

А. Е. Когут¹, Р. С. Доля¹, С. О. Носатюк¹, Е. А. Шульга¹, Хе Джаочан²

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины,
Харьков, Украина

²Восточно-Китайский НИИ «Фотозлектроника», Уху, Китай

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В ДИСКОВОМ ПЛАНАРНОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ ЩЕЛЬЮ СВЯЗИ

Аннотация. Исследованы спектральные и энергетические характеристики дискового планарного диэлектрического резонатора (ДР), возбуждаемого на модах высших порядков типа шепчущей галереи (ШГ) в 8-миллиметровом диапазоне длин волн. Диаметр планарного ДР составлял несколько длин волн в материале диэлектрика, а его высота была много меньше длины волны. Диэлектрический диск располагался плоскими основаниями между двумя проводящими зеркалами. Таким образом, электромагнитное поле резонатора ограничивалось по высоте планарного диска двумя проводящими поверхностями. Резонансные свойства такой структуры определялись условием полного внутреннего отражения волн от криволинейной поверхности диэлектрического диска.

Предложен способ эффективного возбуждения мод ШГ в дисковом планарном ДР – щелью связи в металлическом зеркале резонатора. Показано, что при таком способе возбуждения достигается режим запердельной связи с планарным ДР. При этом модовый спектр такого резонатора относительно разрежен. Установлено, что добротность планарного ДР в основном определяется потерями в его диэлектрическом материале и омическими потерями в металлических зеркалах, поскольку радиационные потери при соответствующем соотношении длины волны и диаметра диэлектрического диска могут быть незначительны. Для диска высотой 1 мм, диаметром 78 мм, изготовленного из фторопласта-4 и расположенного между латунными зеркалами, добротность планарного ДР может достигать 1500 на высокочастотном краю 8-миллиметрового диапазона длин волн.

Выработаны рекомендации относительно повышения добротности планарных диэлектрических резонаторов и по уменьшению их размеров.

Ключевые слова: дисковый планарный диэлектрический резонатор, моды шепчущей галереи, запердельная связь, добротность, 8-миллиметровый диапазон

Для цитирования. Возбуждение колебаний шепчущей галереи в дисковом планарном диэлектрическом резонаторе щелью связи / А. Е. Когут [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 3. – С. 110–117.

A. Ye. Kogut¹, R. S. Dolia¹, S. O. Nosatiuk¹, Ye. A. Shulha¹, He Jaochan²

¹O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine

²Eastern-Chinese Institute "Photoelectronics", Wuhu, China

EXCITATION OF WHISPERING GALLERY MODES IN A DISK PLANAR DIELECTRIC RESONATOR BY A COUPLING SLOT

Abstract. The spectral and energy characteristics of disk planar dielectric resonator (DR) with high-order whispering gallery modes (WGMs) were investigated in Ka-band. The diameter of the planar DR was several wavelengths in the dielectric material, and its height was much smaller than the wavelength. The dielectric disk was placed by flat bases between two conducting mirrors. Thus, electromagnetic field of the resonator was limited by the height of the planar disk by two conducting surfaces. The resonant properties of such structure were determined by the condition of total internal reflection of the waves from the curved surface of the dielectric disk.

A method of effective excitation of WGMs in the planar DR by the coupling slot in the metal mirror was proposed. It is shown that with this excitation method, a regime of supercritical coupling with planar DR is achieved. In this case, the mode spectrum of such a resonator is rarefied relatively. It is established that the Q-factor of a planar DR is mainly determined by the losses in its dielectric material and by the ohmic losses in metallic mirrors, since the radiation losses at a necessary ratio of the wavelength and the diameter of the dielectric disk can be small. For a disk made of teflon with a height of 1 mm, a diameter of 78 mm, located between brass mirrors, the Q-factor of the planar DR can reach 1500 at the high-frequency edge of the Ka-band.

The recommendations for increasing of Q-factor of the planar DRs and reducing their dimensions are proposed.

Keywords: disk planar dielectric resonator, whispering gallery modes, supercritical coupling, Q-factor, Ka-band

For citation. Kogut A. Ye., Dolia R. S., Nosatiuk S. O., Shulha Ye. A., He Jaochan. Excitation of whispering gallery modes in a disk planar dielectric resonator by a coupling slot. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 3, pp. 110–117 (in Russian).

Введение. Исследованию открытых диэлектрических резонаторов (ДР) с азимутальными колебаниями типа шепчущей галереи (ШГ) в настоящее время посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ, которые обобщены в [1–3]. Такие резонаторы, выполненные в форме диска или кольца, обладают в миллиметровом диапазоне длин волн неоспоримыми преимуществами, среди которых выделяются высокая добротность и разреженный спектр колебаний. На данный момент такие резонаторы нашли применение в различных активных и пассивных устройствах миллиметрового диапазона. На основе ДР с колебаниями ШГ созданы генераторы и сумматоры мощности, фильтры и устройства для исследования электрофизических свойств твердых и жидких материалов (диэлектриков, полупроводников и высокотемпературных сверхпроводников).

Однако к недостаткам таких резонаторов следует отнести их значительные габариты. ДР создаются исходя из принципов квазиоптики. Диаметр диэлектрических дисков, как правило, существенно превосходит длину волны в материале диэлектрика $D \geq 10 \lambda_d$, а высота близка к длине волны $h \approx \lambda_d$. Уменьшение диаметра ДР приводит к снижению добротности за счет роста радиационных потерь при излучении резонансного поля со стороны криволинейной поверхности резонаторов. При уменьшении высоты резонаторов их добротность также ухудшается за счет радиационных потерь со стороны плоских оснований. В работе [4] показано, что пороговым (минимальным) значением высоты ДР, позволяющим возбуждать в них колебания ШГ, является величина $h \approx \lambda_d/2$.

Одним из решений данной проблемы является переход к планарным диэлектрическим структурам, расположенным плоскими основаниями между двумя проводящими поверхностями. Термин «планарность» в научной литературе использован для описания электродинамических структур, один из геометрических размеров которых значительно меньше длины волны в них. Планарные ДР, выполненные в форме дисков (колец), характеризуются высотой, которая существенно меньше длины волны $h \ll \lambda_d$. Благодаря наличию проводящих поверхностей поле колебаний «удерживается» внутри материала диэлектрика, а резонансные свойства таких диэлектрических структур определяются полным внутренним отражением волн от их криволинейной поверхности. В теоретических работах [5, 6] проведены численные исследования дисковых и кольцевых планарных ДР с колебаниями ШГ. Получены дисперсионные выражения и выражения, определяющие пороговые значения высот таких резонаторов для широкого диапазона длин волн: от оптического до миллиметрового.

Наибольшее распространение планарные ДР получили в субмиллиметровом диапазоне длин волн [7, 8]. Изучены спектральные характеристики и распределения полей колебаний ШГ, возбуждаемых в диапазоне длин волн 480–5600 нм. Имеются данные об исследованиях планарных ДР с колебаниями ШГ в СВЧ диапазоне. Так, в работе [9] показано, что планарный резонатор, изготовленный из керамики по ЛТСС-технологии, обладает добротностью, равной 1000. Имеются данные об исследованиях ДР с малым радиусом и высотой, превышающей длину волны в материале диэлектрика, проведенных в 8-миллиметровом диапазоне длин волн [10]. Показано, что при использовании материалов с высоким значением диэлектрической постоянной и малыми потерями (УВЕ-керамика) добротность таких резонаторов может достигать 5000. Однако данные об экспериментальных исследованиях планарных ДР миллиметрового диапазона длин волн, высота которых существенно меньше длины волны, в научной литературе отсутствуют. По-видимому, это связано с трудностями возбуждения колебаний ШГ в ДР, высота которых значительно меньше длины волны. Такое предположение вытекает из анализа способов возбуждения классических дисковых ДР. Большинство известных способов возбуждения основано на расположении источника волн (открытый конец металлического волновода или одна из стенок открытого диэлектрического волновода) в непосредственной близости от криволинейной поверхности ДР. Для планарных ДР такие способы возбуждения практически не реализуемы.

В данной работе предложен один из способов эффективного возбуждения колебаний ШГ в планарных ДР в 8-миллиметровом диапазоне длин волн. Экспериментально и путем компьютерного моделирования исследованы спектральные и энергетические характеристики дискового планарного ДР.

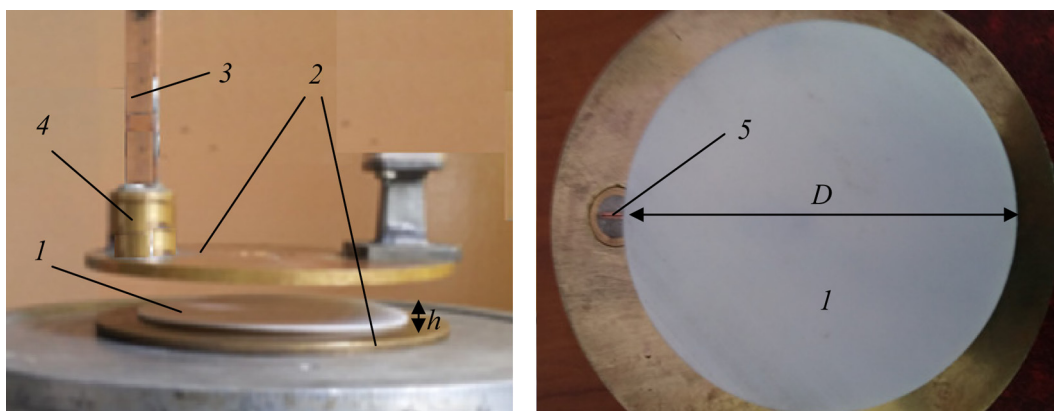


Рис. 1. Объект экспериментальных исследований

Fig. 1. The object of experimental investigations

Объект и методика исследований. Объект исследований схематически представлен на рис. 1. Диэлектрический диск *1*, изготовленный из фторопласта-4, располагался между двумя металлическими зеркалами таким образом, что последние плотно прилегали к его боковым основаниям. Диск имел диаметр $D = 78$ мм и высоту $h = 1$ мм. Зеркала изготавливались из меди и были круглой формы. Диаметр зеркал превосходил диаметр диэлектрического диска и составлял 110 мм.

В основу предложенного способа возбуждения был положен принцип возбуждения колебаний ШГ в классических дисковых ДР открытым концом металлического волновода со стороны плоского основания диэлектрического диска [11].

Суженный вдоль узкой стенки конец стандартного металлического волновода *3* помещался внутрь металлической обоймы *4* цилиндрической формы с внешним диаметром 13 мм. Одна из торцевых частей цилиндрической обоймы была частично металлизирована таким образом, что на ее поверхности оставалась лишь щель связи *5* прямоугольной формы, представленная открытым концом волновода с размерами $7,2 \times 0,5$ мм². Именно она в эксперименте выполняла функции элемента возбуждения колебаний ШГ в планарном ДР. Через круглое отверстие с диаметром, равным внешнему диаметру цилиндрической обоймы, элемент возбуждения помещался в одно из зеркал. При этом щель связи находилась в плоскости металлического зеркала. Расстояние между серединой щели связи и центром зеркал выбиралось равным диаметру диэлектрического диска $D = 78$ мм. Между собой зеркала располагались параллельно.

Основываясь на данных экспериментальных исследований, представленных в [11], с целью повышения эффективности возбуждения колебаний ШГ в диэлектрическом диске щель связи ориентировалась на металлическом зеркале таким образом, что радиус плоского основания диэлектрического диска был параллелен ее широкой стороне. Как было показано, такой способ возбуждения обеспечивает режим стоячей волны в ДР. При подобной ориентации щели связи на плоскости металлического зеркала в дисковом ДР возбуждаются гибридные колебания *HE*-поляризации.

Исследования проведены в полосе частот 31,0–37,0 ГГц. Измерения осуществлялись с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) Я2Р-67. Исследовались спектральные характеристики в виде набора резонансных частот. Для их определения использовался волномер на основе перестраиваемого резонатора объемного типа. Энергетические характеристики были представлены результатами определения параметра связи с планарным ДР, а также собственной добротности резонатора. Параметр связи p определялся на основе результатов измерения КСВН на резонансных частотах. При этом использовались следующие выражения [12]:

$$p = 1/\text{КСВН} \text{ – при слабой связи (недосвязи);}$$

$$p = \text{КСВН} \text{ – при сильной связи (пересвязи).}$$

Величина связи (слабая или сильная) контролировалась по изменению амплитуды резонансного отклика при внесении малой поглощающей неоднородности к криволинейной поверхности планарного диска в зазор между металлическими зеркалами. В случае сильной связи наблюдался рост амплитуды, слабой связи – ее уменьшение.

Для определения собственной добротности резонатора в эксперименте применялся метод измерения полного сопротивления

$$Q_0 = Q_n (p+1),$$

где Q_n – нагруженная добротность [12]. Величина Q_n определялась путем измерения разности частот Δf по уровню половинной мощности на резонансных откликах с использованием выражения

$$Q_n = f_n / \Delta f,$$

где f_n – резонансные частоты.

Систематическая погрешность определения частот в эксперименте не превышала 0,01 %, собственной добротности – 10 %.

Качественно оценить эффективность возбуждения колебаний ШГ в планарном ДР на разных резонансных частотах позволяла зависимость относительной амплитуды A_0/A_{\max} (A_0 – текущее значение амплитуды, A_{\max} – ее наибольшее значение) резонансного отклика от соответствующего значения азимутального индекса m моды колебания.

Для подтверждения достоверности результатов экспериментальных исследований и идентификации мод колебаний в соответствии с распределением их резонансных полей было проведено компьютерное моделирование на основе стандартного программного обеспечения CST Microwave Studio 2013. Пакет программ предоставлялся Восточно-Китайским НИИ «Фотоэлектроника» в ходе совместных исследований.

Результаты исследований и их объяснение. Рассмотрим спектральные характеристики дискового планарного ДР. На рис. 2 показаны спектрограммы в полосе частот 32,6–35,6 ГГц. Видно, что спектр колебаний планарного ДР относительно разрежен. Наблюдаются периодически чередующиеся резонансные отклики, которые характеризуются высокой амплитудой. Усредненное расстояние между ними по шкале частот составляет 0,885 ГГц.

Подобная картина периодически чередующихся резонансных откликов в спектре планарного ДР наблюдается во всем исследуемом диапазоне частот. Результаты проведенного компьютерного моделирования показали, что по характеру распределения поля они соответствуют колебаниям ШГ, поля которых имеют одну вариацию поля вдоль радиальной координаты r (рис. 3, а). Различие измеренных в эксперименте резонансных частот планарного ДР и полученных путем компьютерного моделирования не превышает 50 МГц. Соседние по шкале частот резонансные отклики соответствуют модам колебаний ШГ, отличающимся на единицу числом вариаций поля вдоль азимутальной координаты φ . Результаты компьютерного моделирования указывают на то, что в зазоре между металлическими зеркалами распределение резонансного поля колебаний ШГ по высоте планарного ДР является однородным. Таким образом, в спектре планарного ДР по высокой эффективности возбуждения выделяются HE_{nm} -моды колебаний ШГ, которые характеризуются следующим набором

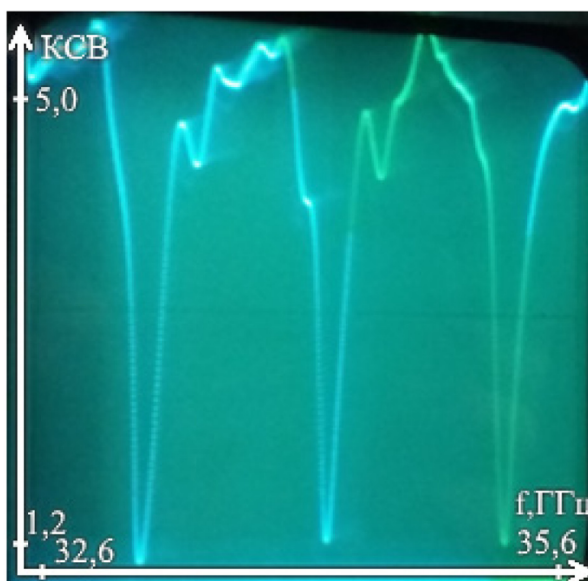


Рис. 2. Участок спектра дискового планарного ДР
Fig. 2. The part of the spectrum of the disk planar DR

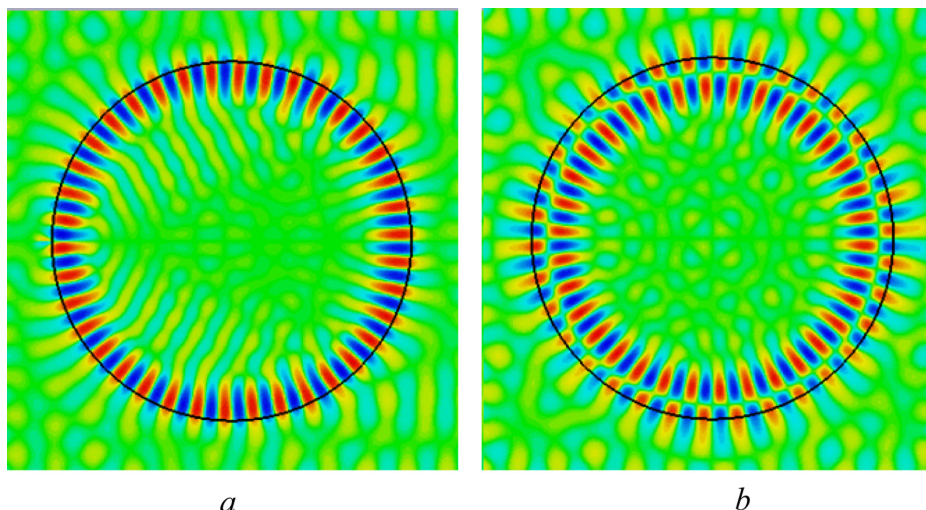


Рис. 3. Распределение полей $HE_{37,1,0}$ (a) и $HE_{37,2,0}$ (b) мод колебаний ШГ в дисковом планарном ДР
 Fig. 3. Distribution of the field $HE_{37,1,0}$ (a) and the field $HE_{37,2,0}$ (b) of WGMs in the planar DR

азимутального n , радиального m и аксиального l индексов: $m = 1$, $l = 0$. Величина азимутального индекса определяется выбором резонансной частоты и в исследуемом диапазоне частот находится в интервале $n = 31 \div 37$.

Из рис. 3 видно, что наряду с низшими радиальными модами (рис. 3, a) в планарном ДР возбуждаются и другие моды, резонансные отклики которых характеризуются значительно меньшей амплитудой. Результаты компьютерного моделирования показали, что они соответствуют модам колебаний ШГ с двумя вариациями поля вдоль радиальной координаты (рис. 3, b).

На высокую эффективность возбуждения низших радиальных мод ($m = 1$) колебаний ШГ в планарном ДР щелью связи во всем исследуемом диапазоне частот указывают данные, графически представленные на рис. 4 в виде зависимости относительной амплитуды A_0/A_{max} резонансных откликов от значения соответствующих им азимутальных индексов n .

На рис. 4 видно, что во всем исследуемом диапазоне частот сохраняется высокая эффективность возбуждения колебаний ШГ с тенденцией роста амплитуды резонансного отклика при повышении азимутального индекса мод колебаний (резонансной частоты). Это объясняется тем, что с ростом азимутального индекса (частоты) поля колебаний ШГ локализуются в области, ближе прилегающей к криволинейной границе резонатора, именно в той области, где располагается элемент возбуждения – щель связи. При этом интенсивность резонансных полей в области расположения элемента возбуждения растет, что и обеспечивает режим эффективной связи.

Необходимо отметить, что высокая эффективность возбуждения колебаний в планарном ДР щелью связи сопровождается высокими значениями параметра связи. Об этом свидетельствуют

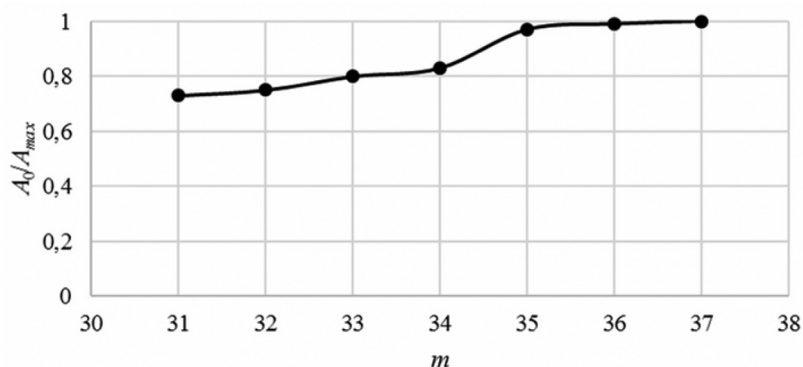


Рис. 4. Зависимость относительной амплитуды резонансного отклика от азимутального индекса мод колебаний ШГ
 Fig. 4. The dependence of the relative amplitude of the resonance response on azimuthal index of WGMs

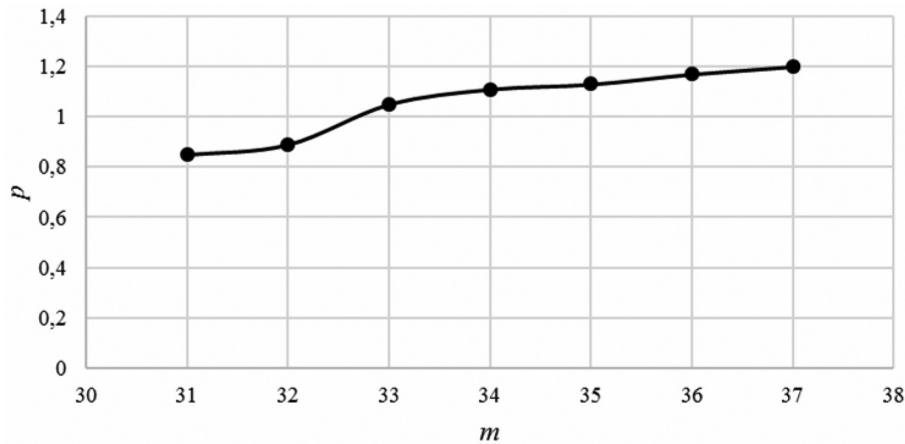


Рис. 5. Зависимость параметра связи от азимутального индекса мод колебаний ШГ

Fig. 5. The dependence of the coupling parameter on the azimuthal index of WGMs

результаты исследования зависимости параметра связи p от азимутального индекса мод колебаний ШГ, представленные на рис. 5.

График на рис. 5 показывает, что в большей части исследуемого диапазона частот достигается режим пересвязи ($p > 1$) с полями возбуждаемых мод колебаний. Это объясняется высокой интенсивностью резонансного поля, расположенного в узком зазоре между двумя металлическими зеркалами внутри слоя диэлектрика резонатора. На это указывает однородное распределение резонансных полей колебаний ШГ вдоль аксиальной координаты ($l = 0$). По аналогии с амплитудными характеристиками наблюдается тенденция роста параметра связи с увеличением азимутального индекса мод колебаний (частоты). Обратим внимание, что задача достижения высоких значений параметра связи с классическими ДР до сих пор является актуальной.

Необходимо отметить, что при появлении минимального по высоте воздушного зазора (несколько десятков мкм) между диэлектрическим диском и одним из зеркал параметр связи и амплитуда резонансных откликов стремительно снижаются. При высоте воздушного зазора более 100 мкм колебания ШГ в планарном ДР не возбуждаются по причине высоких радиационных потерь.

На рис. 6 показаны результаты исследования зависимости собственной добротности Q_0 планарного ДР от азимутального индекса m мод колебаний ШГ.

Из данных, приведенных на рис. 6, видно, что достигаемые значения собственной добротности планарного ДР относительно невелики и в исследуемом диапазоне частот не превышают $Q_0 < 1600$. Полученные результаты хорошо согласуются с данными о сравнительно невысокой

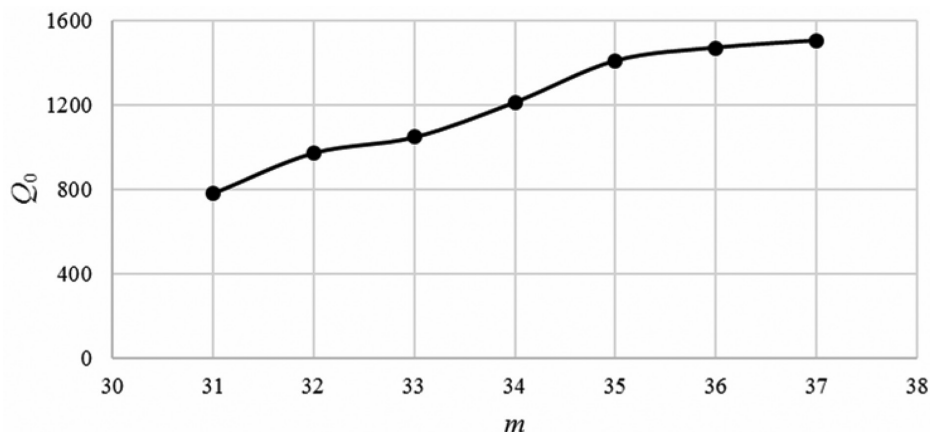


Рис. 6. Зависимость собственной добротности дискового планарного ДР от азимутального индекса мод колебаний ШГ

Fig. 6. The dependence of the own Q-factor of the disk planar DR on the azimuthal index of WGMs

добротности планарных ДР в СВЧ-диапазоне [9]. Наблюдаемая тенденция роста собственной добротности с увеличением азимутального индекса мод колебаний объясняется снижением радиационных потерь при излучении со стороны криволинейной поверхности диэлектрического диска и соответствует представлениям о поведении добротности классических ДР.

Очевидно, что главным фактором, влияющим на величину добротности планарных ДР, является значение импеданса металлического покрытия зеркал. Кроме того, немаловажными являются потери в материале диэлектрика. В связи с этим для повышения добротности планарных ДР целесообразно использование металлических зеркал, обладающих малым импедансом, и диэлектрического материала, характеризующегося малыми потерями. Для уменьшения размеров ДР перспективным является использование диэлектриков с высоким значением диэлектрической постоянной.

Заключение. Проведенными исследованиями установлено, что дисковые планарные ДР обладают сравнительно разреженным спектром колебаний в 8-миллиметровом диапазоне длин волн. Моды колебаний ШГ имеют однородное распределение поля по высоте резонатора. Предложен способ эффективного возбуждения *HE*-колебаний ШГ в планарном ДР – щелью связи в металлическом зеркале резонатора. Показано, что таким образом достигается режим сильной связи (пересвязи) с планарным ДР, что делает перспективным его использование в качестве колебательной системы твердотельных автогенераторов миллиметровых волн с улучшенными массогабаритными характеристиками. Выработаны рекомендации относительно повышения добротности планарных ДР и уменьшения их размеров.

Список использованных источников

1. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко [и др.] ; под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. Квазиоптические твердотельные резонаторы / А. Я. Кириченко [и др.]. – Киев: Наук. думка, 2008. – 296 с.
3. Vedrenne, C. Whispering-Gallery modes in dielectric resonators / C. Vedrenne, J. Arnaud // Proc. Inst. Elect. Eng. – 1982. – Vol. 129, N 4. – P. 183–187.
4. Experimental conditions for the excitation of thin disk whispering-gallery-mode resonators / V. Yurchenko [et al.] // Progress in Electromagnetics Research C. – 2013. – Vol. 43. – P. 29–40.
5. Annino, G. Study on planar whispering gallery dielectric resonators. I. General properties / G. Annino, M. Cassettari, M. Martinelli // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 2002. – Vol. 23, N 4. – P. 597–615.
6. Annino, G. Study on planar whispering gallery dielectric resonators. II. A multiple-band device / G. Annino, M. Cassettari, M. Martinelli // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. – 2002. – Vol. 23, N 4. – P. 617–634.
7. Haiyong, Quan. Analyses of whispering-gallery modes in small resonators / Haiyong Quan, Zhixiong Guo // J. of Micro/Nanolithography. – 2009. – Vol. 8, N 3. – P. 1–7.
8. Analysis of stacked whispering gallery dielectric resonators for submillimeter ESR spectroscopy / G. Annino [et al.] // Chem. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 281, N 4-6. – P. 306–311.
9. Santhosh Kumar, G. D. V Whispering Gallery Modes of Planar Dielectric Resonators in LTCC Technology / G. D. V. Santhosh Kumar, K. C. James Raju // Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (AICERA/ICMiCR), 2013 Annual International Conference on. – P. 474–479.
10. Ji, Y. A High-Q Millimeter-Wave Dielectric-Resonator Bandpass Filter Using Whispering-Gallery Modes / Y. Ji, X. S. Yao, L. Maleki // The Telecommunications and Mission Operations Progress Report (TMO Progress Report). – 2000. – Vol. 42, N 141. – P. 1–11.
11. Иванов, Е. Н. Повышение эффективности возбуждения дисковых диэлектрических резонаторов / Е. Н. Иванов, А. А. Карачев, Д. П. Царапкин // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1987. – Т. 30, № 10. – С. 68–69.
12. Гинзтон, Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинзтон. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 519 с.

References

1. Il'chenko M. E., Vzyatyshev V. F., Gassanov L. G. et.al. *Dielectric resonators*. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1989. 328 p. (in Russian).
2. Kirichenko A. Ia., Prokopenko Iu. V., Filippov Iu. F., Cherpak N. T. *Quasi-optical solid-state resonators*. Kiev, Naukova dumka Publ., 2008. 296 p. (in Russian).
3. Vedrenne C., Arnaud J. Whispering-Gallery modes in dielectric resonators. *Proceedings IEE*, 1982, vol. 129, no. 4, pp. 183–187. Doi: 10.1049/ip-h-1.1982.0037
4. Yurchenko V., Altintas A., Ciydem M., Koc S. Experimental conditions for the excitation of thin disk whispering-gallery-mode resonators. *Progress in Electromagnetics Research C*, 2013, vol. 43, pp. 29–40. Doi: 10.2528/pierc13062803
5. Annino G., Cassettari M., Martinelli M. Study on planar whispering gallery dielectric resonators. I. General properties. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, vol. 23, no. 4, pp. 597–615. Doi: 10.1023/a:1015709927809

6. Annino G., Cassettari M., Martinelli M. Study on planar whispering gallery dielectric resonators. II. A multiple-band device. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, vol. 23, no. 4, pp. 617–634. Doi: 10.1023/a:1015761911879
7. Haiyong Quan. Analyses of whispering-gallery modes in small resonators. *Journal of Micro/Nanolithography*, 2009, vol. 8, no. 3, pp. 1–7. Doi: 10.1117/1.3213247
8. Annino G., Cassettari M., Longo I., Martinelli M. Analysis of stacked whispering gallery dielectric resonators for submillimeter ESR spectroscopy. *Chemical Physics Letters*, 1997, vol. 281, no. 4-6, pp. 306–311. Doi: 10.1016/s0009-2614(97)01246-3
9. Santhosh Kumar G. D. V., James Raju K. C. Whispering Gallery Modes of Planar Dielectric Resonators in LTCC Technology. *Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (AICERA/ICMiCR), 2013 Annual International Conference on*, pp. 474–479. Doi: 10.1109/aicera-icmicr.2013.6576026
10. Ji Y., Yao X. S., Maleki L. A High-Q Millimeter-Wave Dielectric-Resonator Bandpass Filter Using Whispering-Gallery Modes. *The Telecommunications and Mission Operations Progress Report (TMO Progress Report)*, 2000, vol. 42, no. 141, pp. 1–11.
11. Ivanov E. N., Karachev A. A., Tsarapkin D. P. Increasing the excitation efficiency of disk dielectric resonators. *Izvestiia vuzov. Radioelektronika = Radioelectronics and Communications Systems*, 1987, vol. 30, no. 10, pp. 68–69 (in Russian).
12. Ginzton E. L. *Microwave Measurements*. New York, McGraw-Hill, 1957.

Информация об авторах

Когут Александр Евгеньевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт радиопрофики и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: kogut@ire.kharkov.ua

Доля Роман Сергеевич – младший научный сотрудник, аспирант, Институт радиопрофики и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: roma_vb@mail.ru

Носатюк Сергей Олегович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт радиопрофики и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: nosatyk_sergey@mail.ru

Шульга Евгений Александрович – младший научный сотрудник, аспирант, Институт радиопрофики и электроники имени А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины (ул. Академика Проскуры 12, 61085, Харьков, Украина). E-mail: Shulgaevgeniy.ne@mail.ru

Хе Джаочан – заместитель директора Восточно-Китайского НИИ «Фотоэлектроника» (Уху, Провинция Аньхой, Китай, 241002).

Information about the authors

Oleksandr Ye. Kogut – D. Sc. (Physic and Mathematic), Leading Researcher, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., Kharkov, 61085, Ukraine). E-mail: kogut@ire.kharkov.ua

Roman S. Dolya – Junior Researcher, Graduate Student, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., Kharkov, 61085, Ukraine). E-mail: roma_vb@mail.ru

Serhii O. Nosatiuk – Ph. D. (Physic and Mathematic), Researcher, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., Kharkov, 61085, Ukraine). E-mail: nosatyk_sergey@mail.ru

Yevgeniy A. Shulha – Junior Researcher, Graduate Student, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine (12, Academician Proskura Str., Kharkov, 61085, Ukraine). E-mail: Shulgaevgeniy.ne@mail.ru

He Jaochan – Deputy. Director of the East China Research Institute “Photoelectronics” (Huajinnan Road, Huaxia Technology Park, Wuhu Hi-Tech Development Zone, Wuhu, Anhui Province, P. R.China, 241002).