

## СВЯЗАННЫЕ ДИСКОВЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

В. Н. Деркач, Р. В. Головащенко, Е. В. Горошко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [derkach@ire.kharkov.ua](mailto:derkach@ire.kharkov.ua)*

Приведены результаты экспериментального изучения спектральных и полевых характеристик одиночных и связанных дисковых диэлектрических резонаторов (ДДР) на модах шепчущей галереи (МШГ) с помощью компьютеризированного измерительного стенда. На примере пяти связанных резонаторов показана возможность создания управляемых КВЧ-элементов на основе связанных ДДР для возможного применения в терагерцевом и оптическом диапазонах частот. Ил. 7. Табл. 2. Библиогр.: 7 назв.

**Ключевые слова:** связанные резонаторы, управляемые КВЧ-элементы, дисковые диэлектрические резонаторы, миллиметровые волны.

Дисковые диэлектрические резонаторы (ДДР) эффективно используются в электронике крайне высоких частот (КВЧ) для создания стабильных генераторов, резонансных фильтров и т. п. В электронике гигагерцевом и терагерцевом диапазонах волн находят применение ДДР на модах шепчущей галереи (МШГ), изготовленные из материалов с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 4 \div 20$  и малыми потерями ( $\text{tg}\delta \leq 10^{-4}$ ). В последнее время большое внимание уделяется изучению свойств микрорезонаторов и элементов фотоники на их основе, таких как оптические волноводы на связанных резонаторах (ОВСР) [1, 2]. Наряду с хорошо развитой теорией расчета ОВСР [3, 4] экспериментальное исследование таких структур в оптическом диапазоне затруднительно. В настоящей работе приведено описание экспериментального стенда для исследования ДДР и результаты моделирования волноведущих устройств на основе связанных ДДР на МШГ в КВЧ-диапазоне.

**1. Экспериментальный стенд.** Экспериментальное исследование характеристик одиночных и связанных ДДР на МШГ проводилось в диапазоне частот электромагнитных волн  $53,0 \div 78,3$  ГГц на компьютеризированном стенде [5–7]. Стенд состоял из 3-координатного сканирующего устройства, КВЧ-модуля, блока управления (БУ) и персонального компьютера (ПК). Блок-схема и фото элементов стенда приведены на рис. 1.

3-координатное сканирующее устройство обеспечивало перемещение возмущающего (пробного) зонда или антенны в объеме  $250 \times 250 \times 250$  мм<sup>3</sup> с минимальным шагом 0,1 мм и максимальной скоростью 5 мм/с. КВЧ-модуль состоял из генератора мм волн, волноведущего тракта, диэлектрических антенн для возбуждения в ДДР резонансных колебаний, детектора и селективного усилителя. С помощью БУ и ПК имелась возможность регулировать частоту генера-

тора, управлять сканирующим устройством, регистрировать сигналы с детектора.

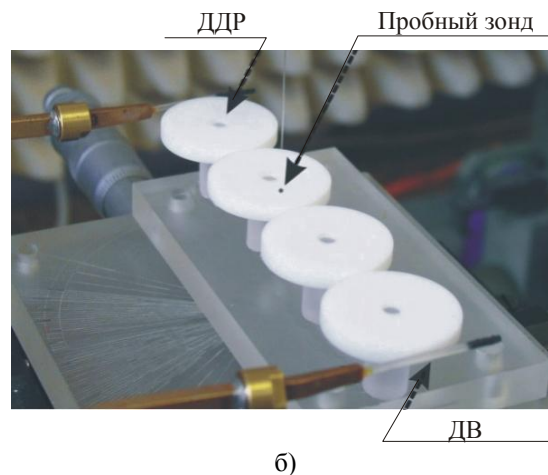
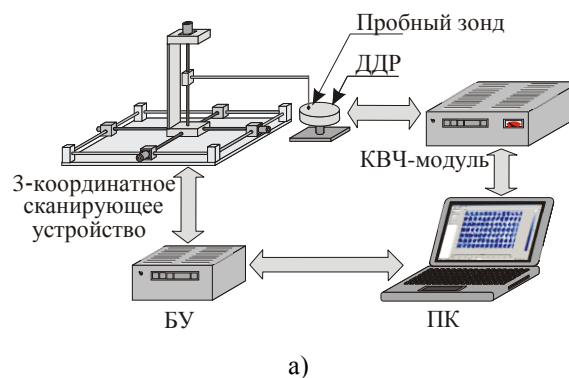


Рис. 1. Блок-схема (а) и фото элементов стенда (б)

**2. Результаты.** Мы исследовали спектр собственных колебаний, добротность и структуру полей резонансных колебаний одиночных и связанных ДДР, изготовленных из материалов с малыми потерями (фторопласт, кварц, лейкосапфир) в указанном выше диапазоне частот. Поверхности резонаторов обработаны с оптической точностью.

Геометрические размеры резонаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Геометрические размеры резонаторов

Материал	Диаметр, мм	Высота, мм
Фторопласт	36,0	4,0
Кварц	19,0	1,6
Кварц	22,0	1,6
Лейкосапфир	33,5	1,4

Спектр собственных колебаний ДДР регистрировался при перестройке частоты генератора в заданном диапазоне частот с минимальным шагом 100 кГц. Добротность мод определялась путем аппроксимации резонансной кривой функцией Лоренца. Распределение электромагнитного поля на поверхности резонатора исследовалось методом «малых возмущений». В режиме «на прохождение» исследуемый резонатор располагался на юстированной платформе между элементами возбуждения. В качестве элементов возбуждения использовались диэлектрические антенны в виде диэлектрических волноводов (ДВ) прямоугольного или круглого сечения (рис. 1, б). Для уменьшения амплитуды отраженной волны концы волноводов зауживались и покрывались поглощающим материалом.

Возмущающий зонд в виде шарика диаметром  $0,3 \div 0,5$  мм (много меньше длины волны) изготавливался из поглощающего материала и размещался на кончике кварцевой палочки диаметром 0,3 мм. Затем этот зонд построчно перемещался вблизи поверхности ДДР при помощи 3-координатного сканирующего устройства. Расстояние между зондом и ДДР составляло 0,1–0,3 мм. При этом резонансный коэффициент передачи (РКП) резонатора изменялся в зависимости от положения зонда из-за частичного поглощения и рассеяния электромагнитной энергии резонансного колебания возмущающим зондом. В случае, когда зонд попадал в максимум электрической компоненты электромагнитного поля резонансного колебания, наблюдалось уменьшение амплитуды РКП (темные участки на картинке распределения поля). Информация о текущей координате и величине РКП регистрировалась с помощью ПК.

Пример картины пространственного распределения электрической компоненты электромагнитного поля МШГ одиночного ДДР, изготовленного из фторопласта, изображен на рис. 2, а. Видны также фрагменты стоячей волны в волноводах, свидетельствующие о том, что поглощающие нагрузки работают не достаточно эффективно.

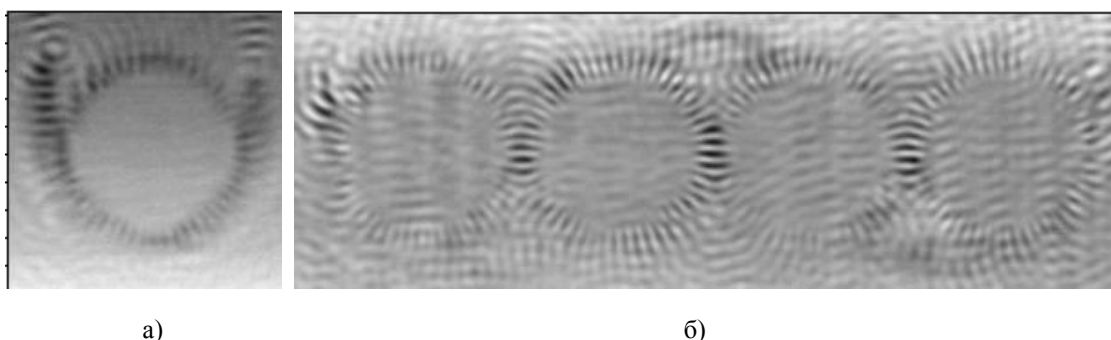


Рис. 2. Пример картин распределения электрической компоненты электромагнитного поля МШГ одиночного ДДР (а) и связанных ДДР (б)

При помощи экспериментального стенда можно изучать более сложные распределения полей, которые возникают в результате взаимодействия мод связанных резонаторов. На рис. 2, б приведена картина поля резонансных колебаний в системе из четырех связанных ДДР из фторопласта (рис. 1, б). Спектры мод одиночного и связанных резонаторов приведены на рис. 3.

Резонансные частоты  $f_{res}$  и добротности  $Q$  нескольких мод одиночного и связанных ДДР, состоящих из двух, трех и четырех одинаковых по размерам резонаторов, приведены в табл. 2. Видно некоторое различие резонансных частот (вследствие неидентичности размеров ДДР) и увеличение добротности по мере увеличения числа резонаторов.

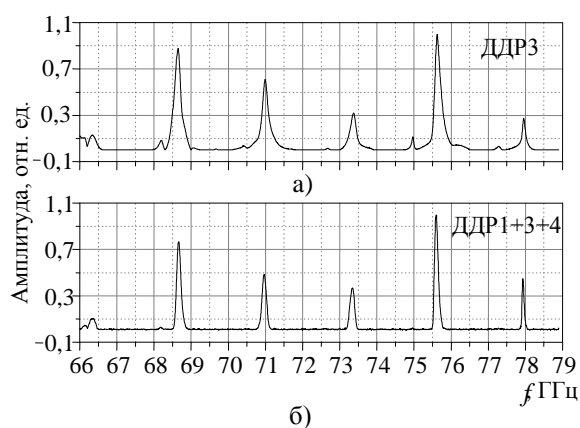


Рис. 3. Спектральные характеристики мод одиночного (а) и связанных резонаторов (б)

Путем подбора параметров ДДР и конфигурации их расположения можно создавать цепочки резонаторов, обладающие специфическими

свойствами. При этом отдельные резонаторы из этой цепочки могут являться управляемыми элементами.

Таблица 2

Характеристики исследуемых резонаторов

Количество ДДР	$f_{res}$ , ГГц	$Q$	$f_{res}$ , ГГц	$Q$	$f_{res}$ , ГГц	$Q$	$f_{res}$ , ГГц	$Q$
1	68,649	350	70,939	320	73,297	340	75,596	550
2	68,628	400	70,939	500	73,376	490	75,625	710
3	68,666	550	70,966	540	73,346	530	75,598	700
4	68,666	600	70,930	620	73,337	690	75,589	780

Под управлением подразумевается изменение резонансной частоты резонатора, которое можно осуществлять путем изменения диэлектрической или магнитной проницаемости материала, из которого изготовлен резонатор, или его размеров под внешним воздействием. Такие ДДР могут быть изготовлены из сегнетоэлектрика, полупроводника или феррита и управляться электрическим или магнитным полем. Возможно также механическое управление частотой ДДР путем поднесения к его поверхности диэлектрического либо металлического материала.

Например, представляет интерес структура из пяти связанных резонаторов, которая моделирует двухканальный селективный ответитель (рис. 4). Мы использовали ДДР разного диаметра, изготовленные из кристаллического кварца (ДДР1, ДДР2, ДДР3) и лейкосапфира (ДДР4, ДДР5).

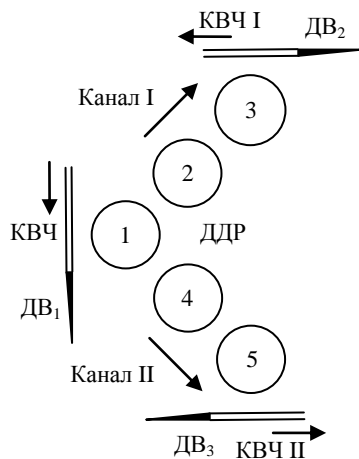


Рис. 4. Схема двухканального селективного ответителя на основе ДДР

В качестве элементов возбуждения (ДВ<sub>1</sub>) и приема (ДВ<sub>2</sub>, ДВ<sub>3</sub>) использовались диэлектрические одномодовые волноводы прямоугольного сечения с поглощающими нагрузками на концах. Фрагменты спектров приведены на рис. 5. Был найден участок спектра ДДР1 ( $f = 0,5-71,2$  ГГц) с близко расположенными МШГ ( $EH_{mnp}$ ) с разными индексами  $m$  и  $n$  и соответствующими резонанс-

ными частотами  $f_1 = 70,795$  ГГц и  $f_2 = 70,989$  ГГц (рис. 5, а).

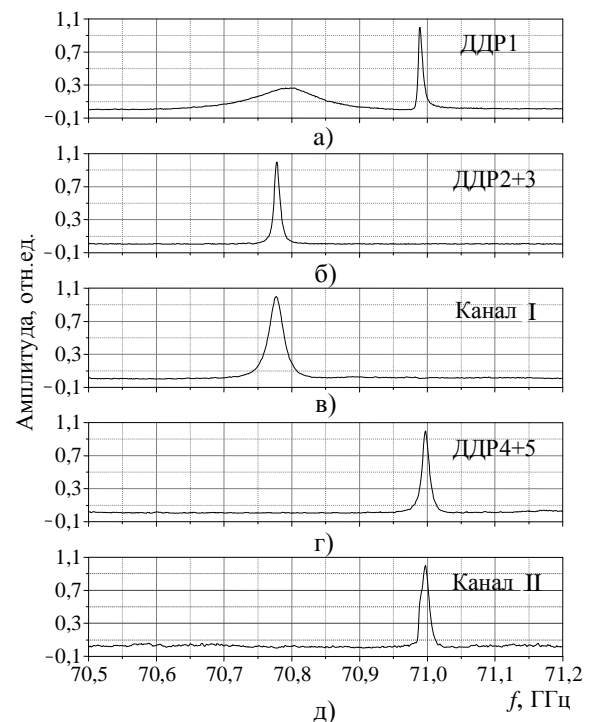


Рис. 5. Фрагменты спектров мод одиночного (а) и связанных ДДР (б, г) и сигналов в каналах I (в) и II (д)

Будем называть их соответственно мода 1 и 2. В ДДР2 и ДДР3 возбуждались одиночные высокочастотные моды на частоте моды 1 ( $f_{2,3} = 70,795$  ГГц) (рис. 5, б). В ДДР4 и ДДР5 возбуждались одиночные моды на частоте моды 2 ( $f_{2,3} = 70,989$  ГГц) (рис. 5, г).

При подаче на вход системы широкополосного сигнала происходит частотная селекция и по каналу I распространяется волна с частотой ( $f_{2,3} = 70,795$  ГГц) (рис. 5, в), а по каналу II — с частотой ( $f_{4,5} = 70,989$  ГГц) (рис. 5, д).

Распределение поля моды 1 с радиальным индексом  $m = 2$  в одиночном ДДР1 приведено на рис. 6, а. Распределение полей связанных мод в канале I (ДДР1 и ДДР2) приведено на рис. 6, б. Хорошо видно, что в связанных ДДР1 и

ДДР2 возбуждаются колебания с разными индексами  $m$  и  $n$ . Этого же эффекта можно добиться, если управлять частотой одной из мод ДДР1 каким-либо способом, описанным выше.

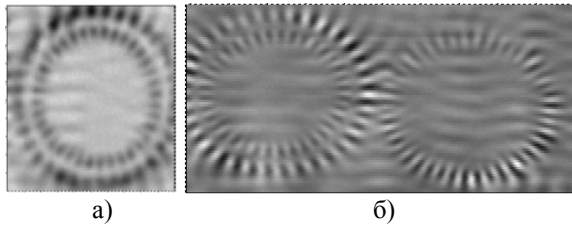


Рис. 6. Распределение полей в ДДР1 (а) и ДДР1+2 (б)

В рассмотренной цепочке связанных резонаторов ДДР1 может являться управляемым элементом. Изменение резонансной частоты такого ДДР можно осуществить путем поднесения к его плоской поверхности возмущающих элементов с отличающимся значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon_m$ . В качестве последних мы использовали плоскопараллельные пластины, изготовленные из диэлектриков со значениями  $\epsilon_m$ , большими  $\epsilon_r$  ДДР и меньшими  $\epsilon_r$  ДДР, а также металлические пластины, изготовленные из меди. ДДР изготовлен из кристаллического кварца с  $\epsilon_r = 4,46$ . Экспериментально полученные зависимости, отражающие влияние возмущающих элементов с разным значением  $\epsilon_m$  при их поднесении к поверхности ДДР на частоту резонансного колебания, приведены на рис. 7.

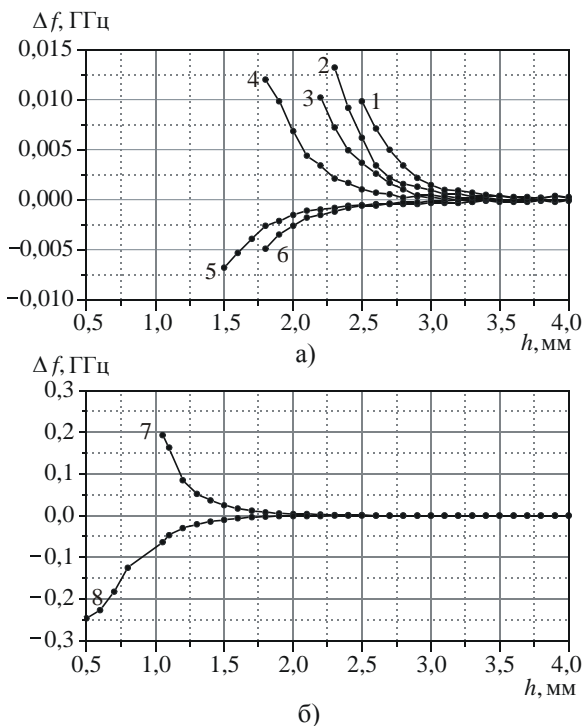


Рис. 7. Зависимость изменения резонансной частоты ДДР от расстояния между ДДР и управляющим элементом, изготовленным из: 1 – корунда; 2 – сапфира; 3 – слюды; 4 – плавяного кварца; 5 – тефлона; 6 – полистирола; 7 – меди; 8 – пенопласта

На рисунке  $\Delta f = f_p - f_0$ , где  $f_p$  – резонансная частота возмущенного ДДР,  $f_0$  – резонансная частота невозмущенного ДДР. Видно, что при поднесении к поверхности ДДР материала с  $\epsilon_m \geq \epsilon_r$  или металла резонансная частота увеличивается, а при  $\epsilon_m \leq \epsilon_r$  (полистирол, фторопласт, пенопласт) – уменьшается. Добротность резонансных колебаний резко уменьшается при малых расстояниях возмущающего элемента от поверхности ДДР. Однако для каждого материала можно определить оптимальную степень возмущения, при которой мода остается добротной в интервале нужных значений сдвигов резонансной частоты. Например, пластина из пенопласта на расстоянии 1 мм от поверхности ДДР приводит к сдвигу резонансной частоты  $\Delta f$  на 70 МГц и уменьшению добротности  $Q$  с 26000 до 24000.

**Выводы.** Экспериментально изучены спектральные, энергетические и полевые характеристики одиночных и связанных ДДР на МШГ с помощью компьютеризированного стенда. На примере пяти связанных резонаторов показана возможность создания управляемых КВЧ-элементов на основе связанных ДДР для возможного применения и моделирования подобных элементов в терагерцевом и оптическом диапазонах частот. Показана возможность управления резонансной частотой ДДР путем приближения к поверхности ДДР материала с отличающимся значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon_m$ .

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины (договор М/156-2007).

1. Boriskina S. V. Coupling of whispering-gallery modes in size-mismatched microdisk photonic molecules // Optics Letters. – 2007. – 32, no. 11. – P. 1557–1559.
2. Morichetti F., Melloni A., Breda A. et al. A reconfigurable architecture for continuously variable optical slow-wave delay lines // Optics Express. – 2007. – 15, no. 25. – P. 17273–17282.
3. Boriskina S. V. Theoretical prediction of a dramatic  $Q$ -factor enhancement and degeneracy removal of WG modes in symmetrical photonic molecules // Optics Letters. – 2006. – 31, no. 3. – P. 338–340.
4. Pishko S. V., Sewell P., Benson T. M., Boriskina S. V. Efficient analysis and design of low-loss whispering-gallery-mode coupled resonator optical waveguide bends // J. Lightwave Technol. – 2007. – 25, no. 9. – P. 2487–2494.
5. Головащенко Р. В., Горошко Е. В., Варавин А. В., Плевако А. С., Деркач В. Н. Аппаратно-программный комплекс для спектроскопических исследований в миллиметровом диапазоне длин волн // 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006): Матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2006. – С. 817–818.
6. Derkach V. N., Golovashchenko R. V., Nedukh S. V., Plevako A. S., Tarapov S. I. Measurement of loss tangent of dielectric and semiconductor materials at millimeter waves and temperatures 0,9-300 K // Proc. of the Joint 30th Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, IRMMW-THz 2005. Williamsburg, 2005. – 1. – P. 192–193.
7. Derkach V. N., Golovashchenko R. V., Goroshko E. V. Coupled-cavity structures on the base of whispering gallery disk dielectric resonators at millimeter wave band // Proc. of the

10th Anniv. Intern. Conf. on Transparent Optical Networks, ICTON 2008. – Athens, 2008. – 4. – P. 234–237.

**COUPLED DISK DIELECTRIC RESONATORS  
WITH WHISPERING GALLERY MODES  
IN THE MILLIMETER WAVE BAND**

V. N. Derkach, R. V. Golovashchenko,  
O. V. Goroshko

The results of experimental study of spectral and field characteristics of single and coupled disk dielectric resonators (DDR) with whispering gallery modes (WGM) by means of the computerized measuring set are presented. The possibility of design of controlled EHF elements on the basis of coupled DDR for the probable application in terahertz and optical frequency ranges is shown by the example of five coupled resonators.

**Key words:** coupled resonators, controlled EHF elements, disk dielectric resonators, whispering gallery modes, millimeter wave band.

**ЗВ'ЯЗАНІ ДИСКОВІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ  
РЕЗОНАТОРИ НА МОДАХ ШЕПОЧУЧОЇ  
ГАЛЕРЕЇ В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ  
ДОВЖИН ХВИЛЬ**

В. М. Деркач, Р. В. Головащенко, О. В. Горошко

Наведено результати експериментального вивчення спектральних і польових характеристик одиночних і зв'язаних дискових діелектричних резонаторів (ДДР) на модах шепочучої галереї (МШГ) за допомогою комп'ютеризованого вимірювального стенда. На прикладі п'яти зв'язаних резонаторів показана можливість створення керованих НВЧ-елементів на основі зв'язаних ДДР для можливого застосування у терагерцевому й оптичному діапазонах частот.

**Ключові слова:** зв'язані резонатори, керовані НВЧ-елементи, дискові діелектричні резонатори, міліметрові хвилі.

*Рукопись поступила 6 января 2009 г.*