

**Влияние элемента распределенной волноводной связи
с дисковым диэлектрическим резонатором
с колебаниями шепчущей галереи на его
амплитудно-частотную характеристику**

А.Я. Кириченко, Г.В. Голубничая, Е.В. Кривенко

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
61085, Украина, г. Харьков
ул. Ак. Проскуры, 12

Рассматриваются отличия спектра вынужденных колебаний дисковых диэлектрических резонаторов при использовании распределенной связи с диэлектрическими волноводами от собственных колебаний такого резонатора. Исследуется влияние на амплитудно-частотную характеристику резонатора, возбуждаемого на волнах шепчущей галереи, величины распределенной связи резонатора с диэлектрическими волноводами и роль межтипового взаимодействия при «чисто внутреннем» возбуждении мешающей моды.

Ключевые слова: квазиоптический диэлектрический резонатор, высшие азимутальные колебания, межтиповое взаимодействие, «чисто внутреннее» возбуждение.

Введение

Изучение электродинамических характеристик дисковых диэлектрических резонаторов, возбуждаемых на высших азимутальных типах (так называемых волнах шепчущей галереи), продолжает привлекать внимание исследователей. Анализируется спектр мод шепчущей галереи в тонких дисковых диэлектрических резонаторах с высоким форматом $\Phi = R/h = 10 \div 100$ (R – радиус диска, h – его высота) [1]. Рассматриваются особенности собственных азимутальных колебаний в экранированных дисковых диэлектрических резонаторах [2]. Изучаются новые конструктивные решения при использовании диэлектрических резонаторов для измерения характеристик тонких диэлектрических материалов на металлических подложках и без них [3]. Проводимые исследования обычно сосредотачиваются на изучении собственных колебаний таких резонаторов, в то время как на практике приходится иметь дело с характеристиками вынужденных колебаний, имеющих иногда заметные отличия. В частности, заметные отличия в спектры шепчущей галереи могут вносить элементы связи резонаторов с внешними устройствами. Наиболее распространенным способом связи с внешними устройствами является рас-

пределенная связь полей резонатора с полями диэлектрического волновода.

Амплитудно-частотные характеристики в широком диапазоне частот при изменении азимутального индекса имеют сложный характер, в частности при невысоком формате резонатора. Обычно при использовании резонансных свойств диэлектрических квазиоптических резонаторов в устройствах СВЧ выбирают один из резонансов, наиболее подходящий для решения поставленной задачи, не обращая внимания на влияние более высоких мод колебаний. В то же время окружающая амплитудно-частотная зависимость может оказывать влияние на поведение выбранного резонанса при изменении условий возбуждения резонатора.

В представленных исследованиях поставлена задача изучения влияния элемента связи на амплитудно-частотную характеристику резонатора, что может помочь исследователю правильно подойти к выбору нужного резонанса и величины связи полезной нагрузки и генератора с резонатором, чтобы избежать ошибок в интерпретации полученных результатов.

1. Используемые схемы исследований

В работе исследуется амплитудно-частотная характеристика квазиоптического резонато-

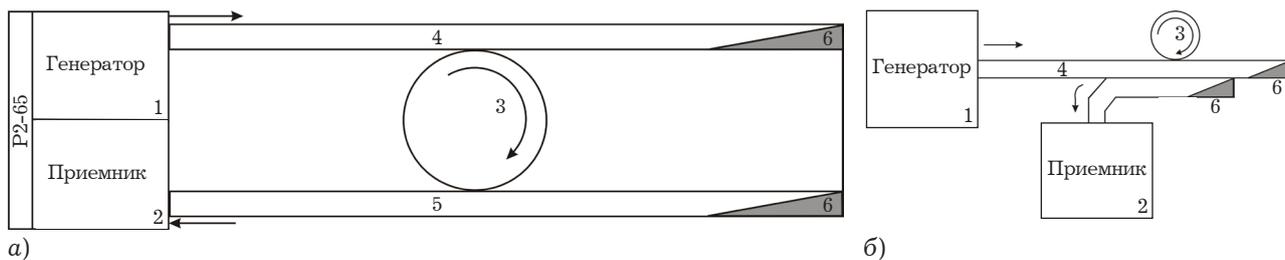


Рис. 1. Блок схемы макетов экспериментальных установок: а) схема с использованием проходящего сигнала; б) схема с использованием отраженного сигнала: 1 – генератор; 2 – приемник; 3 – диэлектрический резонатор; 4, 5 – диэлектрические волноводы; 6 – согласующие нагрузки

ра в форме диска из фторопласта диаметром $D = 2R = 78$ мм и толщиной $L = 14,4$ мм при возбуждении в резонаторе высших азимутальных типов колебаний, формируемых волнами шепчущей галереи. В опытах величина формата $\Phi = 2,71$ выбрана небольшой с целью наблюдения проявления влияния на азимутальные колебания EH_{n11} -моды, более высокой аксиальной моды EH_{n12} при возбуждении резонатора на волнах длинноволновой части миллиметрового диапазона. Естественно, что при большом формате диска ($\Phi > 10$) может обнаруживаться влияние высших радиальных мод. Степень влияния элемента связи на спектр колебаний может проявляться в той или иной мере в зависимости от выбора формата изучаемого резонатора.

Изучение амплитудно-частотных характеристик резонатора обычно производится с использованием двух схем: а) схемы на прохождение и б) схемы на отражение (рис. 1, а и рис. 1, б соответственно). Для возбуждения колебаний шепчущей галереи используется распределенная связь дискового диэлектрического резонатора с диэлектрическим волноводом [4].

Распределенная связь между диэлектрическим дисковым резонатором и диэлектрическим волноводом осуществляется путем расположения их в одной плоскости на расстоянии δ друг от друга. При этом поле неоднородной волноводной волны, медленно спадающее от поверхности волновода, проникает в область существования поля волны шепчущей галереи диска. Последнее также спадает от цилиндрической поверхности диска, поскольку распределение поля вдоль радиальной координаты описывается функциями Ханкеля. Так образуется связанная система волновод – резонатор. Как правило, оба элемента располагаются в одной плоскости, хотя иногда это правило специально нарушается. В зависимости от того, как ориентируются грани диэлектрического волновода относительно оси диска, можно производить преимущественное возбуж-

дение EH_{nml} -моды или HE_{nml} -моды, различающихся взаимной ортогональностью возбуждаемых полей.

В проводимых исследованиях для возбуждения волн шепчущей галереи используются диэлектрические волноводы из фторопласта с поперечным сечением $7,2 \times 3,4$ мм². Измерения производились по схеме рис. 1, а (схема на прохождение волны через резонатор) с использованием панорамного измерителя стоячей волны Р2-65 и по схеме рис. 1, б (схема на отражение волны от резонатора) с использованием источника колебаний в виде клистрона. Задача состоит в изучении влияния величины связи волноводов с полем резонатора на его амплитудно-частотную характеристику. При изменении прицельного расстояния δ связь волн волновода с модами шепчущей галереи меняется, что приводит к изменению амплитудно-частотной зависимости наблюдаемого сигнала. Эти изменения, в частности, связаны с нарушением структуры полей резонатора вводимой неоднородностью в виде элемента связи. При изучении проходящего сигнала по схеме рис. 1, а измерения проводятся при равных расстояниях возбуждающего и принимающего волноводов от цилиндрической поверхности резонатора. Нарушение этого условия приводило к дополнительным искажениям амплитудно-частотной зависимости.

2. Сигнал, проходящий через резонатор

Зависимости коэффициента (передачи) прохождения P/P_0 и нагруженной добротности Q резонатора для исследуемых резонансов от величины прицельного расстояния δ приведены на рис. 2 а, б. Параметром кривых являются пять резонансных частот, лежащих в интервале $f = 32,5 \div 35,8$ ГГц при $\delta > 4$ мм, т. е. при ослабленном влиянии на изучаемые резонансы мешающих мод колебаний. Эти зависимости важны для правильного выбора прицельного расстояния при решении конкретной задачи, стоящей

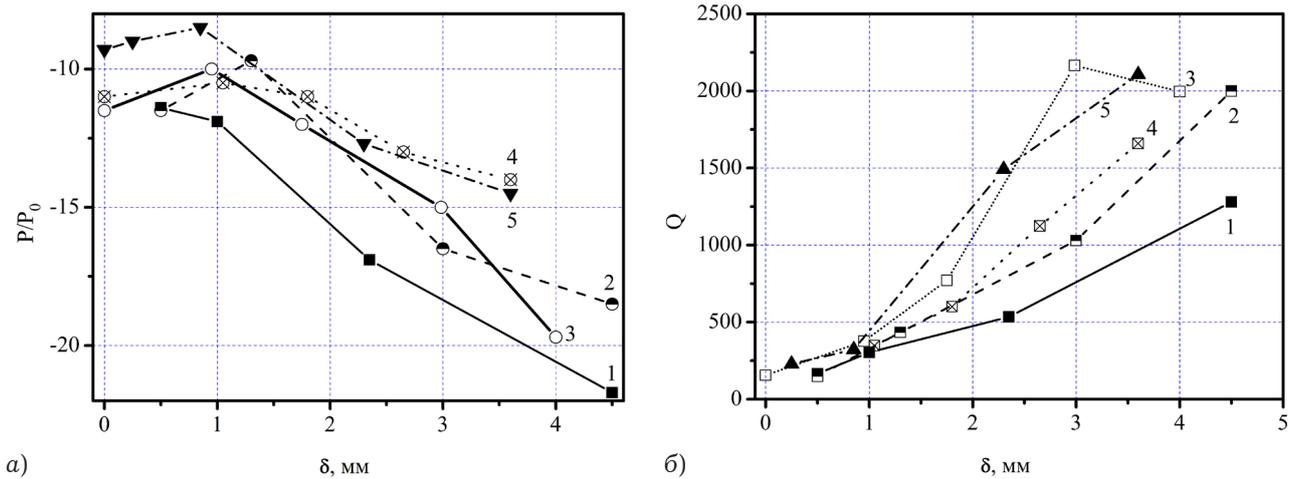


Рис. 2. Зависимости коэффициента прохождения P/P_0 (а) и нагруженной добротности Q резонатора (б) для исследуемых резонансов от величины прицельного расстояния δ для частот f : 1 – 32,0 ГГц; 2 – 32,9 ГГц; 3 – 33,9 ГГц; 4 – 34,8 ГГц; 5 – 35,8 ГГц

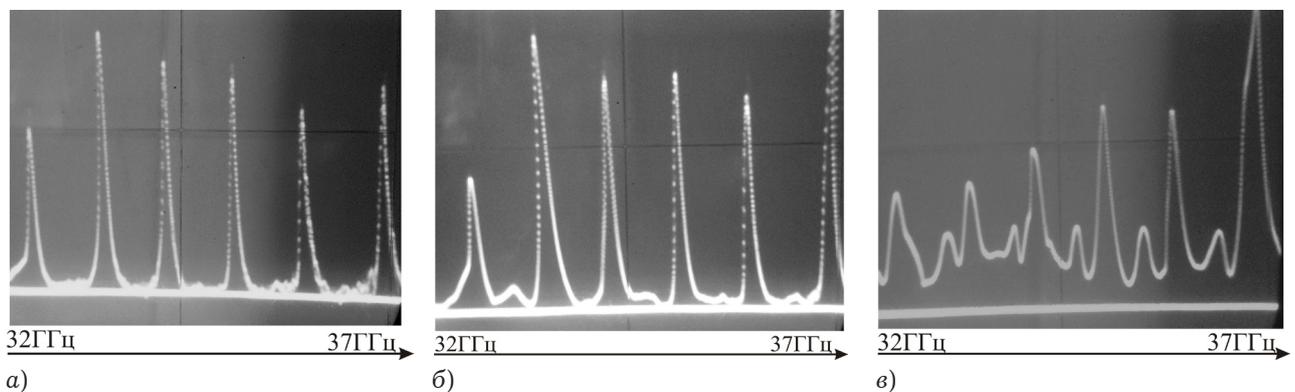


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика дискового резонатора для трех значений прицельного расстояния δ : а) $\delta = 3,5$ мм; б) $\delta = 2,55$ мм; в) $\delta = 0,5$ мм

перед исследователем. Видно, что при желании обеспечить высокую добротность устройства необходимо пожертвовать коэффициентом прохождения, а при обеспечении высокого уровня сигнала, проходящего через резонатор, его высокая добротность теряется.

На рис. 3 приведен участок амплитудно-частотной зависимости в диапазоне измеряемых частот $f = 32,5 \div 35,5$ ГГц, полученных с экрана панорамного измерителя коэффициента стоячей волны Р2-65, включенного по схеме рис. 1, а, для трех значений прицельного расстояния $\delta = 3,5; 2,5$ и $0,5$ мм. Расстояния δ от возбуждающего и принимающего волноводов до цилиндрической поверхности резонатора выбирались равными. При этом наблюдался максимальный уровень передачи сигнала через диск. При нарушении этого равенства частотно-амплитудная характеристика искажалась, в частности, за счет разной степени снижения амплитуды резонансных кривых.

Приведенный на рис. 3 участок амплитудно-частотной характеристики в основном правильно передает ее искажения при уменьшении зазора между волноводами и поверхностью диска. При большом $\delta \sim 4$ мм наблюдается четкая последовательность резонансов EH_{nml} , практически не отличающихся по форме от лоренцевой кривой. При уменьшении $\delta \sim 2$ мм наблюдается некоторое искажение резонансной кривой, небольшое снижение резонансной частоты и снижение добротности резонатора, кроме этого наблюдается нарушение плавного возрастания частотных интервалов между соседними модами шепчущей галереи с ростом частоты. Характерным является возникновение сигнала, проходящего через резонатор в интервале между основными резонансами EH_{nml} -моды уже при $\delta \sim 2$ мм. При уменьшении зазора между волноводами и цилиндрической поверхностью диска до $\delta = 0,6$ мм дополнительные резонансы четко проявляются. Это связано с появлением более высоких мод, в частности моды EH_{nm2} .

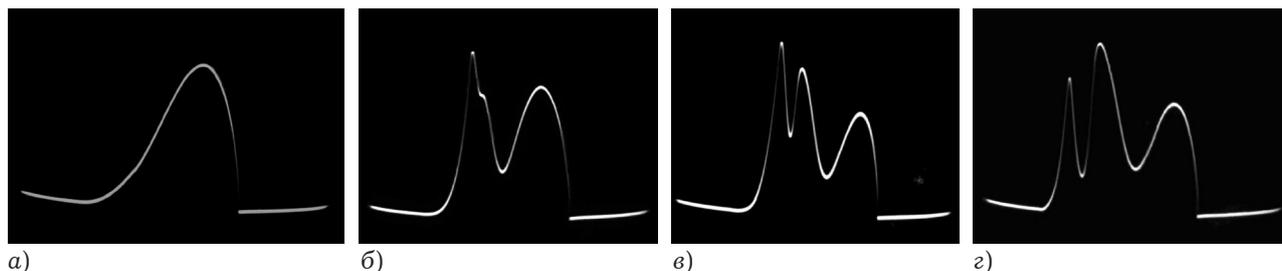


Рис. 4. Появление резонансов шепчущей галереи (основной и «мешающей» моды) при уменьшении прицельного расстояния δ : а) $\delta = 6,0$ мм; б) $\delta = 3,0$ мм; в) $\delta = 2,5$ мм; з) $\delta = 1,5$ мм

3. Сигнал, отраженный от резонатора

В этих исследованиях использовался источник колебаний в виде клистрона К-24 с модуляцией по частоте с помощью изменения напряжения на отражателе. Приемником видеосигнала служит электронный осциллограф. Сигнал, отраженный от резонатора (схема рис. 1, б), в основном идентичен сигналу, наблюдаемому по схеме рис. 1, а в исследованной области частот. Однако при более высокой частоте (не входящей в диапазон частот, наблюдаемых на экране индикатора панорамы) можно наблюдать межтиповое взаимодействие близко находящихся сигналов EH_{nm1} и EH_{nm2} , различающихся аксиальным и азимутальным индексами. Азимутальные индексы этих колебаний $n_1 = 45$ и $n_2 = 47$, соответственно.

Следует отметить, что наблюдаемое межтиповое взаимодействие, связанное с возбуждением двух резонансов, принадлежит к случаю чисто внутреннего возбуждения мешающего резонанса по классификации, используемой в литературе, в частности для цилиндрических объемных резонаторов [5]. Изучению межтипового взаимодействия при внешнем возбуждении одновременно двух частот посвящена многочисленная к настоящему времени литература, в частности [6; 7; 8].

Особенностью чисто внутреннего возбуждения дополнительной мешающей моды является отсутствие ее при слабой величине неоднородности в резонаторе. Дополнительный мешающий резонанс может появиться при внесении в поле резонатора металлической или электрической неоднородности. Возникновение этой моды наблюдается в точке взаимодействия с основной, возбужденной извне модой. При этом частота в точке возбуждения мешающей моды отличается от резонансной частоты основной моды. Двугорбая резонансная кривая при возникновении дополнительной резонансной моды не представ-

ляется двугорбым резонансом с равными амплитудами, как в случае внешнего возбуждения основной и мешающей моды. Симметричная двугорбая резонансная кривая может наблюдаться лишь при дальнейшем увеличении неоднородности. Установлено, что при наличии в резонаторе двух близких собственных резонансных частот и стоячей волны в возбуждающем диэлектрическом волноводе при перемещении дискового резонатора вдоль волновода мешающий резонанс появляется то при более высокой частоте, чем основной, то при более низкой частоте. Такая особенность межтипового взаимодействия в случае чисто внутреннего возбуждения может быть объяснена тем, что основной резонанс возникает за счет внешнего возбуждения, при условии что пучность напряженности поля стоячей волны в волноводе лежит в области элемента связи. В нашем случае неоднородностью служит элемент связи в виде диэлектрического волновода. При этом исследуется появление дополнительной моды при уменьшении прицельного расстояния δ между резонатором и волноводом.

Уменьшение δ увеличивает неоднородность, за счет чего возрастает возмущение полей резонатора и смещение частот основной и мешающей моды. При удалении возбуждающего волновода от поверхности диска на $\delta > 6$ мм на экране осциллографа наблюдается область генерации клистрона, в которой слева направо происходит возрастание генерируемой частоты (рис. 4, а). При уменьшении прицельного расстояния до $\delta = 5$ мм на области генерации клистрона появляется резонанс шепчущей галереи. Дальнейшее уменьшение прицельного расстояния до $\delta = 3$ мм (рис. 4, б) приводит к некоторому искажению резонансной кривой в высокочастотной области резонанса. При уменьшении δ до 2,5 мм (рис. 4, в) четко проявляется резонанс мешающей моды с амплитудой заметно меньшей амплитуды резонанса основной моды. В дальнейшем при $\delta = 1,5$ мм (рис. 4, з) амплиту-

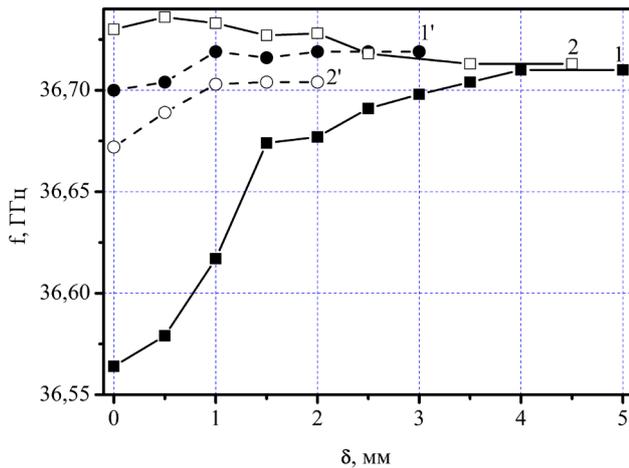


Рис. 5. Зависимость частоты резонанса от прицельного расстояния δ для двух пар мод: 1 – основная мода; 1' – «мешающая»; 2 – основная мода; 2' – «мешающая»

ды обоих резонансов выравниваются. В процессе уменьшения прицельного расстояния происходит смещение частот «расщепленных» мод. При этом повышение частоты основной моды гораздо меньше, чем снижение частоты мешающей моды. Одновременно с этим добротность резонатора на мешающей моде сильно падает от $Q \sim 2000$ при $\delta = 2,5$ мм до $Q \sim 150$ при $\delta = 0,5$ мм. Снижение добротности основной моды заметно меньше.

Характер смещения частот с уменьшением δ приведен на рис. 5. Показано две пары зависимостей, различающиеся появлением мешающей моды при более высокой частоте, чем основная (кривые 1 и 1'), и при более низкой частоте (кривые 2 и 2'). Основная мода приведена сплошной кривой, мешающая мода – пунктирной. Характерно, что в обоих случаях более низкочастотная мода подвергается более сильному смещению частоты независимо от того, является она основной модой или вспомогательной. Приведенные кривые напоминают зависимости Вина, характерные для частот связи в двухсвязной системе. Здесь прицельное расстояние выступает как частотно-независимый управляющий параметр. Характерным для случая внутреннего возбуждения является отсутствие участка зависимости, принадлежащего мешающему виду, при слабом возмущении и появление ветви мешающей моды лишь вблизи точки совпадения частот при достаточно высоком возмущении полей шепчущей галереи.

Самым простым методом для определения поляризации моды колебаний шепчущей галереи в эксперименте служит наблюдение смещения резонансной частоты при введении возмуща-

ющего металлического тела в область поля, спадающего от криволинейной поверхности по радиусу. Так, для колебаний ЕН-моды резонансная частота при этом снижается, а для моды НЕ возрастает. Это указывает на преимущественное вытеснение электрической составляющей поля металлическим предметом для ЕН-моды колебаний и магнитной составляющей электромагнитного поля для НЕ-моды колебаний.

Интересно отметить наблюдение эффекта влияния возмущающего тела при перемещении его по азимутальной координате в спадающем поле на цилиндрической поверхности. При перемещении металлического провода диаметром в несколько миллиметров вдоль азимутальной координаты наблюдалось смещение резонансных кривых по частоте – при сдвиге возмущающего тела на пол длины волны в резонаторе в направлении ее распространения высокочастотный резонанс стремится передвинуться в сторону более низкой частоты. Затем скачком резонансная частота возвращается в исходное положение и снижение частоты повторяется. Когда перемещение возмущающего тела было направлено к элементу возбуждения резонатора в направлении, противоположном к рассмотренному (навстречу движению волны шепчущей галереи), – частота резонансов возрастала при сдвиге возмущающего тела на полдлины волны, а затем возвращалась в исходное положение. Такое поведение резонансных частот связано с характером распределения поля стоячей волны по угловой координате в диэлектрическом диске и влиянием возмущающего тела на фазу установившейся картины поля.

Заключение

Проведенными исследованиями установлены основные особенности отличия спектра вынужденных колебаний дисковых диэлектрических резонаторов при использовании распределенной связи с диэлектрическими волноводами от собственных колебаний такого резонатора. При этом для постановки экспериментальных исследований электродинамики резонатора, возбуждаемого на волнах шепчущей галереи, важным является правильный выбор формата резонатора и установление необходимой величины распределенной связи резонатора с диэлектрическими волноводами.

Список литературы

1. Спектр мод шепчущей галереи с большими азимутальными индексами в тонких дисковых диэлектрических резонаторах / Б.М. Гарин [и др.] // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 3. С. 303–310.
2. Бажиллов В.А., Седаков А.Ю. Об особенностях азимутальных колебаний в экранированном диэлектрическом резонаторе // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 1. С. 68–78.
3. Dielectric constant, loss tangent, and surface resistance of PCB materials at K-band frequencies / V.N. Egorov [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techiques. 2005. Vol. 53. № 2. P. 627–634.
4. Взятыхшев В.Ф., Калинин В.И. Собственные и вынужденные колебания открытых резонансных систем на базе дисковых диэлектрических резонаторов // Известия вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 4. С. 475–482.
5. Штейншлегер В.Б. Явление взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах. М.: Оборонгиз, 1955. 114 с.
6. Взятыхшев В.Ф., Раевский Г.П. Эффекты взаимодействия азимутальных колебаний в дисковых диэлектрических резонаторах // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 4. С. 877–878.
7. Богомолов Г.Д., Маненков А.Б. Взаимодействие колебаний в открытых резонаторах со сферическими зеркалами // Известия вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. № 5. С. 747–753.
8. Кириченко А.Я., Харьковский С.Н. Взаимодействие колебаний в квазиоптическом диэлектрическом резонаторе // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 6. С. 12–16.

Influence of the distributed coupling of a waveguide with a disk dielectric resonator with whispering-gallery oscillations on its amplitude-frequency response

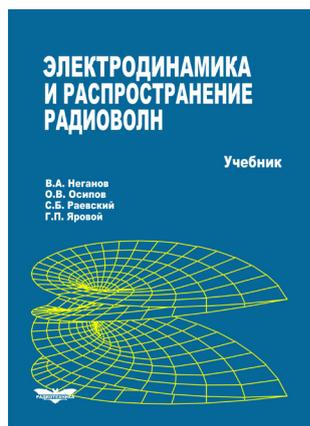
A.Ya. Kirichenko, G.V. Golubnichaya, E.V. Krivenko

The difference between the spectrum of forced oscillations of disk dielectric resonators (when distributed coupling with dielectric waveguide is used) and eigen oscillations of such resonator is considered. The dependence of the amplitude-frequency response of the resonator, excited on the whispering-gallery modes, upon the value of distributed resonator-waveguide coupling and the role of inter-type interaction at purely internal excitation of extraneous mode is investigated.

Keywords: quasi-optical dielectric resonator; higher azimuthal modes; inter-type interaction; purely internal excitation.

Неганов, В.А.

Электродинамика и распространение радиоволн: учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)

ББК 22.3

Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Осуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.