

А. Е. Когут<sup>1</sup>, Р. С. Доля<sup>1</sup>, С. О. Носатюк<sup>1</sup>, Хе Джаочан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

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

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

<sup>2</sup>Восточно-Китайский НИИ «Фотоэлектроника»

## ВОЗБУЖДЕНИЕ МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В ЭКРАНИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИЕЙ

Экспериментально исследованы спектральные и энергетические характеристики экранированного полусферического резонатора в режиме вынужденных колебаний типа шепчущей галереи при их возбуждении щелевой линией. Показано, что использование щелевой линии позволяет максимально разредить спектр вынужденных колебаний экранированных резонаторов с исключительным выделением мод шепчущей галереи и достичь наибольшей добротности. Путем экспериментальных исследований и компьютерного моделирования показано, что щелевая линия является волноведущим каналом, обладающим резонансными свойствами. Ил. 6. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** экранированный диэлектрический резонатор, колебания шепчущей галереи, щелевая линия, электродинамические характеристики.

Диэлектрические резонаторы (ДР) цилиндрической и сферической формы с модами шепчущей галереи (ШГ), а также их половины, расположенные на плоском проводящем зеркале, обладают признанными достоинствами в миллиметровом диапазоне длин волн. Благодаря своей высокой добротности они нашли применение в ряде активных и пассивных устройств СВЧ-техники [1, 2]. Наибольший интерес с прикладной точки зрения, исходя из задач электромагнитной совместимости, представляют собой экранированные ДР с модами ШГ. Однако в настоящее время существует целый ряд нерешенных задач, затрудняющих их использование.

Экранирование ДР неизбежно приводит к существенному сгущению спектра вынужденных мод. Наряду с высокодобротными модами ШГ в таких резонаторах возбуждаются и так называемые лучевые колебания, физическая природа которых близка к природе мод ШГ [3]. Они также формируются волнами, распространяющимися вдоль криволинейной поверхности ДР, и с позиций геометрической оптики могут быть представлены в виде  $N$ -угольников, вписанных в окружность резонатора. В отличие от мод ШГ, поля лучевых колебаний глубже локализованы в материале диэлектрика, хотя и имеют с ними общие области, существование которых позволяет одновременно возбуждать как моды ШГ, так и лучевые колебания. Области локализации их полей не имеют ограничения каустическими поверхностями, как в случае мод ШГ, а определяются излучающими свойствами источника и геометрическими параметрами резонатора. Кроме лучевых колебаний в экранированных ДР могут также возбуждаться колебания типа «бильярд» и «прыгающий мячик» [3, 4].

Существующие способы разрежения спектра вынужденных колебаний, такие как использование локальных проводящих зеркал, погло-

щающих материалов для подавления паразитных мод колебаний являются недостаточно эффективными [5].

Используемые способы возбуждения мод ШГ в ДР обладают значительными недостатками [1, 2, 6]. С одной стороны, повышение эффективности возбуждения таких мод колебаний в ДР, достигаемое путем расположения локального элемента возбуждения в виде щели связи на проводящем зеркале ДР в области пучности поля мод ШГ, приводит к снижению добротности по причине существенных дифракционных потерь энергии на краях элемента возбуждения. С другой стороны, широко используемая распределенная связь с диэлектрическим волноводом не позволяет достичь высоких значений параметра связи. Вследствие этого эффективность возбуждения мод ШГ в ДР невысока.

Решить одновременно две данные задачи для экранированных ДР позволяет использование щелевой линии. Как было показано в работах [7, 8], щелевая линия позволяет достигать высоких значений параметра связи подводящего волновода с полями колебаний в резонаторе и не вносить дополнительных потерь энергии. Однако физические явления, возникающие в экранированных ДР при таком способе их возбуждения, изучены недостаточно. Кроме того, недостаточно изучены возможности использования щелевой линии для разрежения спектра вынужденных мод экранированных ДР разных форм.

**1. Объект и методика исследования.** Схематически объект исследований представлен на рис. 1. Им является экранированный резонатор. В эксперименте исследовались резонаторы как с воздушным заполнением полости в металле, так и при частичном заполнении диэлектрической резонансной структурой. Ранее в работах [7, 9] было показано, что при определенном соотношении размеров и форм металлического экрана и

диэлектрической резонансной структуры, расположенной внутри металлического экрана, возможно возбуждение «сверхвысокодобротных» мод ШГ, добротность которых превосходит добротность резонансных систем на основе подобных открытых ДР. Обнаруженный эффект определялся смещением резонансного поля из области диэлектрика в тонкий воздушный зазор между диэлектрической резонансной структурой и металлическим экраном. Кроме того, известно [10], что сам полый металлический экран в форме сферы, радиус кривизны которого значительно превосходит длину волны, обладает резонансными свойствами по отношению к высокодобротным модам ШГ.

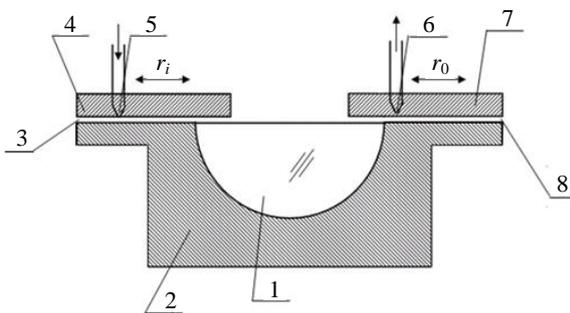


Рис. 1. Объект экспериментальных исследований

Итак, экспериментально исследовались электродинамические характеристики экранированных резонаторов на основе полусферической полости 1 в бруске алюминия 2 радиусом  $R_1 = 42$  мм (рис. 1). Для исследований были выбраны резонаторы как с воздушным заполнением полусферической полости (полый металлический экран), так и с ее частичным заполнением диэлектрической резонансной структурой в виде полушара радиусом  $R_2 = 39$  мм, выполненного из фторопласта-4 ( $\epsilon = 2,08$ ) (полушаровый экранированный ДР). Диэлектрический полушар располагался внутри металлической полости таким образом, что центры их плоских оснований совпадали. Между диэлектрическим полушаром и металлическим экраном образовывался воздушный зазор толщиной 3 мм. Именно в таком экранированном ДР, как было показано ранее, возможно существование «сверхвысокодобротных» мод ШГ. Открытую часть полости, согласно рис. 1, частично покрывали плоские локальные латунные зеркала 4 и 7 с размерами, близкими к  $50 \times 50 \times 4$  мм, с незначительным отличием длины (вдоль радиальной координаты) до 0,5 мм. Их размеры и расположение выбирались согласно ранее проведенным исследованиям, представленным в работах [7, 8]. Как было ранее показано, использование подобных локальных зеркал в экранированных ДР способствует разрежению

спектра вынужденных колебаний от мод, поля которых локализованы вблизи центра плоского основания резонатора.

Возбуждение мод ШГ в исследуемых экранированных резонаторах осуществлялось с помощью тонкого щелевого зазора 3 между плоским основанием металлического экрана резонатора и локальным металлическим зеркалом 4, который представляет собой волноведущую линию, названную «щелевой линией» [7, 8]. Толщина щелевой линии регулировалась специальным прижимным устройством (на рис. 1 не показано) в интервале 30...60 мкм. Элементом возбуждения служила щель связи 5 в виде открытого конца суженного металлического волновода с размерами  $7,2 \times 0,5$  мм в локальном зеркале 4. Возбуждающая щель связи внутри щелевой линии могла изменять свое положение вдоль радиальной координаты  $r_i$  путем смещения самого локального зеркала, в котором она располагалась. Вывод энергии резонансного поля из экранированного ДР осуществлялся посредством приемной щели связи 6 с размерами  $7,2 \times 0,5$  мм в локальном зеркале 7. Приемная щель связи 6, также как и возбуждающая щель связи 5, располагалась в щелевой линии на противоположной стороне открытого основания экранированного резонатора и также была подвижной в радиальном направлении (координата  $r_0$ ).

Исследования проводились в полосе частот 32...37 ГГц. Экспериментальным путем исследовались зависимости резонансных частот  $f_n$ , коэффициента ослабления  $A$  сигнала на собственной частоте используемых резонаторов и нагруженной добротности  $Q_n$  от радиальной координаты  $r_0$  приемной щели связи при фиксированной радиальной координате  $r_i$  возбуждающей щели связи. Значения резонансных частот определялись с помощью внешнего волномера на основе перестраиваемого объемного резонатора на резонансной частоте, по коэффициенту ослабления сигнала (в дБ), который отображается на экране индикаторного модуля панорамного измерителя КСВН. Для определения нагруженной добротности  $Q_n$  использовался резонансный метод — измерения полного сопротивления [11]. Возбуждающая щель связи и приемная щель связи, представляющие собой элементы подвода и вывода энергии, располагались в стенках «щелевой линии» таким образом, что в исследуемых резонаторах преимущественно формировались поля ТМ-колебаний.

Помимо экспериментальных исследований проводилось и компьютерное моделирование волновых процессов в исследуемом резонаторе и связанной с ним щелевой линией как в области расположения источника возбуждения колебаний, так и в области приемной щели связи.

Компьютерное моделирование осуществлялось на базе стандартного пакета программного обеспечения *CST Microwave Studio 2011* Восточно-Китайского НИИ «Фотоэлектроника».

**2. Результаты и их объяснение.** Превосходство предложенной методики возбуждения мод ШГ в экранированных ДР по сравнению с другими существующими (с точки зрения решения задач разрежения спектра вынужденных колебаний и достижения высокой добротности) наглядно демонстрируют результаты, представленные ниже. На рис. 2, а представлены спектрограммы при возбуждении колебаний в полусферовом экранированном ДР с помощью щелевой линии (возбуждающая и приемная щели связи располагались за пределами резонатора таким образом, что их радиальные координаты составляли  $r_i = -4$  мм и  $r_0 = -2$  мм, соответственно). Поскольку поля колебаний, отличных от мод ШГ, локализованы в середине резонатора, а подвод энергии внешнего электромагнитного поля осуществляется к его краям (в область локализации полей мод ШГ), то при использовании щелевой линии они не возбуждаются. Таким образом, в спектре вынужденных колебаний полусферового экранированного ДР удается выделить лишь только моды ШГ.

Для сравнения на рис. 2, б представлен спектр вынужденных колебаний данного резонатора, возбуждаемого щелью связи, расположенной внутри резонатора ( $r_i = 2$  мм,  $r_0 = -2$  мм). Видно, что его густота существенно затрудняет выделение приоритетных мод ШГ. Как отмечалось ранее, в спектре присутствуют колебания, физическая природа которых отлична от мод ШГ.

Как видно из рис. 2, эффективность возбуждения мод ШГ в экранированном резонаторе щелевой линией достаточно высока, поскольку амплитуда резонансного отклика мало отличается от амплитуды резонанса при возбуждении колебаний локальным источником, расположенным внутри резонатора в области «сильного» поля.

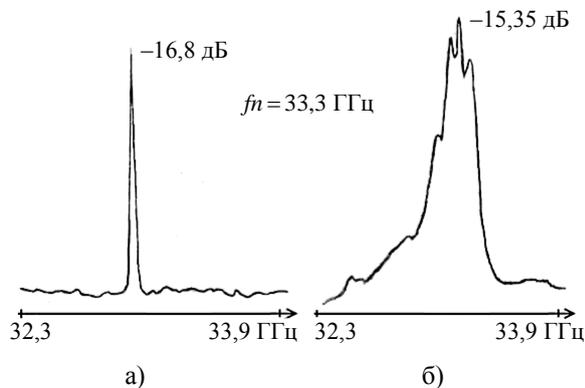


Рис. 2. Спектры вынужденных колебаний полусферового экранированного ДР при возбуждении щелевой линией (а) и щелью связи (б)

Для оптимизации связи щелевой линии с экранированными резонаторами, а именно для выбора взаимного расположения возбуждающей и приемной щелей связи, экспериментально исследовалась зависимость коэффициента ослабления  $A$  сигнала на резонансной частоте экранированного ДР от радиальной координаты возбуждающей щели связи в щелевой линии при фиксированном положении приемной щели связи. Результаты исследования данной зависимости для возбуждения полого металлического экрана щелевой линией представлены графически на рис. 3. Приемная щель связи располагалась в щелевой линии (за пределами резонатора) на расстоянии 2 мм от его края ( $r_0 = -2$  мм). Представленные результаты соответствуют резонансной частоте  $f_n \approx 33,3$  ГГц.

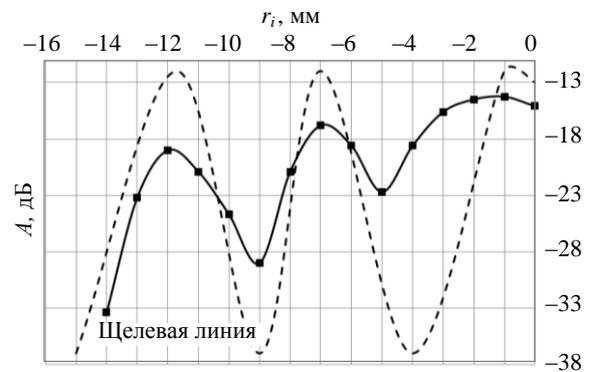


Рис. 3. Распределение интенсивности резонансного поля в щелевой линии с возбуждающей щелью связи

Видно наличие максимумов и минимумов коэффициента ослабления, которые характеризуются соответствующим распределением поля внутри щелевой линии. Очевидно, что наибольшая связь достигается при расположении щели связи в пучности поля щелевой линии. Таким образом, представленный график позволяет судить не только об эффективности возбуждения мод ШГ в исследуемом резонаторе, но и качественно оценить распределение поля в самой щелевой линии. Как видно, оно носит резонансный характер, поскольку формируется стоячей волной. На это указывает характерное периодическое чередование максимумов и минимумов с интервалом, соответствующим половине длины волны. Видно, что наибольшая связь щелевой линии с исследуемым резонатором достигается при расположении возбуждающей щели связи в щелевой линии на расстоянии 2 мм от края металлического экрана ( $r_i = 2$  мм). Интересно отметить сравнительно малое затухание волны в щелевой линии, поскольку значения коэффициента ослабления сигнала на частоте исследуемого резонатора в различных точках максимума отличаются незначительно. Даже при расположении возбужда-

шей щели связи в щелевой линии на расстояниях, превышающих длину волны, удается достаточно эффективно возбуждать моды ШГ полого металлического экрана.

Наличие интерференционной картины резонансного поля как в исследуемом резонаторе, так и в щелевой линии, подтверждают результаты компьютерного моделирования, представленные на рис. 4.

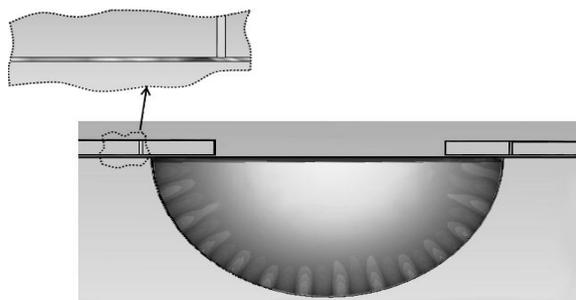


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования распределения резонансного поля

Внутри резонансной полости металлической полусферы и в щелевой линии в области расположения возбуждающей щели связи обнаруживаются узлы и пучности полей. На рис. 3 приведена кривая (пунктир), которая качественно описывает распределение поля внутри щелевой

линии. Проведенный расчет подтверждает экспериментальные результаты (сплошная линия). Радиальные координаты максимумов и минимумов полей, полученных экспериментальным путем и с помощью компьютерного моделирования, между собой хорошо согласуются.

Практический интерес вызывает задача изучения эффективности возбуждения мод ШГ в исследуемых резонаторах при изменении положения приемной щели связи в щелевой линии вдоль радиальной координаты и фиксированном положении возбуждающей щели связи. На рис. 5 представлена графически зависимость коэффициента ослабления  $A$  сигнала на резонансных частотах экранированных резонаторов от радиальной координаты  $r_0$  приемной щели связи. Возбуждающая щель связи располагалась в точке с радиальной координатой  $r_i = -2$  мм. Приемная щель связи могла располагаться как в щелевой линии (за пределами резонатора), так и в области поля резонатора (внутри резонансной полости). Сплошной линией соединены значения, полученные для металлического экрана, пунктиром – для полусферового экранированного ДР.

Интересно, что данная зависимость позволяет не только оценить эффективность возбуждения мод ШГ в исследуемых резонаторах, но и изучить распределение интенсивности резонансного поля внутри резонатора.

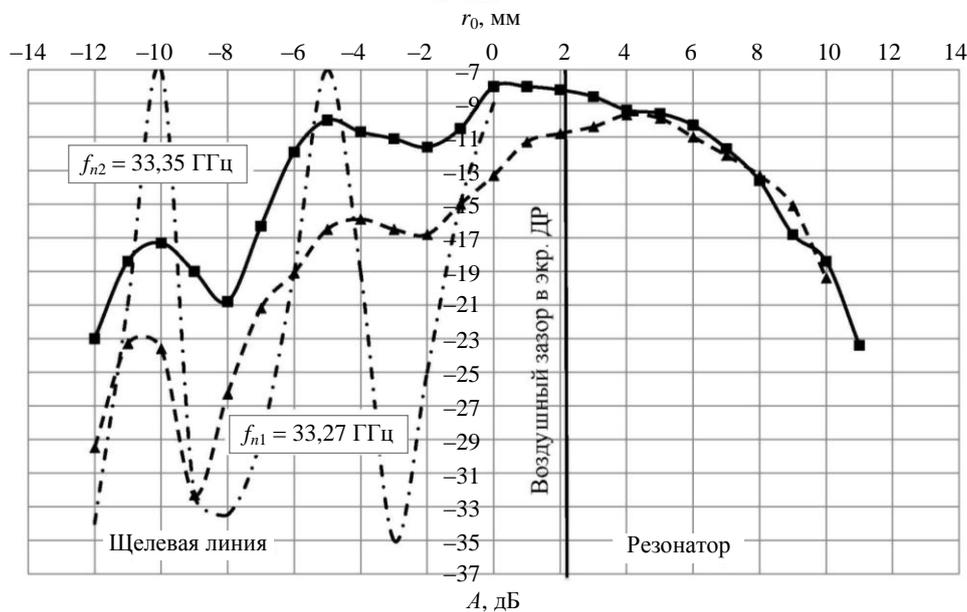


Рис. 5. Эффективность возбуждения мод ШГ в экранированных резонаторах щелевой линией

Из графиков рис. 5 следует, что по сравнению с полусферовым экранированным ДР резонансное поле полого металлического экрана локализовано вблизи границы раздела сред металл-воздух, в то время как в полусферовом экраниро-

ванном ДР максимум интенсивности резонансного поля удален от края резонатора и располагается внутри диэлектрической резонансной структуры. Этим определяется и более эффективное возбуждение щелевой линией мод ШГ в полном металли-

ческом экране, поскольку источник возбуждения (возбуждающая щель связи) вынесен за пределы резонатора.

Также видно, что внутри щелевой линии, в которой располагается приемная щель связи, наблюдается интерференционная картина резонансного поля, подобная отмеченной выше в щелевой линии с возбуждающей щелью связи. При сравнении данных, представленных на рис. 3 и 5, можно отметить, что распределение поля на частоте исследуемых резонаторов внутри щелевых линий с возбуждающей и приемной щелями связи могут отличаться. Это может быть обусловлено двумя причинами, а именно незначительным отличием размеров щелевых линий и области расположения в них возбуждающей и приемной щелей связи. Это приведет к различию фазовых условий формирования поля в резонаторе (связь с щелевой линией возбуждения) и вывода его энергии в щелевую линию с приемной щелью связи.

На рис. 5 штрихпунктиром показано качественное распределение поля в щелевой линии, связанной с полым металлическим резонатором, полученное путем компьютерного моделирования. Видно, что, как и в щелевой линии со стороны возбуждающей щели связи, наблюдается хорошее согласование результатов экспериментальных и расчетных исследований.

Подытоживая полученные данные, можно сделать вывод о том, что щелевая линия является волноведущим каналом, ограниченным двумя металлическими плоскостями, размеры которых значительно превышают длину волны. Интерференционная картина распределения электромагнитного поля на частоте экранированных резонаторов с выраженными пучностями и узлами поля внутри щелевой линии позволяет рассматривать ее как резонатор волноводного типа. С одной открытой стороны щелевая линия нагружена экранированным резонатором. Благодаря этому осуществляется электромагнитная связь между ними. Как отмечалось в работе [7], использование щелевой линии позволяет достигать наибольших значений добротности исследуемых резонаторов из-за отсутствия дополнительных дифракционных потерь энергии резонансного поля на краях локального элемента связи. Однако ранее добротность полого металлического экрана не исследовалась. На рис. 6 графически представлены зависимости нагруженной добротности  $Q_n$  полого металлического экрана (пунктир) и полушарового экранированного ДР (сплошная линия) от радиальной координаты  $r_0$  приемной щели связи. Радиальная координата возбуждающей щели связи составляла  $r_i = -2$  мм.

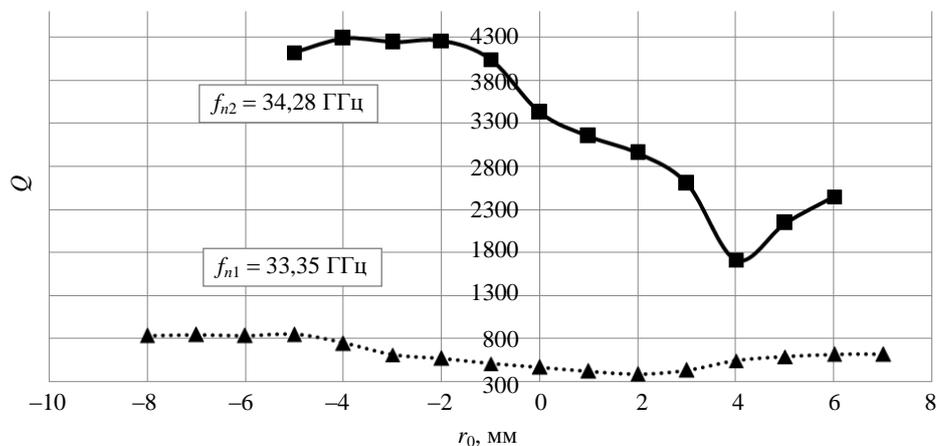


Рис. 6. Результаты исследования нагруженной добротности экранированных резонаторов, возбуждаемых щелевой линией

Очевидно, что по сравнению с полым металлическим экраном полушаровый экранированный ДР обладает более высокой добротностью за счет меньших потерь энергии [7]. Как отмечалось ранее, поле такого резонатора большей частью сконцентрировано в воздушном зазоре между металлическим экраном и диэлектрической резонансной структурой. Поскольку значения коэффициента ослабления сигнала на резонансных частотах полого металлического экрана и полушарового экранированного ДР отличаются несуще-

ственно, то можно утверждать, что и значения параметров связи с этими резонаторами близки. На основании этого можно сделать вывод о том, что полушаровый экранированный ДР обладает более высокой добротностью по сравнению с полым металлическим экраном. Из рис. 3 видно, что расположение приемной щели связи внутри полости резонаторов приводит к существенному снижению добротности за счет потерь дифракционных потерь энергии на краях приемной щели связи. Таким образом, связь щелевой линии с

рассматриваемым экранированным резонатором следует рассматривать как электромагнитную связь двух отличающихся по добротности резонаторов. Обеспечение наибольшего значения параметра связи между ними осуществляется путем расположения элемента подвода энергии внешнего электромагнитного поля (щели связи) внутри щелевой линии в области пучностей поля на резонансных частотах высокодобротного экранированного резонатора. Использование щелевой линии позволяет максимально разредить спектр вынужденных колебаний экранированных резонаторов с исключительным выделением мод ШГ, а также обеспечивает наибольшую их добротность по причине отсутствия потерь на элементах возбуждения и приема волн ШГ.

**Выводы.** Результаты исследования электродинамических характеристик щелевой линии показывают, что она позволяет максимально разредить спектр вынужденных колебаний экранированного ДР с приоритетным выделением мод ШГ. При этом достигнута высокая добротность экранированного ДР при возбуждении мод шепчущей галереи щелевой линией. Использование щелевой линии позволяет эффективно возбуждать колебания ШГ в экранированном ДР без внесения дополнительных потерь энергии.

#### Библиографический список

1. *Диэлектрические резонаторы* / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятые, Л. Г. Гассанов и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. *Квазиоптические твердотельные резонаторы* / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – К.: Наук. думка, 2008. – 286 с.
3. *Харьковский С. Н.* Возбуждение лучевых колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах с модами шепчущей галереи / С. Н. Харьковский, А. Е. Когут, В. В. Кутузов // Письма в журн. техн. физики. – 1997. – 23, № 15. – С. 25–29.
4. *Ганопольский Е. М.* О природе квантового хаоса в рассеивающей бильярдной К-системе / Е. М. Ганопольский // Доп. НАН України. – 2012. – № 3. – С. 85–91.
5. *Вынужденные колебания типа шепчущей галереи в частично экранированном полусферическом диэлектрическом резонаторе* / А. Е. Когут, В. В. Кутузов, В. А. Солодовник и др. // Письма в журн. техн. физики. – 2001. – 27, вып. 22. – С. 19–23.
6. *Когут А. Е.* Вынужденные колебания шепчущей галереи в диэлектрических резонаторах миллиметрового диапазона длин волн: дис. ... д-ра физ.-мат. наук / А. Е. Когут; Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2011. – 343 с.
7. *Возбуждение высокодобротных колебаний шепчущей галереи в полшаровом экранированном диэлектрическом резонаторе «щелевой линией»* / А. Е. Когут, С. О. Носа-

тук, В. А. Солодовник, Р. С. Доля // Изв. вузов. Радиофизика. – 2014. – 54, № 7. – С. 588–595.

8. *Реализация режима вынужденных колебаний высших порядков в экранированных диэлектрических резонаторах путем использования щелевой линии* / А. Е. Когут, С. О. Носатюк, В. А. Солодовник, Р. С. Доля // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 2014. – 57, № 10. – С. 25–33.
9. *Whispering-gallery modes in shielded hemispherical dielectric resonators* / S. N. Kharkovsky, Yu. F. Filippov, Z. E. Eremenko et al. // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – MTT-50, Iss. 11. – P. 2647–2649.
10. *Когут А. Е.* Вынужденные колебания высшего порядка полусферического экрана / А. Е. Когут, В. В. Кутузов, С. Н. Харьковский // Тр. VIII Междунар. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 1998. – Т. 1. – С. 158–159.
11. *Гинзтон Э. Л.* Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинзтон. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. – 519 с.

Рукопись поступила 21.05.2015.

А. Е. Kogut, R. S. Dolia,  
S. O. Nosatiuk, He Jaochan

#### THE EXCITATION OF THE WHISPERING GALLERY MODES IN THE SHIELDED DIELECTRIC RESONATORS BY SLOT-LINE

The spectral and energy characteristics of the shielded half-spherical resonator at the forced oscillations mode are investigated experimentally at using of the slot-line. It is shown that the use of slot-line allows maximally rarefying the spectrum of forced oscillations of the shielded resonators with an exceptional allocation of whispering gallery modes and achieving the greatest  $Q$ -factor. The experimental investigation and computer simulation show that the slot-line is a channel waveguide having the resonance properties.

**Key words:** shielded dielectric resonator, whispering gallery modes, slot-line, electromagnetic characteristics.

О. Є. Когут, Р. С. Доля,  
С. О. Носатюк, Хе Джаочан

#### ЗБУДЖЕННЯ МОД ШЕПОЧУЧОЇ ГАЛЕРЕЇ В ЕКРАНОВАНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ ЩІЛІННОЮ ЛІНІЄЮ

Експериментально досліджено спектральні та енергетичні характеристики екранованого півсферичного резонатора в режимі вимушених коливань шепчучої галереї за їх збудженням щілинною лінією. Показано, що використання щілинної лінії дозволяє максимально розрідити спектр вимушених коливань екранованих резонаторів із виключним виділенням мод шепчучої галереї й досягти найбільшої добротності. Шляхом експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання показано, що щілинна лінія являє собою хвилевідний канал з резонансними властивостями.

**Ключові слова:** екранований діелектричний резонатор, коливання шепчучої галереї, щілинна лінія, електродинамічні характеристики.