

07

## Возбуждение лучевых колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах с модами шепчущей галереи

© С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов

Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков

Поступило в Редакцию 6 января 1997 г.

Обнаружено, что совместно с колебаниями типа шепчущей галереи в квазиоптических диэлектрических резонаторах возможно возбуждение лучевых колебаний. Показано, что при изменении условий возбуждения их поля постепенно "отщепляются" от полей колебаний шепчущей галереи, характеристики которых ухудшаются. Определен угловой спектр лучевых колебаний в диэлектрических резонаторах.

Явление высокочастотного резонанса волн типа шепчущей галереи в диэлектрических телах вращения используется в широком частотном диапазоне: от СВЧ до оптических [1,2]. В квазиоптических диэлектрических резонаторах с радиусом  $R$ , связанным с длиной волны  $\lambda_d$  в нем соотношением  $R > 5\lambda_d$ , их поле сосредоточено в узкой полосе у границы диэлектрика между каустиками с радиусами  $a$  и  $a_c$  (рис. 1,  $a$ ) и может быть описано на основе волнового подхода. Вместе с этим из геометрооптических построений следует, что в таких резонаторах возможны колебания, траектория луча которых представляет правильный  $N$ -угольник, вписанный в окружность резонатора (рис. 1,  $b$ ). В отличие от мод шепчущей галереи, которые являются результатом дифракции и интерференции волн источника у криволинейной границы, их описание может быть проведено в рамках геометрической оптики, поэтому мы называем их лучевыми колебаниями. При экспериментальном исследовании квазиоптических диэлектрических резонаторов в миллиметровом диапазоне длин волн нами замечено, что в них возможно одновременное возбуждение колебаний типа лучевых и шепчущих галерей. Особенно это заметно при использовании слабонаправленных источников излучения (открытый конец волновода, щель связи и др.). Для выяснения вопроса об их различимости и влиянии друг на друга проведены целенапра-

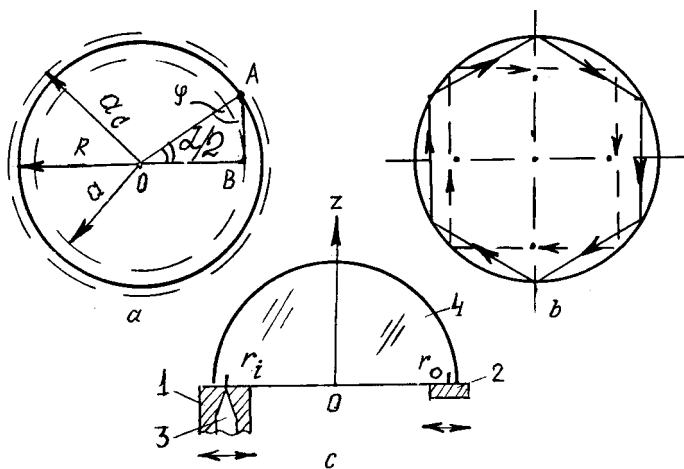


Рис. 1.

вленные исследования квазиоптического диэлектрического резонатора, одну половину которого заменяет зеркало со щелью связи. Отметим, что этот вопрос восходит к работам по распространению волн у изогнутой поверхности тела [3,4] и впервые поставлен нами в случае колебаний шепчущих галерей в квазиоптических диэлектрических резонаторах.

Приведем результаты исследования зеркального полушарового квазиоптического диэлектрического резонатора. Он содержит плоские отражатели 1 и 2 (рис. 1, c), в первый из которых устанавливается возбуждающий волновод 3, плавно сужающийся по узкой стенке до открытого конца — щели с размерами  $7.2 \times 1 \text{ mm}^2$ , на поверхности отражателя. Полушар 4 выполнен из фторопласта-4 радиусом  $R = 39 \text{ mm}$ . Характеристики  $\text{TM}_{nml}$  ( $E_r \neq 0$ ) колебаний шепчущих галерей исследуемого резонатора с  $n$ ,  $m$  и  $l = 1$  вариациями поля по полярной, азимутальной и радиальной координатам соответственно описаны в [5]. На рис. 2, a представлены зависимости относительной амплитуды  $A/A_m$  резонанса и изменения его частоты  $\Delta f_m$  от нормированной радиальной координаты щели  $r_i/R$  ( $n = 37$ , резонансная частота  $f_n = 36.6 \text{ GHz}$ ). Связь резонатора с подводящим волноводом была меньше критической вследствие дополнительных радиационных потерь из-за ограниченной

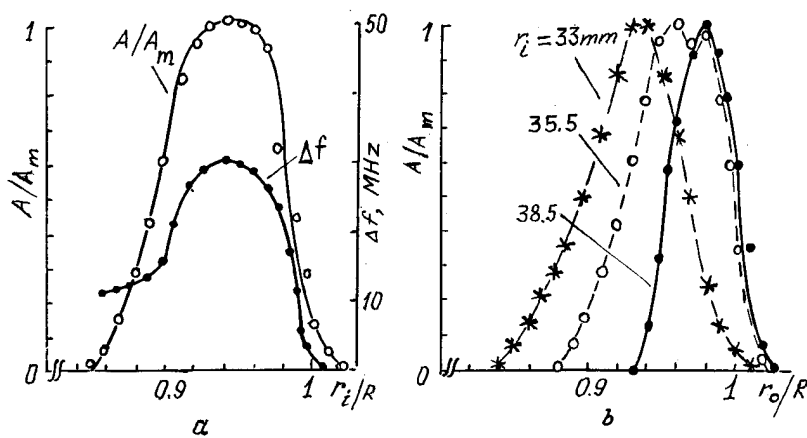


Рис. 2.

площади зеркал, но в каждой точке  $r_i$  подстраивалась до максимальной для данной системы путем изменения положения зеркала 2. Видно, что резонанс возбуждается непрерывно и эффективно в широком интервале изменения  $r_i$ , включающем и радиус внутренней каустики  $a$  колебаний шепчущих галерей (его расчет приведен ниже). При смещении щели изменяются амплитуда, форма и ширина резонанса. Для идентификации колебаний используем перемещение зеркала 2, протяженность которого вдоль радиальной координаты резонатора не превышает величину расстояния между каустиками волн шепчущих галерей. Зависимость относительной амплитуды резонанса  $A/A_m$  от нормированной радиальной координаты  $r_0/R$  середины зеркала 2 при фиксированных положениях щели показаны на рис. 2, б. Замечаем, что при  $r_i = 38.5$  мм пятно поля укладывается по радиусу между каустиками шепчущих галерей. При уменьшении  $r_i$  пятно поля "расплывается" по радиусу в глубь диэлектрика. Например, при  $r_i = 35.5$  мм пятно поля расширяется на 50%. Это переходная область от колебаний шепчущих галерей к лучевым колебаниям. Дальнейшее уменьшение  $r_i$  приводит к тому, что при определенном положении щели ( $r_i = 33$  мм) формируется резонансное поле, пятно которого заметно "отщепляется" от пятна поля шепчущих галерей и в целом смещается в глубь диэлектрика.

Исследование распределения поля по полярной координате показывает, что в чистом виде возбуждается лучевое колебание с  $N$  отражениями от вогнутой поверхности диэлектрика. В данном случае  $N = 6$  и при других  $N$  лучевое колебание не наблюдается.

Лучевые колебания образуют почти периодическую последовательность резонансов, частоты которых близки и в некоторых частях спектра практически совпадают с резонансными частотами колебаний шепчущих галерей. Их добротность на 30% меньше, чем добротность колебаний шепчущих галерей. Возбуждение переходных и (или) лучевых колебаний приводит к расширению и искажению резонансной кривой, "размыванию" пятна поля колебаний шепчущих галерей по радиусу, дополнительной модуляции их полярного распределения поля.

Определим угловой спектр и число отражений  $N$  луча от поверхности диэлектрика, при которых в чистом виде можно возбудить лучевые колебания в квазиоптических диэлектрических резонаторах с модами шепчущих галерей. Ограничимся на первом этапе двумерной моделью шепчущих галерей в круге. Из отраженных волн, дающих вклад в резонансное поле шепчущих галерей квазиоптических диэлектрических резонаторов выделим луч с наименьшим числом  $j$  отражений. Очевидно, что его траектория будет в виде правильного  $j$ -угольника, описанного около внутренней каустики моды шепчущих галерей. Радиус  $a$  внутренней каустики шепчущих галерей определяется выражением [6]:

$$a = nc/2\pi f_n \sqrt{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала резонатора,  $c$  — скорость света в вакууме.

Из геометрии задачи (см.  $\triangle AOB$ , рис. 1,  $a$ ,  $\alpha/2 = \pi/j$ ,  $\varphi = \pi/2 - \alpha/2$ ) и условия полного внутреннего отражения луча от границы диэлектрика определяем, что дискретный угловой спектр  $\varphi_N$  лучевых колебаний лежит в пределах

$$\arcsin(1/\sqrt{\varepsilon}) < \varphi_N < \pi/2 - \arccos(nc/2\pi f_n \sqrt{\varepsilon} R). \quad (2)$$

А число отражений  $N$  луча от круговой границы диэлектрика, соответствующее лучевым колебаниям, определяется из выражения

$$\pi / [\pi/2 - \arcsin(1/\sqrt{\varepsilon})] < N < \pi / \arccos(nc/2\pi f_n \sqrt{\varepsilon} R). \quad (3)$$

Отметим, что в зеркальных квазиоптических диэлектрических резонаторах резонансы образуют лучи, описывающие траектории в виде половин  $N$ -угольников с четными  $N$ .

В эксперименте  $R = 39 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon = 2.04$ . При  $n = 37$ ,  $f_n = 36.6 \text{ GHz}$  расчетный радиус каустики  $a = 37 \text{ mm}$  или  $a/R = 0.93$ , что совпадает с экспериментальной оценкой величины  $a$ . Из (3) получаем  $4 < N < 8$ , что и наблюдалось ( $N = 6$ ).

## Список литературы

- [1] Брагинский В.Б., Ильченко В.С., Городецкий М.Л. // УФН. 1990. Т. 160. В. 1. С. 157–163.
- [2] Диэлектрические резонаторы // М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхшев, Л.Г. Гасанов и др. Под ред. М.Е. Ильченко. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
- [3] Кинбер Б.Е. // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. № 8. С. 1273–1283.
- [4] Бабич В.М., Булдырев В.С. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. М.: Наука, 1972. 456 с.
- [5] Харьковский С.Н., Козут А.Е., Солодовник В.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 18. С. 38–42.
- [6] Власов С.Н. // Радиотехника и электроника. 1967. Т. 12. № 3. С. 572–573.