

УДК 621.372.8

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В ПОЛУШАРОВОМ ЭКРАНИРОВАННОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИЕЙ

А. Е. Когут, С. О. Носатюк, В. А. Солодовник, Р. С. Доля*

Институт радиофизики и электроники НАНУ, г. Харьков, Украина

Экспериментально исследованы электродинамические характеристики полусферового экранированного диэлектрического резонатора в 8-миллиметровом диапазоне длин волн. Для возбуждения мод шепчущей галереи в таком резонаторе предложено использование щелевой линии. Установлено, что предложенный способ возбуждения является эффективным и позволяет генерировать в экранированном диэлектрическом резонаторе высокочастотные колебания высших порядков, не внося дополнительных потерь энергии. Экспериментально доказано, что достигаемая собственная добротность исследуемого резонатора может превосходить пороговые значения, которые ограничены диссипативными потерями в его материале. Этот эффект обусловлен смещением резонансного поля в воздушный зазор между металлическим и диэлектрическим элементами резонатора. Продemonстрировано соответствие расчётных и экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых высокочастотных резонансных систем миллиметрового диапазона длин волн является одной из приоритетных задач современной радиофизики. Её решение имеет большое значение как для развития фундаментальных направлений сверхвысокочастотной (СВЧ) электродинамики, так и для создания СВЧ приборов и устройств с новыми или расширенными функциональными возможностями.

Хорошо известно, что открытые диэлектрические резонаторы с модами высших порядков типа шепчущей галереи характеризуются высокой собственной добротностью в миллиметровом диапазоне длин волн. Это послужило основой их широкого применения в твёрдотельных генераторах, усилителях, сумматорах мощности и измерителях диэлектрической проницаемости [1]. По причине низких радиационных потерь энергии добротность таких резонаторов ограничивается диссипативными потерями в их диэлектрическом материале. Преодолеть этот барьер позволяет переход к трёхслойным диэлектрическим резонаторам, которые представляют собой экранированные диэлектрические резонансные структуры с воздушным зазором между металлом и диэлектриком. В работах [2, 3] было показано, что при определённом соотношении радиусов шарового диэлектрического резонатора и сферического металлического экрана в такой резонансной системе возможно возбуждение сверхвысокочастотных мод шепчущей галереи. При этом достигаемая добротность может превосходить барьер, обусловленный потерями энергии в диэлектрическом материале резонатора. Ранее подобная реализация сверхвысокой добротности наблюдалась в оптическом диапазоне длин волн, а именно в резонаторах, используемых в лазерах, а также при измерении потерь в диэлектрических пластинах [4].

Для экранированных трёхслойных (диэлектрический резонатор—воздушный зазор—металлический экран) резонансных систем миллиметрового диапазона длин волн теоретически было показано, что снижение тепловых потерь в диэлектрике связано со смещением резонансного поля из

* kogut@ire.kharkov.ua

области диэлектрика в воздушный зазор. При этом поле в области металлического экрана пренебрежимо мало. Однако ранее комплексные экспериментальные исследования по подтверждению данного эффекта проведены не были. Выполненные ранее эксперименты, с одной стороны, показали возможность существования высокочастотных мод шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах при определённых способах их возбуждения. С другой стороны, они выявили ряд серьёзных проблемных вопросов, решению которых и посвящена данная работа.

Как показано в публикациях по изучению свойств диэлектрических резонаторов, их экранирование приводит к существенному сгущению спектра их колебаний [5]. Наряду с модами шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах существуют и так называемые лучевые колебания [6]. Их название связано с представлениями геометрической оптики. Пучок волн, формирующий эти колебания, может быть представлен в виде разных N -угольников, вписанных в окружность резонатора. По своей природе они близки к модам шепчущей галереи. Однако их поля проникают в диэлектрик глубже, чем поля мод шепчущей галереи, а размеры областей локализации их полей во многом определяются характеристиками источника возбуждения. При отсутствии металлического экрана лучевые колебания в диэлектрических резонаторах не возбуждаются из-за невыполнения условия полного внутреннего отражения волн на криволинейной поверхности диэлектрической структуры.

Как показано в работе [6], густота спектра колебаний экранированных диэлектрических резонаторов может быть настолько существенна, что на отдельных участках резонансные отклики отдельных колебаний перекрываются. С прикладной точки зрения это означает возможность появления неконтролируемых изменений частоты.

Вторым проблемным вопросом является возбуждение высокочастотных мод шепчущей галереи в диэлектрических резонаторах. Известно, что наиболее эффективным способом такого возбуждения является использование локальных элементов связи, расположенных в области локализации полей этих мод. Однако в этом случае наблюдается существенное уменьшение добротности диэлектрического резонатора из-за высоких радиационных потерь энергии на элементе возбуждения [7]. В связи с этим важной задачей является поиск новых эффективных методов возбуждения, не приводящих к появлению дополнительных потерь энергии.

1. ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований схематически представлен на рис. 1.

Он представляет собой полусферовой диэлектрический резонатор 1, изготовленный из фторопласта-4 (диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2,08$), с радиусом $R_1 = 39$ мм. Со стороны сферической поверхности диэлектрический резонатор располагался внутри полусферической полости с радиусом $R_2 = 42$ мм в металлическом экране 2. Таким образом, между диэлектрическим резонатором и экраном существует тонкий воздушный зазор 3 с толщиной 3 мм. Именно при таком соотношении размеров диэлектрического резонатора и экрана ранее была показана возможность существования сверхвысокочастотных мод шепчущей галереи [3]. Плоскими основаниями экранированный диэлектрический резонатор располагался на двух локальных плоских проводящих зеркалах 4 и 5, изготовленных из латуни (рис. 1). Их длина и ширина составляют 50 мм, а толщина — 4 мм. Положение зеркал могло изменяться вдоль радиальной координаты таким образом, что они лишь частично покрывали плоское основание экранированного диэлектрического резонатора. Однако размеры локальных зеркал позволяли при их смещении вдоль радиальной координаты перекрывать области локализации полей мод шепчущей галереи, возбуждаемых в исследуемом резонаторе. Характерным при этом является размер L частей локальных зеркал, расположенных со стороны плоского основания диэлектрического полушара. В эксперименте величина

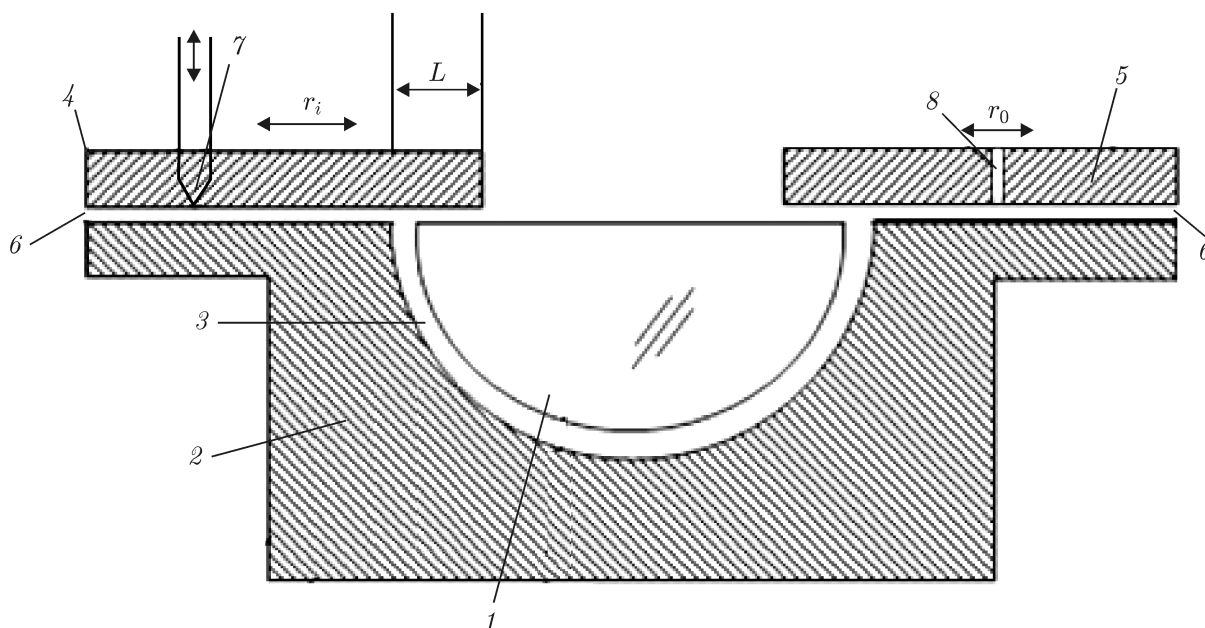


Рис. 1. Объект экспериментальных исследований

$L \geq 12$ мм. Крепление диэлектрического полушара внутри металлического экрана не показано на рис. 1. Оно осуществлялось с помощью соединительного устройства — фторопластового бруска, края которого закреплялись прижимными винтами к верхней плоскости металлического экрана в направлении, перпендикулярном плоскости сечения резонансной системы согласно рис. 1, а середина соединялась с плоским основанием диэлектрического полушара посредством винта. Последний располагался в центре основания диэлектрического полушара, т. е. в области, где поля мод шепчущей галереи отсутствуют.

Естественный тонкий щелевой зазор 6 между проводящими зеркалами 4 и 5 с одной стороны и плоским основанием металлического экрана 2 (рис. 1) с другой стороны представляет собой линию передачи энергии СВЧ поля. По этой причине такую линию передачи в дальнейшем будем называть щелевой линией. Её толщина в эксперименте регулировалась специальными прижимными устройствами и могла изменяться в интервале от 30 до 50 мкм. Энергия к щелевой линии подводилась от генераторного модуля панорамного измерителя коэффициента стоячей волны (КСВ) посредством щели связи 7. Последняя имела размеры $7,2 \times 0,5$ мм и располагалась в локальном металлическом зеркале 4. Её радиальная координата r_i в эксперименте изменялась путём смещения экранированного диэлектрического резонатора на металлическом зеркале 4.

Исследования проведены в полосе частот $33,5 \div 37,5$ ГГц методом «на отражение». Экспериментально определялись резонансные частоты и относительная амплитуда резонансного отклика, регистрируемого на экране панорамного измерителя КСВ. Значения амплитуды резонансного отклика в единицах измерителя КСВ позволяли определять величину параметра связи p [8]. Как правило, он определяет эффективность возбуждения одномодовых резонаторов. Исследуемый в данной работе резонатор является многомодовым. Поэтому под термином «параметр связи» будем понимать эффективность возбуждения многомодового резонатора на конкретной исследуемой моде. Его значение определяется в соответствии с показателями измерителя КСВ выбранного резонансного отклика.

Частота измерялась с помощью волномера на основе объёмного перестраиваемого резонатора, включённого в цепь измерительной линии. Добротность определялась резонансным методом

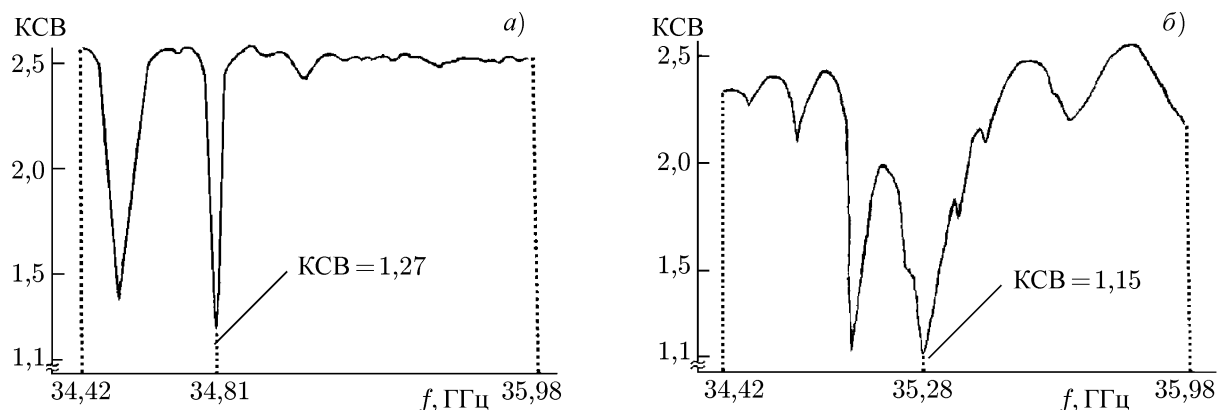


Рис. 2. Спектральные характеристики исследуемого резонатора

измерения полного сопротивления [8]. Погрешность определения добротности в эксперименте не превышала 15 %. Случайная погрешность минимизировалась путём многократных измерений на разных резонансных частотах при различном расположении щели связи вдоль радиальной координаты.

Щель связи располагались в стенках щелевой линии таким образом, что в исследуемом экранированном диэлектрическом резонаторе преимущественно формировались ТМ-моды.

Распределение поля мод в экранированном диэлектрическом резонаторе измерялось модифицированным методом малой поглощающей неоднородности — методом подвижной пассивной щели [9, 10]. Для этого в локальном зеркале 5 располагалась пассивная щель 8 (рис. 1), которая играла роль пробного тела. Она также, как и щель связи 7, могла менять своё положение вдоль радиальной координаты. Для этого локальное зеркало 5, в котором она находилась, было сделано подвижным.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБЪЯСНЕНИЕ

При возбуждении исследуемого резонатора щелевой линией в спектре его колебаний присутствуют резонансные частоты ТМ_{nml} мод шепчущей галереи с почти постоянным межчастотным интервалом, близким к 1 ГГц. Значения полярного индекса n соседних по частоте мод отличаются на единицу. Поля мод шепчущей галереи, возбуждаемых в полушаровом диэлектрическом резонаторе локальным источником или элементом связи, как показано в [11], локализируются на криволинейной поверхности резонатора в узких областях, по форме напоминающих нерегулярные пояски с сужениями в области источника и его отображения на диаметрально противоположной стороне полушара и расширением между ними. Азимутальный индекс m таких мод определяет число вариаций поля на поперечном сечении такого пояска. В данной работе рассматриваются моды, для которых азимутальный индекс $m = 1$. В исследуемом резонаторе в представленной выше полосе частот возбуждались лишь колебания с радиальным индексом $l = 1$. Проведённые ранее экспериментальные исследования по изучению свойств подобного открытого диэлектрического резонатора показали, что в рассматриваемой полосе частот возбуждаются ТМ-моды с полярными индексами $33 < n < 38$. Таким образом, исследуемые в данной работе моды шепчущей галереи характеризуются следующим набором индексов: полярный индекс $33 < n < 38$, азимутальный индекс $m = 1$ и радиальный индекс $l = 1$.

На рис. 2а представлены спектральные характеристики исследуемого резонатора с локальными проводящими зеркалами в ограниченном интервале частот. Для сравнения на рис. 2б показан

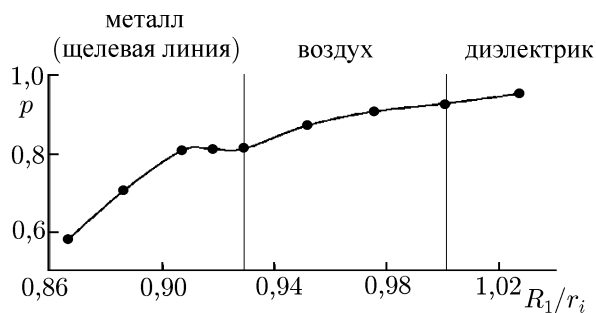


Рис. 3. Зависимость параметра связи p на частоте $f \approx 35,5$ ГГц от R_1/r_i

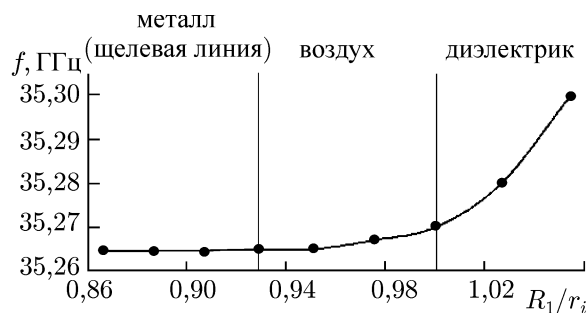


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты в окрестности 35,5 ГГц от R_1/r_i

спектр колебаний подобного резонатора со сплошным металлическим зеркалом.

Как видно, использование локальных зеркал позволяет существенно разредить спектр вынужденных колебаний с приоритетным выделением мод шепчущей галереи. Другие типы мод (лучевые), поля которых локализуются глубже в области диэлектрика, в рассматриваемом экранированном диэлектрическом резонаторе не возбуждались по причине высоких радиационных потерь их энергии. Резонансный отклик на частоте 34,81 ГГц, представленный на рис. 2а, соответствует ТМ-моду шепчущей галереи с полярным индексом $n = 35$. Другой резонансный отклик, представленный на рис. 2а (на более низкой частоте), как показали результаты исследования распределения полей, соответствует моде, поле которой локализовано в воздушном зазоре исследуемого экранированного диэлектрического резонатора. Как видно, данная мода является менее добротной по сравнению с модой шепчущей галереи. По этой причине подобные моды в данной работе не исследовались.

Отличительной особенностью использования щелевой линии для возбуждения мод шепчущей галереи в диэлектрическом резонаторе в данной работе (по сравнению с предшествующими работами, в которых для этой цели использовались линии передачи, ограниченные проводящими плоскостями [11, 12]) является подвод энергии внешнего поля непосредственно к области локализации поля в диэлектрическом резонаторе (по аналогии с возбуждением открытых диэлектрических резонаторов на низших модах микрополосковыми линиями [13, 14]). По этой причине такой способ возбуждения колебаний диэлектрических резонаторов является более эффективным с точки зрения обеспечения высоких значений параметра связи. Об этом свидетельствует график зависимости последнего от относительного значения R_1/r_i радиальной координаты щели связи (рис. 3). Расположение щели связи в центре диэлектрического полушара соответствует значению радиальной координаты середины щели связи $r_i = 0$.

Видно, что, несмотря на то, что элемент возбуждения колебаний находится за пределами резонатора (на расстояниях, меньших длины волны), щелевая линия обеспечивает высокие значения параметра связи, близкие к наибольшим значениям, достигаемым при расположении щели связи в области максимума поля внутри диэлектрического резонатора. Это связано с проникновением резонансного поля мод в щелевую линию. При этом щель связи возмущает его слабо. Об этом свидетельствует график зависимости резонансной частоты от относительного значения R_1/r_i радиальной координаты щели связи (рис. 4).

Как видно из представленного графика, щель связи, расположенная в щелевой линии (т. е. за пределами резонатора), слабо возмущает резонансную частоту. В то же время её расположение внутри резонатора приводит к заметному изменению резонансной частоты. Это позволяет предположить, что дифракционные потери энергии на краях щели связи при её расположении в щелевой линии будут минимальными по сравнению со случаем её расположения внутри резонатора,

т. е. на участках более сильного поля. Общие потери энергии в рассматриваемом экранированном диэлектрическом резонаторе позволяют оценить зависимость его собственной добротности от величины R_1/r_i . Данная зависимость графически представлена на рис. 5.

Видно, что наибольшая добротность достигается при расположении щели связи в щелевой линии. Расположение щели связи внутри резонатора приводит к существенному понижению величины Q_0 . Как показано в работе [7], это связано с ростом дифракционных потерь энергии на краях локального элемента возбуждения при его расположении на участках сильного резонансного поля.

Интересно отметить следующий факт: при возбуждении мод шепчущей галереи в исследуемом экранированном диэлектрическом резонаторе щелевой линией (когда щель связи расположена вне резонатора) достигаемая добротность превосходит пороговые значения, обусловленные потерями энергии в диэлектрическом материале резонатора. Такая пороговая добротность для открытого диэлектрического резонатора с теми же параметрами есть $Q_0 \approx 5,6 \times 10^3$. Полученный результат может быть объяснён особенностями распределения полей мод.

На рис. 6 представлено радиальное распределение амплитуды моды A_0 на фиксированной частоте 35,3 ГГц в виде графика её зависимости от относительной радиальной координаты R_1/r_0 пробного тела — пассивной щели 8 в подвижном локальном зеркале 6 согласно рис. 1. Для удобства анализа экспериментальные точки соединены сплошной линией. Измерения проводились при двух различных положениях щели связи внутри щелевой линии. Экспериментальные результаты, полученные при радиальной координате щели связи $R_1/r_i = 0,886$, представлены квадратами, при $R_1/r_i = 0,95$ — треугольниками.

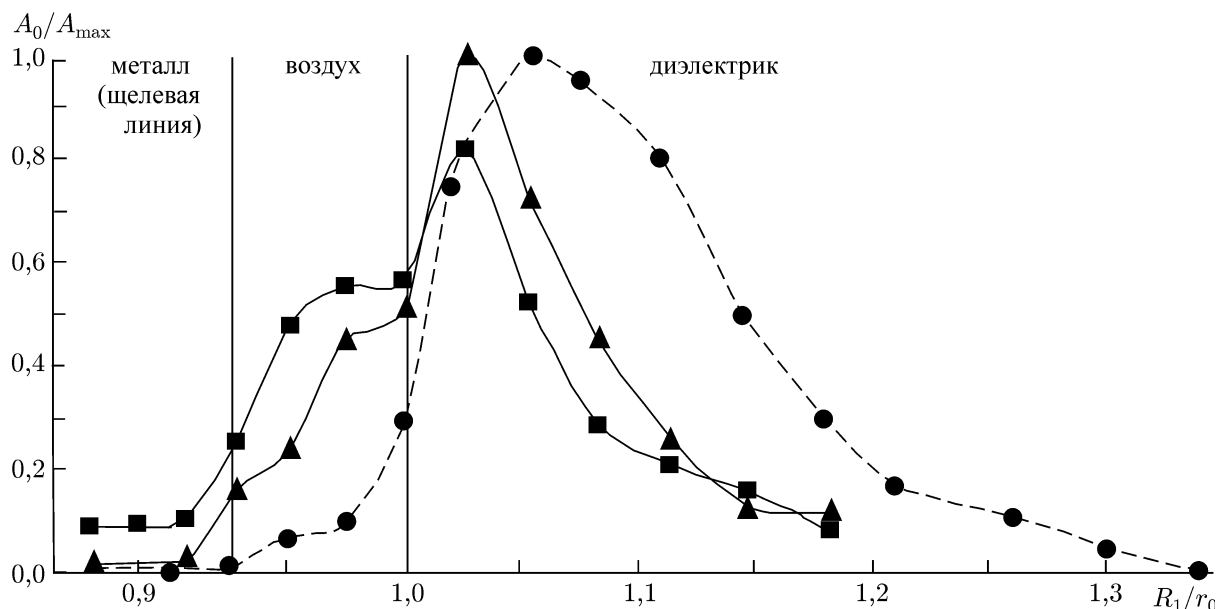


Рис. 5. Зависимость собственной добротности Q_0 диэлектрического резонатора от величины R_1/r_i

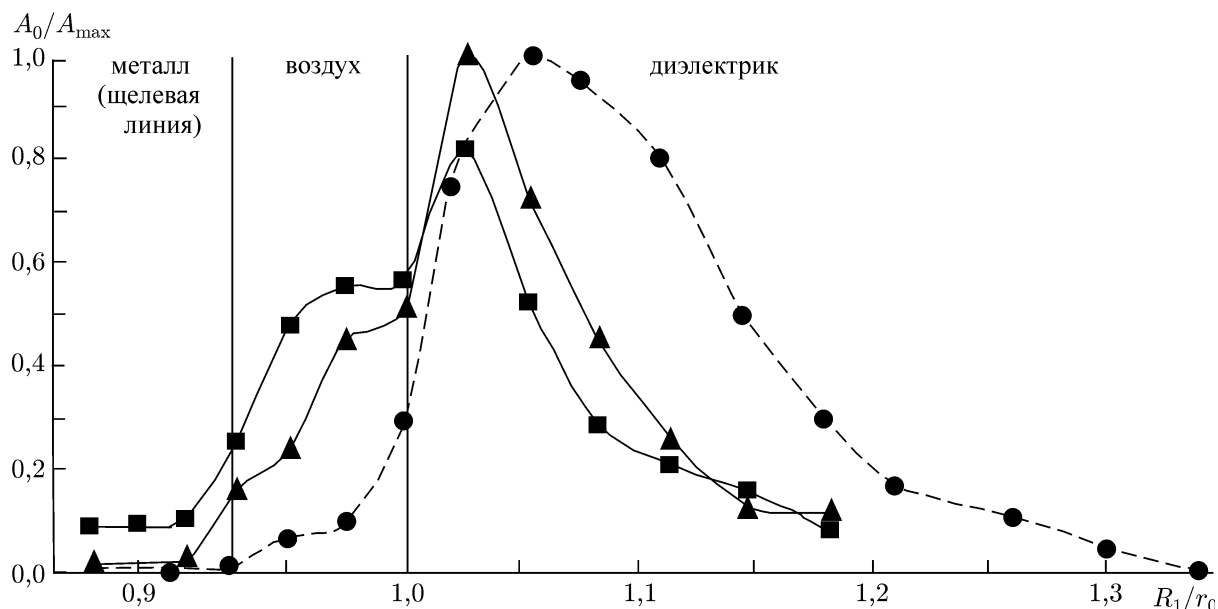


Рис. 6. Зависимость амплитуды резонансного отклика A_0 , приведённой к её максимальному значению $A_{\max}$, от относительной радиальной координаты R_1/r_0

При различных положениях щели связи внутри щелевой линии наблюдается схожее распределение резонансного поля. Характерным для него является смещение резонансного поля колебаний в воздушный зазор. Вследствие этого потери энергии в материале резонатора снижаются по сравнению с подобным открытым диэлектрическим резонатором. Распределение поля в последнем представлено на рис. 6 пунктирной кривой. Видно, что в открытом полусферовом диэлектрическом резонаторе резонансное поле в основном сконцентрировано внутри диэлектрического материала резонатора.

Необходимо отметить, что вблизи металлического экрана резонатора плотность энергии резонансного поля достаточно мала, что позволяет не учитывать омические потери энергии.

Подобные спектральные и энергетические характеристики исследуемого экранированного полусферового диэлектрического резонатора были получены и на других резонансных частотах.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнуто возбуждение сверхвысокодобротных мод шепчущей галереи в экранированном полусферовом диэлектрическом резонаторе путём использования щелевой линии. Исследованы спектральные и энергетические характеристики, а также распределения полей такого резонатора. Для разрежения частотного спектра вынужденных колебаний экранированного диэлектрического резонатора предложено использование системы локальных проводящих зеркал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильченко М. Е., Взятых В. Ф., Гассанов Л. Г. и др. Диэлектрические резонаторы. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
2. Когут А. Е., Филиппов Ю. Ф., Кутузов В. В. и др. // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАНУ, 1999. Т. 4, № 3. С. 90.
3. Kharkovsky S. N., Filippov Yu. F., Eremenko Z. E., et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Techniques. 2002. V. 50, No. 11. P. 2647.
4. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966. 476 с.
5. Когут А. Е., Кутузов В. В., Солодовник В. А. и др. // Письма в Журн. техн. физ. 2001. Т. 27, № 22. С. 19.
6. Харьковский С. Н., Когут А. Е., Кутузов В. В. // Письма в Журн. техн. физ. 1997. Т. 23, № 15. С. 25.
7. Когут А. Е. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2007. Т. 50, № 5. С. 22.
8. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 519 с.
9. Валитов Р. А., Дюбко С. Ф., Макаренко Б. И. и др. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника. М.: Радио и связь, 1984. 296 с.
10. Когут А. Е., Еременко З. Е., Филиппов Ю. Ф. и др. // Журн. техн. физ. 2004. Т. 74, № 4. С. 94.
11. Харьковский С. Н., Когут А. Е., Солодовник В. А. // Письма в Журн. техн. физ. 1995. Т. 21, № 18. С. 38.
12. Гольдберг Л. Б. // Электронная техника. Сер. «Электроника СВЧ». 1983. Вып. 7. С. 41.
13. Скресанов В. Н., Головащенко Р. В., Нечаев О. Г. // Радиофизика и электроника. 2007. Т. 12, № 3. С. 508.
14. Bijumon P. V., Menon S. K., Sebastian M. T., etc. // Microwave Opt. Technol. Lett. 2002. V. 35. P. 327.
15. Saed M., Yadla R. // Progr. Electromag. Res. 2006. V. 56. P. 151.

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г.; принята в печать 1 апреля 2014 г.

**EXCITATION OF HIGH-Q WHISPERING GALLERY MODES
IN A HEMISPHERICAL SHIELDED DIELECTRIC CAVITY USING
A SLOT TRANSMISSION LINE**

A. E. Kogut, S. O. Nosatyuk, V. A. Solodovnik, and R. S. Dolya

We studied experimentally the electrodynamic characteristics of a hemispherical shielded dielectric cavity in the 8-mm wavelength range. The use of a slot transmission line is proposed to excite whispering gallery modes in such a cavity. It was found that the proposed excitation method is efficient and allows one to generate high-Q higher modes in a shielded dielectric cavity introducing no additional energy losses. It was shown experimentally that the achieved intrinsic Q-factor of the cavity under consideration can exceed threshold values limited by the dissipative losses in its material. This effect is determined by the shift of the resonance field to the air gap between the metal and dielectric elements of the cavity. Agreement of the calculated and experimental data is demonstrated.