

**А. Я. Кириченко, Г. В. Голубничая**

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [kharkovs@ire.kharkov.ua](mailto:kharkovs@ire.kharkov.ua)

## ОСОБЕННОСТИ МЕЖТИПОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ДИСКОВЫХ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВОЗБУЖДЕНИИ ПАРАЗИТНЫХ ТИПОВ КОЛЕБАНИЙ

Дисковые диэлектрические резонаторы с модами шепчущей галереи обладают высокой добротностью, однако препятствием к широкому применению их в качестве элементов СВЧ является густой частотный спектр. В частности, искажение амплитудно-частотной характеристики обусловлено межтиповым взаимодействием колебаний. Изучение особенностей этого взаимодействия поможет понять обстоятельства их возникновения и, следовательно, найти возможность избежать этого явления. Экспериментально исследованы особенности межтипового взаимодействия в дисковом диэлектрическом резонаторе, возбуждаемом на высших азимутальных типах, в случае внутреннего возбуждения паразитного типа колебания в одиночном диске. Изучена динамика влияния изменения неоднородности в виде элемента связи резонатора с диэлектрическим волноводом на форму резонансной кривой. Установлена возможность компенсации влияния этой неоднородности внесением дополнительной неоднородности. Обнаружено изменение двугорбой резонансной кривой в зависимости от направления перемещения по угловой координате дополнительной неоднородности. До настоящего времени исследование межмодового взаимодействия производилось только для случая внешнего возбуждения при использовании двух диэлектрических дисков. Полученные результаты могут служить инструментом селекции спектра колебаний в дисковых диэлектрических резонаторах. Ил. 3. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** квазиоптический диэлектрический резонатор, высшие азимутальные колебания, внутреннее возбуждение, межтиповое взаимодействие.

Широко признанным достоинством дисковых квазиоптических диэлектрических резонаторов, возбуждаемых в режиме высших азимутальных колебаний, является высокое значение собственной добротности. Однако низкие радиационные потери энергии собственных колебаний в таких резонаторах неизбежно сопровождаются густым частотным спектром. Это связано как с наличием гибридных мод  $EH_{mnl}$  и  $HE_{mnl}$ , так и с вариацией модовых индексов колебаний (азимутального  $m$ , радиального  $n$  или аксиального  $l$ ). Обычно в качестве рабочей выбирают моду шепчущей галереи с индексами  $n = l = 1$ . При этом ее азимутальный индекс определяется количеством длин волн, укладываемых по периметру поперечного сечения цилиндрического резонатора, и подбирается таким, чтобы обеспечить максимальную добротность резонатора. Изменение геометрических размеров резонатора, например его радиуса, при сохранении структуры распределения поля возбуждаемой моды, как правило, приводит к снижению добротности. В амплитудно-частотной характеристике резонатора появляются дополнительные резонансы из-за возбуждения мод с радиальными  $n > 1$  и аксиальными  $l > 1$  индексами, а также мод другой поляризации. Искажения амплитудно-частотной характеристики в первую очередь проявляются в окрестностях точек совпадения собственных частот различных мод. Эти искажения обусловлены межмодовым взаимодействием, т. е. перераспределением энергии между соседними модами. В результате наблюдаются сдвиги частот взаимодействующих мод, что проявляется в искажении резонансной частотной характеристики резонатора. Эквива-

лентное понятие «межтиповое взаимодействие» было введено для объяснения явления, наблюдаемого в точке совпадения по частоте двух различных типов колебаний в цилиндрических металлических резонаторах [1]. Для наблюдения эффектов в точке совпадения до настоящего времени в экспериментах использовалась резонаторная система, состоящая из двух одинаковых диэлектрических дисков [2–6]. При этом каждый из дисков имел собственную резонансную частоту (часто одну и ту же), и при их сближении можно было наблюдать совпадение резонансов и ряд интересных сопутствующих явлений. С точки зрения радиотехники, эти явления можно интерпретировать как взаимодействие двух связанных резонансных контуров. Экспериментально межтиповое взаимодействие обнаружено и изучено в открытых резонаторах с металлическими зеркалами [7]. Показано, что в конфокальных двухзеркальных открытых резонаторах существует несколько типов колебаний, которые при изменении расстояния между зеркалами могут вступить во взаимодействие.

Отметим, что при сближении двух идентичных резонаторов начинает проявляться взаимодействие полей их собственных колебаний. Такое межмодовое взаимодействие, в соответствии с исследованиями [1], обусловлено внешним возбуждением резонаторной системы, так как при этом каждый из дисковых резонаторов возбуждается своей ЭДС  $U_1$  и  $U_2$ , а внутренняя связь  $Z_{12}$  между колебаниями может отсутствовать.

Кроме того, сближение двух резонаторов приводит к образованию новой резонансной системы со своим набором собственных мод. Эта сис-

тема является модификацией одного резонатора, у которого меняется, как правило, один из геометрических параметров. В нашем случае изменяются толщина диска и его эффективная диэлектрическая проницаемость. Следовательно, в спектре резонансной системы появляется дополнительный набор частот, соответствующих новым собственным модам с  $l > 1$  и  $n > 1$  (паразитным модам). Частоты этих мод могут быть близкими или даже совпадать с частотами собственных колебаний исходного одиночного диска, которые имеют место и в образованной резонансной системе. В результате проявляется межмодовое взаимодействие, которое обусловлено внутренним возбуждением в системе дополнительных собственных мод, когда  $U_2 = 0$ , а  $Z_{12} \neq 0$ . Отметим, что описанный эффект межмодового взаимодействия в общем случае проявляется при заметном отличии формата диска  $\Phi$  от  $\Phi = R/h = 5$  ( $R$  – радиус диэлектрического диска,  $h$  – его толщина), т. е. при увеличенном радиусе или при увеличенной толщине диска, когда эффективно могут возбуждаться высшие моды колебаний с  $n > 1$  или  $l > 1$ .

В настоящем исследовании приведены результаты изучения особенностей межмодового взаимодействия при внутреннем возбуждении дискового диэлектрического резонатора на высших азимутальных модах. Авторам не известны случаи рассмотрения такого типа возбуждения дисковых диэлектрических резонаторов в области межмодового взаимодействия.

**1. Описание экспериментальной установки.** Для экспериментального изучения межмодового взаимодействия был выбран толстый диск из фторопласта  $h = 15$  мм при  $R = 39$  мм, т. е.  $\Phi = 2,6$ . Резонатор возбуждался диэлектрическим волноводом из фторопласта с поперечным сечением  $7,2 \times 3,4$  мм, располагаемым у цилиндрической части диска широкой стороной параллельно оси резонатора. При этом в резонаторе преимущественно возбуждалась мода  $EH_{3911}$  с ориентацией вектора электрической составляющей параллельно плоскости основания диска. Диск крепился на металлической оси диаметром 6 мм, проходящей через центр диска. Вращение вокруг оси на  $360^\circ$  и перемещение диска в двух направлениях обеспечивало специальное устройство. Перемещение в радиальном направлении позволяло изменять прицельное расстояние  $\delta$  между волноводом и цилиндрической поверхностью диска; перемещение диска вдоль оси изменяло относительное расположение возбуждающего волновода и оснований диска.

Генератором электромагнитных колебаний в длинноволновой миллиметровой области служил клистрон типа К-49. Сигнал клистрона

модулировался напряжением на отражателе. Резонатор включался в схему на отражение, величина отраженного сигнала фиксировалась на осциллографе. При отсутствии связи генератора с резонатором наблюдалась стандартная колоколообразная область генерации клистрона шириной 50...60 МГц.

**2. Влияние неоднородности узла связи резонатора с волноводом.** При расстояниях  $\delta > 3,1$  мм между волноводом и цилиндрической поверхностью диска связь резонатора с сигналом в волноводе отсутствовала. На экране осциллографа наблюдалась зона генерации клистрона без каких-либо особенностей. Отраженного сигнала не было (рис. 1, а). Здесь и далее на рисунках приведены осциллограммы в области частот  $f = 38,397...38,595$  ГГц.

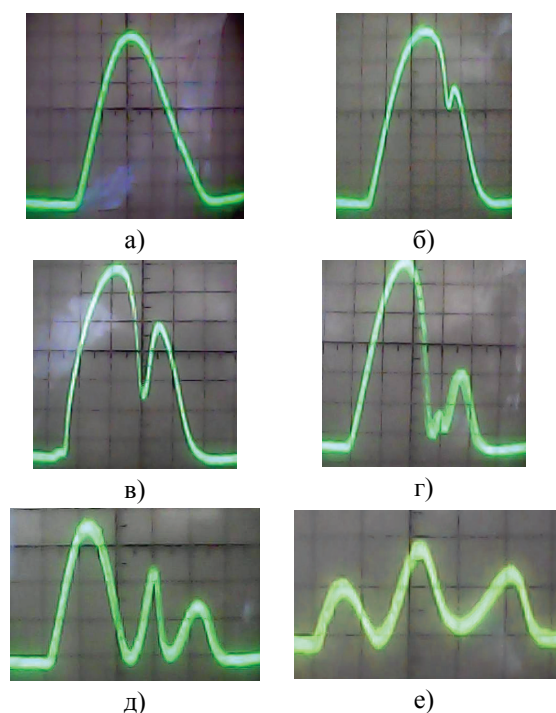


Рис. 1. Зависимость формы резонансной кривой от прицельного расстояния  $\delta$ : а)  $\delta > 3,1$  мм; б)  $\delta = 3,1$  мм; в)  $\delta = 2,1$  мм; г)  $\delta = 1$  мм; д)  $\delta = 0,6$  мм; е)  $\delta = 0$  мм

При расположении волновода на расстоянии  $\delta = 3,1$  мм в зоне генерации клистрона появился характерный отбор мощности на частоте  $f = 38,522$  ГГц, связанный с резонансом диэлектрического резонатора (рис. 1, б). Увеличение связи между волноводом и резонатором за счет уменьшения прицельного расстояния до  $\delta = 2,1$  мм обусловило возрастание сигнала без изменения его положения по частотной оси (рис. 1, в). Добротность резонатора при этом составила  $Q = 1328$ . Дальнейшее уменьшение прицельного расстояния до  $\delta = 1$  мм приводит к появлению

второго, более высокочастотного резонанса при  $f = 38,535$  ГГц (рис. 1, г), что обусловлено возросшей величиной неоднородности, связанной с узлом связи диэлектрического волновода с диском. Эта неоднородность явилась причиной «расщепления» основного резонансного колебания, возбуждаемого при  $\delta = 3,1$  мм, частота которого практически не изменилась. Появление второго резонанса по своему характеру соответствует случаю внутреннего возбуждения. Дальнейшее уменьшение прицельного расстояния до  $\delta = 0,6$  мм приводит к заметному снижению добротности и частоты основного резонанса  $f = 38,482$  ГГц и некоторому снижению частоты резонанса, возникшего в результате внутреннего возбуждения, до частоты  $f = 38,531$  ГГц (рис. 1, д). Эта резонансная кривая, указывающая на выравнивание глубины резонансов, в формулировке [1] соответствует точке совпадения частот. При  $\delta = 0$  мм (рис. 1, е) радиационные потери в узле связи приводят к сильному рассеянию высокочастотной энергии, следовательно, к падению уровня отраженного сигнала и размытию резонансной кривой.

Неоднородность, внесенная элементом связи и приведшая к «расщеплению» основного резонанса, может быть скомпенсирована другой неоднородностью определенной величины в определенной фазе азимутального колебания. На рис. 2 приведена эпюра сигнала с экрана осциллографа, полученная при  $\delta = 1,2$  мм в присутствии расположенной непосредственно на поверхности диска параллельно его образующей неоднородности в виде медной проволоки диаметром 1 мм.

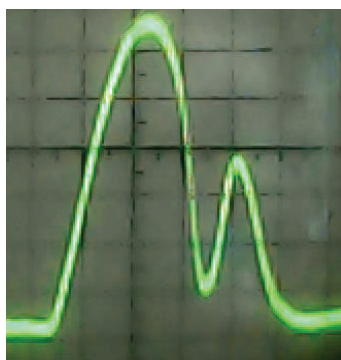


Рис. 2. Компенсация неоднородности, внесенной элементом связи введением неоднородности определенной величины в определенной фазе азимутального колебания ( $\delta = 1,2$  мм,  $f = 38,518$  ГГц,  $Q = 780$ ,  $\varphi \sim 335^\circ$ )

Угол между узлом связи ( $\varphi = 0$ ) и неоднородностью составлял  $\varphi \sim 335^\circ$ . Сравнив эпюры сигналов на рис. 2 и 1, в, можно отметить их сходство. Однако добротность резонатора ( $Q = 786$ ) и резонансная частота ( $f = 38,531$  ГГц) несколько снизились.

**3. Реверс в изменении частоты.** Следует отметить, что для дисковых диэлектрических резонаторов, возбуждаемых на высших азимутальных типах колебаний, внесение металлической неоднородности в электромагнитное поле, окружающее их по цилиндрической поверхности, служит индикатором определения *EH*- или *HE*-мод колебаний. Вытеснение металлической неоднородностью электромагнитного поля с преобладающей электрической компонентой приводит к понижению резонансной частоты. Поэтому при возбуждении диэлектрического резонатора на моде *EH*-типа введение такой неоднородности вдали от точки совпадения всегда сопровождается смещением уединенного резонанса к более низким частотам. В случае возбуждения ортогональных мод *HE*-типов резонансная частота при таком возмущении возрастает.

Специально введенная металлическая неоднородность в виде проволоки при отсутствии расщепления резонансной кривой ( $\delta > 2,1$  мм), связанного с влиянием неоднородности узла связи, приводит к снижению добротности резонатора и смещению резонансной кривой. Следует отметить, что перемещение неоднородности к точке элемента связи (по движению часовой стрелки) приводит к повышению резонансной частоты, и, наоборот, при удалении возмущения от точки возбуждения резонатора (перемещение против часовой стрелки) резонансная частота снижается.

При возбуждении резонатора вблизи точки совпадения частот межмодовое взаимодействие колебаний приводит не только к появлению двугорбой кривой резонанса, но и вносит существенные особенности в характер изменения резонансной кривой при перемещении возмущающего тела по угловой координате. На рис. 3 для примера приведены эпюры сигнала, показывающие характер изменения резонансной кривой при перемещении возмущающего тела относительно точки расположения запитывающего диэлектрического волновода ( $\delta = 0,6$  мм). В начале опыта возмущающее металлическое тело располагалось в точке, диаметрально противоположной точке связи диэлектрического волновода с резонатором ( $\varphi = 180^\circ$ , рис. 3, а). При изменении угла  $\varphi$  (перемещение возмущающей неоднородности производится по часовой стрелке) эпюра сигнала качественно меняется. Более высокочастотный (основной) резонанс практически не изменяет своего положения относительно частотной оси, отмечаются лишь небольшие изменения его глубины. Второй резонанс, появившийся за счет межтипового взаимодействия на неоднородностях, активно изменяется не только по глубине резонансного отбора мощности, но и по его положению относительно частотной оси. Представленные на

рис. 3 эюры резонансных кривых получены при смещении возмущающего тела на  $5^\circ$ .

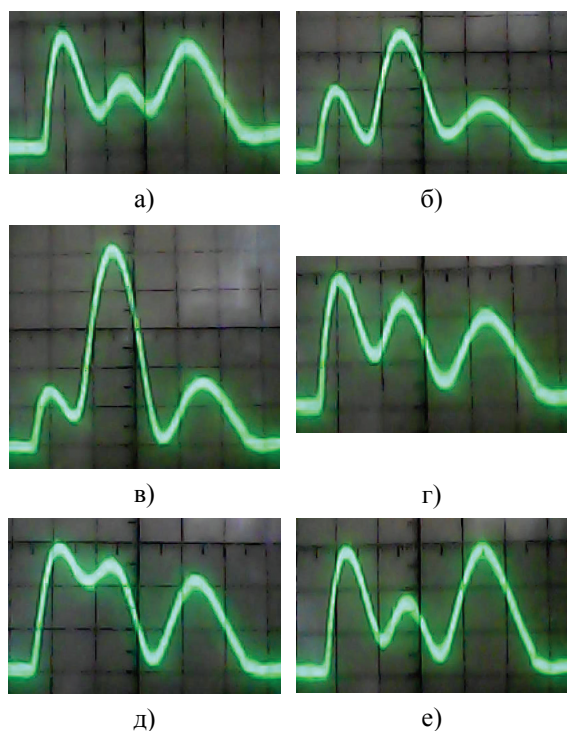


Рис. 3. Зависимость формы резонансной кривой от места расположения дополнительной неоднородности: а)  $\varphi = 180^\circ$ ; б)  $\varphi = 185^\circ$ ; в)  $\varphi = 190^\circ$ ; г)  $\varphi = 195^\circ$ ; д)  $\varphi = 200^\circ$ ; е)  $\varphi = 205^\circ$

При изменении направления перемещения возмущающей неоднородности по угловой координате, т. е. при перемещении ее против часовой стрелки, происходит преимущественное смещение наблюдаемого дополнительного резонанса по направлению к основному резонансу (в сторону более высоких частот). Тогда приведенные эюры резонансов должны быть расположены в обратном порядке – в сторону низких частот. Такое изменение направления перемещения дополнительного резонанса можно объяснить характером пространственного распределения по угловой координате полей гибридного колебания, представляющего собой комбинацию основного и паразитного. Максимум амплитуды поля дополнительного резонанса в этом случае предполагается расположенным при меньших значениях угловой координаты, чем максимум поля основного резонанса.

**Выводы.** Экспериментальным путем установлено, что в дисковых диэлектрических резонаторах при невысоких значениях формата  $\Phi \sim 2,5$  и сильной связи с элементами возбуждения может возникать «чисто внутреннее» возбуждение паразитных мод колебаний, нарушающее амплитудно-частотную характеристику изучаемых резонаторов. Перемещение дополнительной неоднородности, вносимой в электромагнитное

поле, окружающее резонатор, приводит к смещению резонансной кривой к более низким или высоким частотам, в зависимости от направления углового перемещения неоднородности. Наблюдаемая особенность может быть использована для дополнительной угловой селекции спектра колебаний в дисковых диэлектрических резонаторах, а также позволит бесконтактно и дистанционно определять направление вращения элемента и его скорость.

#### Библиографический список

1. Штейншлейгер В. Б. Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах / В. Б. Штейншлейгер. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1955. – 114 с.
2. Взятыхшев В. Ф. Эффекты взаимодействия азимутальных колебаний в дисковых диэлектрических резонаторах / В. Ф. Взятыхшев, Г. П. Раевский // Радиотехника и электрон. – 1987. – 32, № 3. – С. 877–878.
3. Кириченко А. Я. Взаимодействие колебаний в квазиоптическом диэлектрическом резонаторе / А. Я. Кириченко, С. Н. Харьковский // Письма в Журн. техн. физики. – 1990. – 16, № 6. – С. 12–16.
4. Раевский Г. П. Межтиповое взаимодействие в диэлектрических резонаторах с азимутальными колебаниями / Г. П. Раевский, В. Ф. Взятыхшев // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 1990. – 33, № 10. – С. 66–68.
5. Кириченко А. Я. Резонансная перестройка характеристик азимутальных колебаний открытых диэлектрических резонаторов / А. Я. Кириченко, С. Н. Харьковский // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 1991. – 34, № 10. – С. 74–78.
6. Кириченко А. Я. Интерференция и взаимодействие азимутальных волн в дисковом диэлектрическом резонаторе / А. Я. Кириченко, С. Н. Харьковский // Радиотехника и электрон. – 1994. – 39, № 5. – С. 710–717.
7. Кузьмичев И. К. Экспериментальное обнаружение и исследование морсовской критической точки дисперсионного уравнения генератора дифракционного излучения / И. К. Кузьмичев, В. П. Шестопапов // Докл. НАН Украины. – 1996. – № 12. – С. 90–95.

Рукопись поступила 20.10.2015.

A. Ya. Kirichenko, G. V. Golubnichaya

#### PARTICULARITIES OF INTER-TYPE INTERACTION IN DISK QUASIOPTICAL DIELECTRIC RESONATOR IN THE CASE OF INTERNAL EXCITATION OF PARASITIC OSCILLATIONS

Disc dielectric resonators with whispering gallery modes are usually characterized by high  $Q$ -factor, nevertheless, dense spectrum of these oscillation is the factor which impedes their use as microwave elements. In particular, inter-type interaction of oscillations results in the distortions of amplitude-frequency characteristics. The investigation of particularities of this interaction allows one to understand conditions when they appear and find the possibilities to avoid them. The particularities of inter-type interaction in disk quasioptical resonator, excited at high azimuthal modes, in the case of internal excitation of parasitic oscillations in single disk are investigated experimentally. The influence of parameters of coupling element between the resonator and dielectric waveguide on the resonance characteristics is studied. It is shown, that this influence can be compensated by introducing the additional irregularity. Also it is demonstrated, that parameters of two-hump resonant characteristic strongly depend

upon azimuthal position of this irregularity. Till the present time the intermode interaction was investigated only in the case of external excitation, using two disk dielectric resonators. The obtained results can be used as a method for selection of disc dielectric resonator oscillation spectrum.

**Key words:** quasi-optical dielectric resonator, higher-order azimuthal oscillations, internal excitation, inter-types interaction.

О. Я. Кириченко, Г. В. Голубничая

ОСОБЛИВОСТІ МІЖТИПОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ  
В ДИСКОВИХ КВАЗІОПТИЧНИХ  
ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ  
ПРИ ЗБУДЖЕННІ ПАРАЗИТНИХ ТИПІВ  
КОЛИВАНЬ

Дискові діелектричні резонатори з модами шепучої галереї, мають високу добротність, проте перешкодою до широкого застосування їх в якості елементів НВЧ є густий частотний спектр. Зокрема, спотворення амплітудно-частотної

характеристики обумовлено межтиповою взаємодією коливань. Вивчення особливостей цієї взаємодії допоможе зрозуміти обставини їх виникнення і, отже, знайти можливість уникнути цього явища. Експериментально досліджено особливості міжтипової взаємодії в дисковому діелектричному резонаторі, який збуджується на вищих азимутальних типах, у разі внутрішнього збудження паразитного типу коливань в одиночному диску. Вивчено динаміку впливу зміни неоднорідності у вигляді елемента зв'язку резонатора з діелектричним хвилеводом на форму резонансної кривої. Встановлено можливість компенсації впливу цієї неоднорідності внесенням додаткової неоднорідності. Виявлено зміну двогорбої резонансної кривої в залежності від напрямку переміщення по кутовій координаті додаткової неоднорідності. До теперішнього часу дослідження міжмодової взаємодії проводилися тільки для випадку зовнішнього збудження при використанні двох діелектричних дисків. Отримані результати можуть служити інструментом селекції спектра коливань в дискових діелектричних резонаторах.

**Ключові слова:** квазіоптичний діелектричний резонатор, вищі азимутальні коливання, внутрішнє збудження, міжтипова взаємодія.