

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛЕЙ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В КВАЗИОПТИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ ЩЕЛЬЮ СВЯЗИ В ЗЕРКАЛЕ

Р. В. Головащенко, Е. В. Горошко, А. Е. Когут, В. В. Кутузов

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

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

E-mail: kogut@ire.kharkov.ua

Приведены результаты экспериментального изучения спектральных и энергетических характеристик, а также распределения полей вынужденных колебаний шепчущей галереи, возбуждаемых в открытых полудисковых квазиоптических диэлектрических резонаторах локальным элементом связи в виде емкостной щели на металлическом зеркале резонатора. Результаты проведенных исследований получены с помощью компьютеризированного измерительного стенда. Доказано, что на показатели электродинамических характеристик вынужденных колебаний диэлектрических резонаторов оказывают влияние не только потери энергии на элементе связи, но и радиационные потери, величина которых зависит от условий возбуждения колебаний. Ил. 2. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: вынужденные колебания шепчущей галереи, открытые диэлектрические резонаторы, элемент связи, распределения интенсивности полей колебаний, радиационные потери энергии.

К настоящему времени свойства собственных электромагнитных колебаний резонаторов различных типов широко изучены как теоретически, так и экспериментально. Это позволило создать и использовать резонансные системы практически во всем радиодиапазоне. Естественно, в каждом из диапазонов резонаторы конструктивно различаются. В то же время задачи возбуждения колебаний в таких системах по мере продвижения в коротковолновые части диапазона решаются все сложнее и сложнее. Поэтому для многих типов резонансных систем миллиметрового (мм) диапазона эти задачи остаются нерешенными.

Признанными достоинствами в мм диапазоне длин волн обладают открытые квазиоптические диэлектрические резонаторы (КДР) в форме диска и шара с колебаниями шепчущей галереи (ШГ), главными из которых являются высокая добротность и разреженный спектр частот колебаний [1]. Высокие значения добротности колебаний ШГ в таких резонаторах определяются малыми радиационными потерями энергии. Колебания ШГ в КДР формируются волнами, падающими на криволинейную границу раздела сред диэлектрик-воздух под такими малыми углами, что коэффициент их отражения близок к единице.

Несмотря на большие успехи в теоретических исследованиях КДР, возбуждаемых на колебаниях ШГ, при экспериментальных исследованиях отмечаются заметные различия в электродинамических характеристиках систем в зависимости от способа их возбуждения, а именно, в частотах вынужденных колебаний, их добротностях, а также в характере распределения полей в КДР [2–4]. В таких резонаторах ввиду значительного превышения их отдельных размеров над длиной волны при использовании локальных элементов возбуждения форма, размеры и место

расположения последних могут существенно влиять на характеристики поля, возбуждаемого в резонансной системе. Это вынуждает исследователей искать оптимальные методы эффективного возбуждения КДР. При этом необходимо отметить, что задача определения отличительных особенностей собственных и вынужденных колебаний ШГ, возбуждаемых в КДР при различных условиях, остается нерешенной.

Целью данной работы является определение причин возникновения зависимостей основных спектральных и энергетических характеристик вынужденных колебаний ШГ в полудисковом КДР, расположенном на плоском металлическом зеркале, от различных условий их возбуждения локальным элементом связи.

1. Объект и методы исследований. Экспериментальные исследования проводились с полудисковым КДР, изготовленным из фторопласта радиусом 39 мм и высотой 7,2 мм, расположенным на плоском проводящем зеркале, в интервале частот 32–37,5 ГГц. В качестве локального элемента связи использовалась емкостная щель $7,2 \times d$ мм² на металлическом зеркале, которая образовывалась сужающимся стандартным прямоугольным металлическим волноводом. Как показали результаты исследований, описанные в работе [4], такой способ возбуждения колебаний ШГ в КДР позволяет достигать наибольшей электромагнитной связи подводящего волновода с полями колебаний в резонаторе при расположении щели связи вблизи области максимума интенсивности поля. В эксперименте предусматривалась возможность изменять ширину d щели связи, а также ее радиальную координату, располагая щель связи на участках поля колебаний разной интенсивности, тем самым меняя условия их возбуждения. Экспериментально определялись

частоты вынужденных колебаний, их добротность и распределение интенсивности полей колебаний вдоль радиальной координаты. Для определения добротности использовался метод измерения полного сопротивления (резонансный) [5]. Как было показано ранее [4], в КДР для вынужденных колебаний существует зависимость основных электродинамических характеристик от условий возбуждения. В связи с этим в работе для их описания не используется термин «собственные».

Исследования распределения интенсивностей полей возбуждаемых в исследуемом КДР колебаний ШГ осуществлялись на компьютеризированном стенде [6]. Стенд состоял из трехкоординатного сканирующего устройства, КВЧ-модуля, блока управления и персонального компьютера. Трехкоординатное сканирующее устройство обеспечивало перемещение возмущающего (пробного) зонда или антенны в объеме $250 \times 250 \times 250 \text{ мм}^3$ с минимальным шагом 0,1 мм и максимальной скоростью 5 мм/с. Сканирование полей вынужденных колебаний осуществлялось в плоскости бокового основания полудиска (плоскость XY). Ось X направлена вдоль плоскости металлического зеркала КДР. КВЧ-модуль состоял из генератора мм волн, волноведущего тракта, детектора и селективного усилителя. С помощью блока управления и персонального компьютера управляли сканирующим устройством и регистрировали сигналы с детектора. Специализированное программное обеспечение, разработанное в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, позволяло управлять экспериментом и производить численную обработку экспериментальных данных, в том числе с высокой точностью определять интенсивность поля в любой его точке.

2. Результаты и их обсуждение. На рис. 1 показаны зависимости частоты (рис. 1, а) и добротности (рис. 1, б) вынужденных колебаний ШГ в полудисковом КДР от радиуса R КДР, приведенного к радиальной координате r_i щели связи, полученные ранее [3] при возбуждении колебаний щелью связи с размерами $7,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$. Смещению щели связи вглубь КДР соответствуют значения величины $R/r_i > 1$.

В работе [3] было показано, что наименьшие значения добротности вынужденных колебаний в полудисковом КДР при $R/r_i \approx 1,05$ обусловлены наибольшими дифракционными потерями энергии при расположении щели связи в области максимума интенсивности электромагнитного поля. Проведенные исследования распределения интенсивности поля вдоль радиальной координаты с помощью модифицированного метода пробного тела – пассивной щели в подвижном ограниченном зеркале – подтверждали это [7,8].

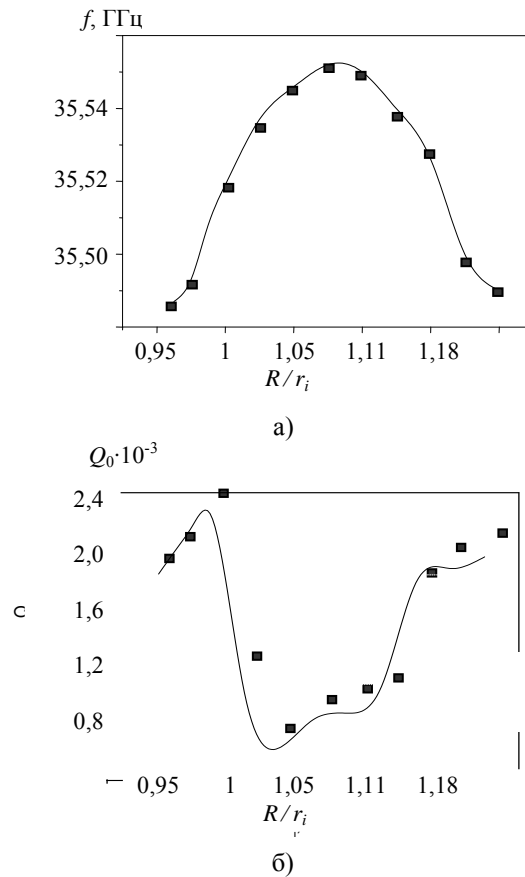


Рис. 1. Зависимость частоты (а) и добротности (б) вынужденных колебаний ШГ полудискового ДР от радиальной координаты щели связи [3]

На рис. 2 показаны фрагменты программного обеспечения эксперимента с представленными участками распределения полей колебаний ШГ в области, наиболее удаленной от металлического зеркала резонатора, полученные при трех положениях щели связи вдоль радиальной координаты, а именно, $R/r_i = 1$ (верхний фрагмент) – середина щели связи на краю полудиска; 1,08 (средний фрагмент) – середина щели связи в области максимума интенсивности поля колебаний; 1,18 (нижний фрагмент) – щель связи на спадающем участке поля внутри диэлектрического полудиска. Представленные данные соответствуют EH_{3511} -моду, для которой азимутальный индекс, соответствующий количеству вариаций поля, равен 35.

Для установления зависимости изменения интенсивности поля вынужденных колебаний в определенной точке от изменения радиальной координаты щели связи выбиралось фиксированное пятно поля на рис. 2, определялись координаты X и Y максимума интенсивности поля и относительная величина интенсивности поля в точке, удаленной от плоскости металлического зеркала на расстояние, равное радиусу резонатора. В последнем случае, таким образом, удавалось опре-

делить изменение радиационных потерь энергии, величина которых пропорциональна величине

интенсивности поля колебаний на поверхности диэлектрического полудиска.

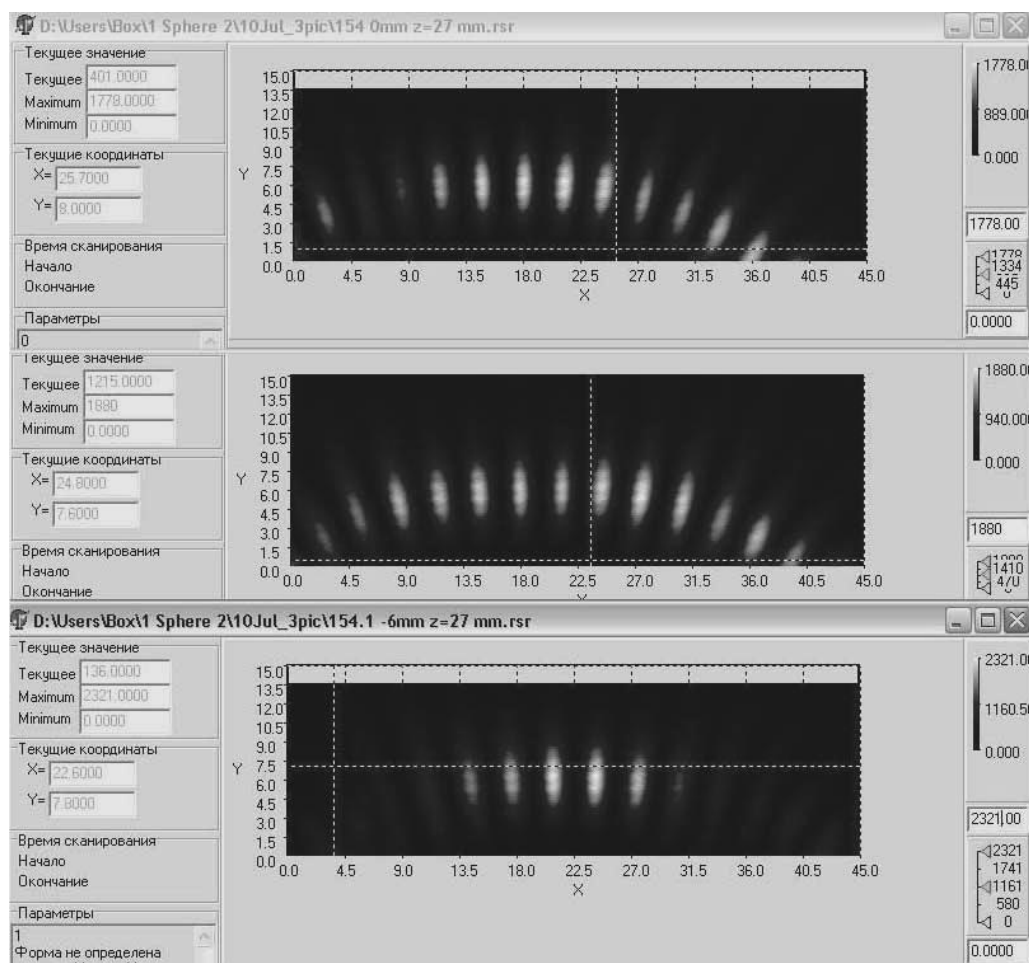


Рис. 2. Фрагмент программного обеспечения эксперимента с представленными участками распределения полей вынужденных колебаний ШГ в полудисковом ДР при разных положениях щели связи вдоль радиальной координаты

При расположении щели связи на краю полудиска ($R/r_i = 1$) координаты X и Y выбранного максимума интенсивности поля возбуждаемого колебания составляют 18,0 и 32,3 мм соответственно. При расположении щели в области максимума интенсивности электромагнитного поля ($R/r_i = 1,08$) они равны 17,88 и 32,1 мм. Для значения величины $R/r_i = 1,18$ они соответственно составляют 17,46 и 31,9 мм. Обозначая координаты X и Y выбранного максимума интенсивности поля возбуждаемого колебания и используя уравнение окружности, определялась радиальная координата r' максимума интенсивности электромагнитного поля для каждого из трех выбранных положений щели связи. При $R/r_i = 1$ радиальная координата максимума интенсивности поля $r' = 36,97$ мм. Для двух других положений щели связи ее значение составляет 36,60 мм ($R/r_i = 1,08$) и 36,3 мм ($R/r_i = 1,18$). Таким образом, при смеще-

нии щели связи к центру диэлектрического полудиска максимум интенсивности поля смещается вглубь диэлектрика. Смещению максимума интенсивности поля вынужденных колебаний соответствует понижение интенсивности поля на криволинейной поверхности резонатора на 15 % и, как следствие этого, понижение радиационных потерь энергии. С позиций геометрической оптики смещению максимума интенсивности поля колебаний соответствует изменение длины оптического пути луча вдоль криволинейной поверхности резонатора, вызванное смещением элемента возбуждения колебаний в резонаторе вдоль радиальной координаты. Изменение оптического пути луча приводит к изменению частотных характеристик резонатора, о чем свидетельствуют результаты исследований, представленные на рис. 1.

Результаты исследования границ области локализации полей вынужденных колебаний в

полудисковом КДР показали, что смещение щели связи не приводит к изменению их радиальных координат. Радиальная координата внутренней границы области локализации поля вынужденного колебания соответствует положению внутренней кустики, ограничивающей область локализации поля собственных колебаний ШГ в КДР. Их расчет осуществлялся с помощью известного соотношения [9]

$$a = nc / 2\pi f_n \sqrt{\varepsilon},$$

где a – радиус внутренней кустики; n – число вариций поля вдоль криволинейной поверхности резонатора; c – скорость света в вакууме; f_n – частота вынужденного колебания; ε – диэлектрическая проницаемость материала резонатора.

Для исследуемой моды $EH_{35\ 1\ 1}$ $cn = 35$ и частотой $f_n = 37,25$ ГГц, возбуждаемой в диэлектрическом полудиске с $\varepsilon = 2,08$, радиус внутренней кустики составляет $a \approx 31$ мм, что соответствует данным о положении внутренней границы области локализации поля вынужденного колебания.

Выводы. Таким образом, проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что на величину основных электродинамических характеристик вынужденных колебаний ШГ в открытых КДР могут оказывать влияние не только потери энергии, связанные с источником возбуждения (дифракционные потери на краях щели связи), но и изменение радиационных потерь, связанное с изменением положения источника вдоль радиальной координаты. С позиций геометрической оптики это означает, что существует связь между изменением радиальной координаты элемента связи и оптической длины пути прохождения луча в резонаторе вдоль его криволинейной поверхности. При этом распределение полей вынужденных колебаний представляет собой суперпозицию полей собственных колебаний и электромагнитного поля источника излучения (щели связи). Возбуждение вынужденных колебаний в КДР осуществляется вблизи частот его собственных мод.

1. Ильченко М. Е., Взятыйшев В. Ф., Гассанов Л. Г. и др. Диэлектрические резонаторы / Под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. Иванов Е. Н., Карачев А. А., Царапкин Д. П. Повышение эффективности возбуждения дисковых диэлектрических резонаторов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1987. – 30, № 10. – С. 68–69.
3. Когут А. Е., Матяш О. А. О возбуждении колебаний шепчущей галереи в полудисковом диэлектрическом резонаторе щелью связи в зеркале // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – 49, № 2. – С. 10–16.
4. Когут А. Е. Влияние условий и способов возбуждения полудискового диэлектрического резонатора на характеристики колебаний шепчущей галереи // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2007. – 50, № 5 – С. 22–30.
5. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах. – М.: Изд-во. иностр. лит., 1960. – 620 с.

6. Головащенко Р. В., Горошко Е. В., Варавин А. В. и др. Аппаратно-программный комплекс для спектроскопических исследований в миллиметровом диапазоне длин волн // 16-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006): Тез. докл. – Севастополь: Вебер, 2006. – С. 817–818.
7. Валитов Р. А., Дюбко С. Ф., Макаренко Б. И. и др. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника / Под ред. Р. А. Валитова, Б. И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.
8. Харьковский С. Н., Когут А. Е., Кутузов В. В. Возбуждение лучевых колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах с модами шепчущей галереи // Письма в журн. техн. физики. – 1997. – 23, № 15 – С. 25–29.
9. Вайнштейн Л. А. Теория дифракции и метод факторизации. – М.: Сов. радио, 1966. – 431 с.

ON DISTRIBUTION OF THE FORCED WHISPERING GALLERY MODES FIELDS EXCITED IN THE OPEN DIELECTRIC RESONATORS BY THE COUPLING SLOT IN THE METAL PLANE

R. V. Golovashchenko, E. V. Goroshko,
A. Ye. Kogut, V. V. Kutuzov

The results of the experimental investigations of the spectral and field characteristics of the forced whispering gallery modes excited in the open semidisk dielectric resonators by the local coupling element as the slot in the metal mirror of resonator are shown. The obtained results are carried out by the computerized measuring apparatus. It is shown that the electromagnetic characteristics of the forced oscillations of the dielectric resonators depend not only on the energy losses from the coupling element but on the radiation. The value of such radiation losses depends on the conditions of the modes excitation.

Key words: forced whispering gallery modes, open dielectric resonators, coupling element, distribution of the intensity of the mode fields, radiation losses.

ПРО РОЗПОДІЛ ПОЛІВ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ ШЕПОЧУЧОЇ ГАЛЕРЕЇ, ЩО ЗБУДЖУЮТЬСЯ У ВІДКРИТИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ ЩІЛИНОЮ ЗВ'ЯЗКУ В ДЗЕРКАЛІ

Р. В. Головащенко, О. В. Горошко, О. Є. Когут,
В. В. Кутузов

Наведено результати експериментального вивчення спектральних і енергетичних характеристик, а також розподіл полів вимушених коливань шепчучої галереї, що збуджуються у відкритих півдискових діелектричних резонаторах локальним елементом зв'язку у вигляді смісної щілини на металевому дзеркалі. Результати проведених досліджень одержані за допомогою комп'ютеризованого вимірювального стенду. Доведено, що на показники електродинамічних характеристик вимушених коливань діелектричних резонаторів впливають не тільки втрати енергії на елементі зв'язку, але й радіаційні втрати, величина яких залежить від умов збудження коливань.

Ключові слова: вимушені коливання шепчучої галереї, відкриті діелектричні резонатори, елемент зв'язку, розподіл інтенсивності полів коливань, радіаційні втрати енергії.

Рукопись поступила 17 августа 2009 г.