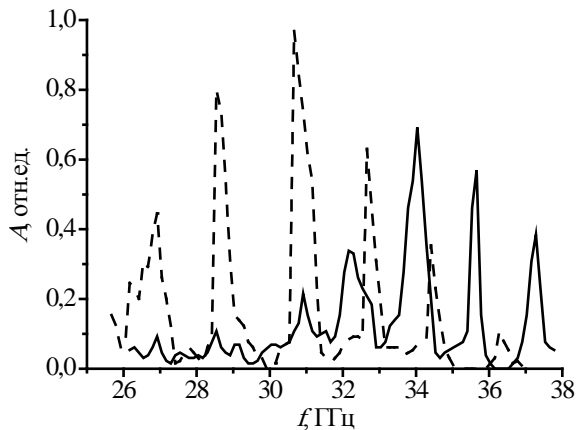


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика колебаний HE-моды для диска из поликора толщиной $L = 1,56$ мм (сплошная кривая) и $L = 3,5$ мм (пунктирная кривая)

Формат элементарного диска, выполненного из плавленного кварца $\Phi = r/a = 75$ ($a = 0,5$ мм; $2r = 75$ мм), был достаточно большим по сравнению с форматом $3 < \Phi < 10$, обычно используемым для дисковых квазиоптических диэлектрических резонаторов. Один элементарный кварцевый диск также не удалось возбудить, как и элементарный диск из поликора. Удалось возбудить лишь дисковый резонатор, выполненный в виде стопки из трех кварцевых дисков ($L \sim 1,5$ мм). Амплитудно-частотная характеристика кварцевого резонатора приведена на рис. 3.

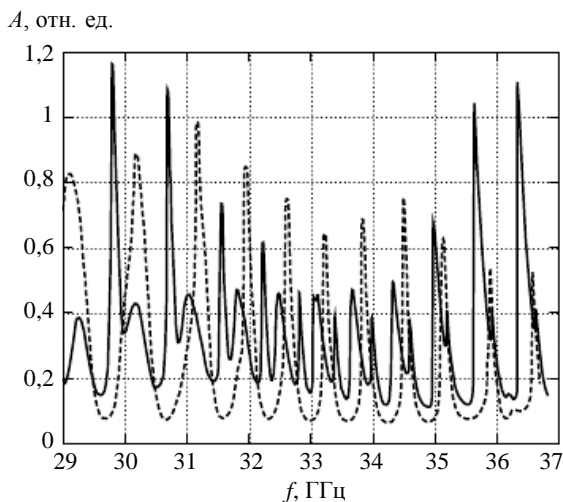


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика колебаний для диска из кварца, выполненного из пяти элементарных дисков $L = 2,60$ мм (пунктирная кривая) и из шести элементарных дисков $L = 3,12$ мм (сплошная кривая) без воздушных промежутков

Пунктирной кривой показана характеристика резонатора, выполненного в виде стопки из

пяти элементарных дисков ($L \sim 2,5$ мм) без воздушных зазоров, сплошной кривой – из шести ($L \sim 3$ мм). При увеличении количества элементарных дисков амплитуда колебаний несколько возрастает, увеличивается немного и резонансная частота для фиксированного азимутального индекса моды. Добротность резонатора из кварцевых пластин достигает нескольких тысяч, азимутальный индекс возбуждаемых мод $n \sim 50$, а амплитуды паразитных мод в резонаторе из пяти элементарных дисков проявляются незначительно. В резонаторе, созданном из шести элементарных дисков, наблюдаются резонансы паразитной моды, ввиду чего в средней части частотного диапазона (31...35 ГГц) наблюдается заметное снижение амплитуды наблюдаемых резонансов.

3. Особенности возбуждения пластинчатых резонаторов. Амплитудно-частотные зависимости пластинчатого резонатора, созданного на базе восьми поликорových дисков с воздушным зазором между дисками $b = 0,12$ мм, при вариации величины связи волноводов с резонатором для трех значений прицельного расстояния Δ показаны на рис. 4.

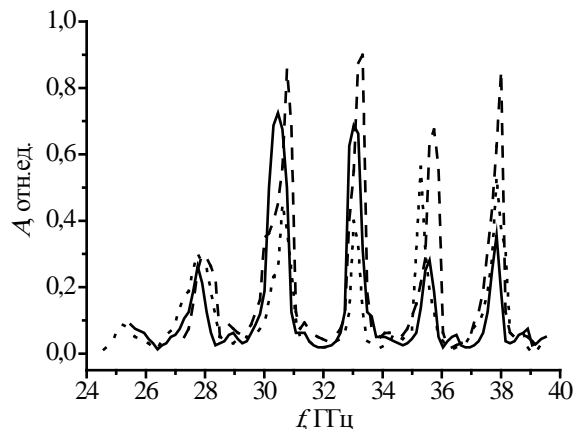


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика колебаний HE-моды пластинчатого резонатора из поликорových дисков с воздушными промежутками ($b = 0,12$ мм) для разных прицельных расстояний: — — 0,25 мм; - - - - 1,75 мм; — 3,3 мм

Максимальная амплитуда колебаний достигается при прицельном расстоянии $\Delta = 1,75$ мм. Это расстояние заметно меньше прицельного расстояния, используемого для возбуждения того же количества элементарных дисков, собранных в стопку без воздушного зазора. При большем и меньшем значениях прицельного расстояния наблюдается снижение амплитуды в резонансе. Это связано с тем, что при уменьшении Δ до 0,25 мм возрастают радиационные потери на неоднородности в виде элемента связи волновода с резонатором (сверхкритическая связь); увеличение расстояния Δ до 3,3 мм ослабляет связь волновода с резонатором (докритическая связь). Добротность резонатора при уменьшении связи постоянно возрастает.

Зависимость добротности Q пластинчатого резонатора от величины воздушного зазора b между элементарными дисками имеет немонотонный характер. Результаты изучения этого влияния для резонатора из поликора представлены на рис. 5. Сплошной кривой приведены результаты измерений, полученные для прицельного расстояния $\Delta = 2,3$ мм, пунктирной – для меньшего прицельного расстояния $\Delta = 0,25$ мм. Наибольшего значения Q для большого и малого прицельных расстояний достигает при величине воздушного зазора $b \sim 0,2$ мм. По результатам исследований [4] при этой величине зазора ($b/a = 0,4$) запас электромагнитной энергии в диэлектрике примерно равен запасу энергии во внешней среде.

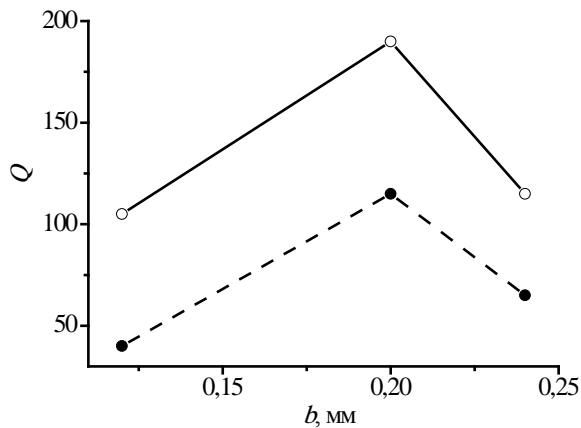


Рис. 5. Зависимость добротности пластинчатого резонатора от величины воздушного зазора b между элементарными дисками. Сплошная кривая – прицельное расстояние $\Delta = 2,3$ мм, пунктирная – $\Delta = 0,25$ мм

При уменьшении воздушных зазоров ниже оптимального значения ($b < 0,2$ мм) снижение добротности связано с увеличением усредненных собственных потерь в материале резонатора (роль воздушных промежутков снижается), а увеличение зазора ($b > 0,2$ мм) приводит к снижению связей электромагнитных полей отдельных элементарных дисков. Наибольшая добротность ($Q \sim 260$) в исследованиях обнаружена при большом прицельном расстоянии $\Delta = 3,5$ мм и при воздушном зазоре между элементарными дисками $b = 0,12$ мм.

Пластинчатый резонатор из кварца использовался с целью перехода на более высокие азимутальные моды колебаний. Увеличенный диаметр элементарных дисков по сравнению с резонаторами из поликора позволяет получить добротность в несколько тысяч при отсутствии воздушного промежутка между элементарными дисками, что дало возможность увеличить воздушный зазор между дисками до $b = a \sim 0,5$ мм. При этом запас энергии в воздушном зазоре возрос до ~ 90 % от полной электромагнитной энергии поля, сосредоточенного в резонаторе. Это привело к существенному снижению добротности

пластинчатого резонатора до $Q \sim 200$, а амплитуда колебаний снизилась на 15 дБ по сравнению с колебаниями в резонаторе при отсутствии воздушного зазора между дисками. Для эффективного возбуждения в нем мод шепчущей галереи расстояние между цилиндрической поверхностью резонатора и поверхностью возбуждающего волновода необходимо было уменьшить до $\Delta \sim 0,5$ мм. При $\Delta > 0,5$ мм возбудить колебания в резонаторе не удалось. Амплитудно-частотная характеристика пластинчатого резонатора, выполненного из пяти (пунктирная кривая) и шести кварцевых дисков (сплошная кривая), приведена на рис. 6.

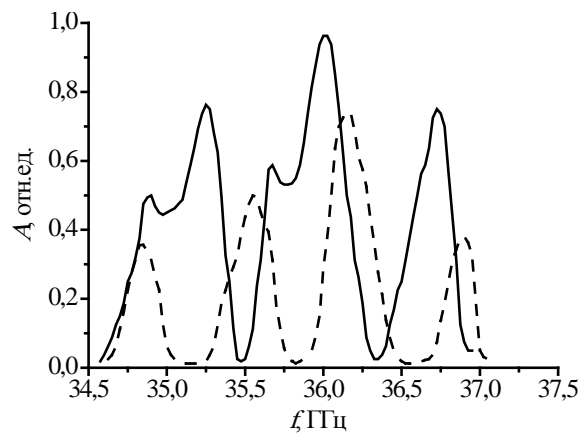


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика колебаний пластинчатого резонатора из кварца, выполненного из пяти элементарных дисков (пунктирная кривая) и из шести элементарных дисков (сплошная кривая) с воздушными промежутками $b = 0,5$ мм

В пластинчатом резонаторе из шести пластин паразитные моды сильно исказили резонансные кривые, хотя амплитуда их была выше амплитуд колебаний, возбуждаемых в резонаторе из пяти дисков. Исходя из ширины резонансной кривой на частоте $f = 36,107$ ГГц порядка 300 МГц и учитывая то, что частотный сдвиг можно четко фиксировать при смещении резонансной частоты на четверть ее ширины ~ 75 МГц, это значение является предельным значением чувствительности резонатора к внешним воздействиям окружающей среды.

Выводы. Проведенными исследованиями показано, что тонкие дисковые резонаторы удается возбудить только в том случае, когда толщина диска превышает некое пороговое значение. При исследовании пластинчатых резонаторов, составленных из некоторого количества тонких дисков с воздушными промежутками, показано, что их добротность не сильно отличается от добротности резонатора с таким же количеством элементарных дисков, не разделенных воздушным промежутком в тех случаях, когда запас энергии, сосредоточенной в воздушном промежутке составлял не более ~ 50 % от полного запаса энергии в резонаторе при невысоком азиму-

тальном индексе азимутальных колебаний n . При увеличении запаса энергии в воздушных промежутках между элементарными дисками до ~90 % добротность пластинчатого резонатора снижается примерно на порядок. Такое снижение наблюдается даже при повышенном значении исходной добротности ($Q > 1\,000$) дискового резонатора без воздушных промежутков между элементарными дисками при том же количестве дисков. Предельная чувствительность изученных пластинчатых резонаторов в исследованном диапазоне частот 26...38 ГГц к изменению диэлектрических характеристик внешней среды по смещению резонансной частоты составляет около 75 МГц.

Авторы выражают благодарность В. В. Курузову и М. Н. Ольховскому за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при частичном финансировании по договору №ДЗ/467-2011 с Держинформнаукой Украины.

Библиографический список

1. *Диэлектрические резонаторы* / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыешев, Л. Г. Гасанов и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. *Квазиоптические твердотельные резонаторы* / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – К.: Наук. думка, 2008. – 286 с.
3. *Dielectric properties of materials using whispering gallery dielectric resonators: Experiments and perspectives of ultrawideband characterization* / G. Annino, D. Bertolini, M. Cassettari et al. // *J. of Chemical Phys.* – 2000. – 112, N 5. – С. 2308–2314.
4. *Добромыслов В. С. Особенности собственных колебаний пластинчатых диэлектрических резонаторов* / В. С. Добромыслов, А. Е. Береза // *Тр. Москов. энергетич. ин-та.* – № 48. – М., 1984. – С. 38–44.
5. *Голубничая Г. В. Эффективность возбуждения и добротность колебаний пластинчатых дисковых диэлектрических резонаторов* / Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко // 22 Междунар. Крым. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'12): тез. докл. – Севастополь, 2012. – Т. 1. – С. 583–584.

Рукопись поступила 13.12.2012 г.

A. Ya. Kirichenko, G. V. Golubnichaya,
I. G. Maximchuk, V. B. Yurchenko

Q-FACTOR AND EXCITATION EFFICIENCY OF LAMINAR QUASIOPTICAL DIELECTRIC RESONATORS

In spite of widely studied electrodynamic properties of dielectric resonators, nowadays there is no information about Q -factors of laminar resonators, a kind of quasioptical dielectric

resonators assembled as a set of coaxial disk laminae with certain inter-lamina spacings. The lack of the data prevents us from using the resonators for measuring electric characteristics of surrounding substances which, due to the resonator design, have an enhanced coupling to the resonator. Current research is aimed at filling this gap in our knowledge. Difficulties in theoretical calculation of Q -factors of laminar resonators caused by their complicated shape force us to prefer experimental methods in our research. In this work, Q -factors and excitation efficiency of laminar resonators are measured for the first time as functions of the number of laminae in use and of inter-lamina spacings. A minimum number of laminae needed for the excitation and an optimal spacing for supplying a maximum Q -factor have been found. The research has been carried out for resonators of large azimuthal index ($n \sim 50$ for the fused quartz disks) and of lower one ($n < 20$ for the alumina disks). It is shown that in both cases Q -factors of laminar resonators are about ten times lower if compared to the ordinary disk resonators of the same size and material, which remain uniform in the axial direction and do not contain inter-lamina spacings.

Key words: dielectric resonator, whispering gallery, laminar resonator, Q -factor.

О. Я. Кириченко, Г. В. Голубничая,
И. Г. Максимчук, В. Б. Юрченко

ДОБРОТНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗБУДЖЕННЯ ПЛАСТИНЧАСТИХ КВАЗІОПТИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ

Незважаючи на широке вивчення електродинамічних властивостей діелектричних резонаторів, на теперішній час відсутні відомості про добротність однієї з форм дискових квазіоптичних резонаторів – пластинчатих резонаторів, виготовлених із тонких дискових пластин з проміжками між пластинами. Це заважає використанню таких резонаторів для вимірювання електричних характеристик речовин, що оточують резонатор, з якими він завдяки своїй будові має підвищений зв'язок. Такі дослідження спрямовані на усунення цієї проблеми. Труднощі теоретичного розрахунку добротності пластинчатих резонаторів, зумовлені їх складною геометричною формою, змушують надати перевагу експериментальним дослідженням моделей таких резонаторів. У роботі вперше прямими експериментальними методами вивчено добротність та ефективність збудження дискових пластинчатих резонаторів в залежності від кількості пластин та ширини повітряного проміжку між пластинами. Знайдено мінімальну кількість пластин, необхідну для збудження резонатора, та ширину повітряного проміжку, при якому досягається найбільша добротність. Дослідження проведені на резонаторах з високим значенням азимутального індексу ($n \sim 50$ для дисків із плавленого кварцу) і зменшеним значенням ($n < 20$ для дисків із полікору). Показано, що в обох випадках добротність пластинчатих резонаторів знижується на порядок в порівнянні з добротністю суцільних дискових діелектричних резонаторів, виконаних із того ж матеріалу, в яких при однакових зовнішніх розмірах відсутня неоднорідність в аксіальному напрямку у формі проміжків між окремими дисковими пластинами.

Ключові слова: діелектричний резонатор, шепочуча галерея, добротність.