

СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ДИСКОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА В КРИОДИЭЛЕКТРОМЕТРЕ

Р. В. Головащенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: roman.golovashchenko@ire.kharkov.ua*

Приведено описание конструкции резонансного модуля криодиэлектromетра миллиметрового диапазона длин волн на основе дискового диэлектрического резонатора на модах шепчущей галереи и исследованы основные характеристики модуля. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: дисковый диэлектрический резонатор, диэлектрические волноводы, миллиметровый диапазон длин волн, криогенные температуры.

Одним из наиболее точных методов измерения диэлектрической проницаемости материалов с малыми потерями в миллиметровом (мм) диапазоне длин волн и широком диапазоне температур является резонаторный метод с использованием дискового диэлектрического резонатора (ДДР), работающего на модах шепчущей галереи (МШГ) [1]. При этом возникает самостоятельная задача, направленная на изучение спектральных и энергетических характеристик таких резонаторов и распределений их полей, а также схем возбуждения резонаторов. Эти исследования приобретают еще большую актуальность, если учесть, что резонатор изготавливается из исследуемого материала и в случае проведения криогенных экспериментов располагается в изолированном объеме, окруженном отражающим металлическим экраном – рабочей камерой криостата.

Как следует из работы [1], величина диэлектрических потерь зависит от ряда параметров:

$$\operatorname{tg} \delta = (1/Q_0 - 1/Q_r - R_s/G)/p,$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь в ДДР; Q_0 – собственная добротность ДДР; Q_r – добротность, характеризующая потерями энергии на излучение; R_s – поверхностное сопротивление окружающего экрана; G – геометрический коэффициент экрана; p – энергетический коэффициент заполнения.

При возбуждении в ДДР МШГ с большим азимутальным индексом дифракционные потери энергии из резонатора малы и, при условии слабой связи возбуждающих элементов с ДДР и исключения влияния металлического экрана вблизи резонатора, собственной добротность близка к нагруженной, следовательно, правомерно пользоваться приближенной формулой $\operatorname{tg} \delta = 1/Q_0$. Таким образом, при подготовке и проведении низкотемпературных экспериментов

необходимо обеспечить оптимальную и в то же время регулируемую связь, а также исключить влияние экрана.

Задача изучения влияния экранировки на характеристики ДДР связана с выбором определенной конструкции системы возбуждения ДДР. Влияние держателя на характеристики сферического диэлектрического резонатора (ДР) на МШГ при комнатной температуре рассмотрено в работе [2], где показано, что при этом изменяются характеристики резонансных колебаний. Поэтому важен выбор оптимальной системы возбуждения в условиях окружения резонатора другими отражающими и поглощающими поверхностями.

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с оптимизацией возбуждения ДДР в резонансном модуле криодиэлектromетра с возможностью механической регулировки связи резонатора с подводными диэлектрическими волноводами (ДВ).

1. Конструкция системы связи. Измерение диэлектрических параметров материалов с малыми потерями в мм диапазоне длин волн и диапазоне температур от комнатной до гелиевой и ниже проводится на криомагнитном комплексе, состоящем из криогенного модуля и низкотемпературного резонансного электродинамического модуля [3, 4].

Криогенный модуль представляет собой рефрижератор испарения ^4He или ^3He и построен по схеме «*top-loading refrigerator*», позволяющей производить смену образца в ходе эксперимента без повышения температуры рабочей камеры.

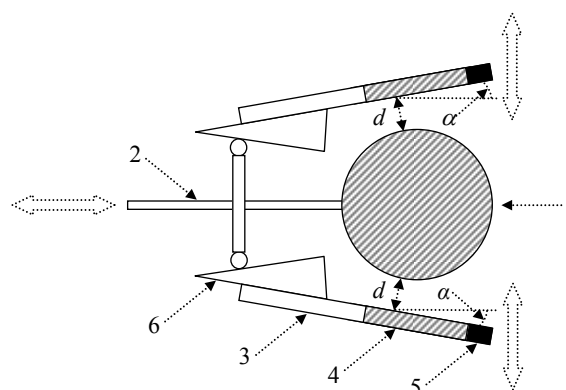
Низкотемпературный резонансный электродинамический модуль разработан для измерения диэлектрических потерь с использованием методики ДДР на МШГ. Он представляет собой длинную штангу с рабочей камерой на конце. Конструкция электродинамического модуля для проведения низкотемпературных измерений определяет необходимость использования длинных волноводов, суммарная длина которых составляет

несколько метров, и необходимость нахождения эффективного способа возбуждения высокооборотных ДДР. При этом часто приходится регулировать величину связи ДДР с подводщими волноводами уже после помещения электродинамического модуля с ДДР в криогенный модуль в охлажденном состоянии. Регулировка связи в предлагаемой конструкции может осуществляться путем изменения расстояния между возбуждающим элементом и резонатором – зазора d . Для возбуждения ДДР в электродинамическом модуле реализуется пространственно-распределенная связь с ДВ [5].

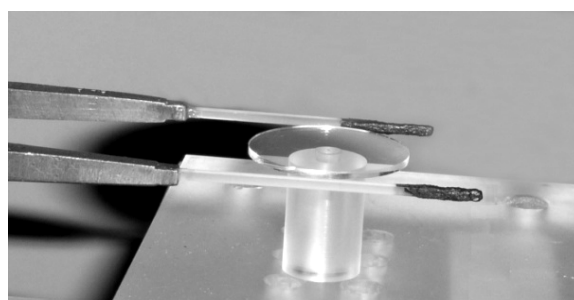
Низкотемпературная часть электродинамического модуля состоит из цилиндрического стакана, который вводится через уплотняющее кольцо в рабочий объем рефрижератора криодиэлектрометра. Внутри цилиндрического стакана расположены два тонкостенные металлические волноводы (сечением $3,6 \times 1,8 \text{ мм}^2$), изготовленные из нейзильбера и тщательно полированные внутри для уменьшения потерь, а также продольные тяги, обеспечивающие возможность перемещения резонатора и волноводов относительно друг друга. В верхней части волноводы уплотнены с помощью слюдяных окон. Потери в каждом из металлических волноводов минимизированы и составляют величину порядка 3 дБ. Средняя длина низкотемпературной части электродинамического модуля составляет около 1 150 мм, общая длина модуля – 1 400 мм.

На рис. 1 показаны схема и внешний вид элементов конструкции системы связи ДДР и ДВ в измерительном стенде и в электродинамическом модуле. ДДР 1 изготавливается с оптической точностью из исследуемого материала (в виде сплошного диска или диска с отверстием в центре). Все поверхности диска (торцевая и цилиндрическая) полируются с оптической точностью (шероховатость составляет $< 50 \text{ нм}$). Резонатор закрепляется в нижней части модуля на металлической оси или подпружиненных упорах, соединенных с продольной подвижной тягой 2. Образец находится в вакуумированной камере, которая обеспечивает возможность плавного изменения температуры от 0,8 до 300 К.

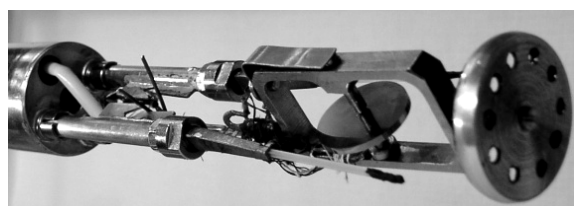
Каждый из длинных металлических волноводов заканчивается металлодиэлектрическими переходами, представляющими собой сужающиеся пирамидальные металлические волноводы 3 с вклеенными ДВ 4 прямоугольного сечения длиной около 45 мм (рис. 1, а). С обоих концов ДВ придают пирамидальную форму: с одного конца – для согласования с волной в волноводе, с другого – для создания согласованной нагрузки. Нагрузка реализуется путем нанесения поглощающего покрытия (графитовой пудры) 5.



а)



б)



в)

Рис. 1. Схема (а) и фото элементов возбуждения ДДР в измерительном стенде (б) и в низкотемпературном электродинамическом модуле (в): 1 – ДДР; 2 – продольная тяга; 3 – сужающийся металлический волновод; 4 – ДВ; 5 – согласованная нагрузка; 6 – устройство в виде «ласточки хвоста»

ДВ использовались в качестве элементов возбуждения ДДР и изготавливались из плавного кварца (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3,6$). В зависимости от рабочего диапазона частот (50÷80 ГГц) использовались ДВ сечением $1,0 \times 1,0 \text{ мм}^2$ и $1,2 \times 1,2 \text{ мм}^2$. Пример типичной кривой коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для одного из переходов при комнатной температуре приведен на рис. 2. Наименьшие значения КСВН для отдельных участков спектра составляли 1,20÷1,27. Эти участки спектра выбирались в качестве рабочих. ДВ располагались в плоскости резонатора с диаметрально противоположных сторон под небольшим уг-

лом α , который можно регулировать в пределах $5 \div 10^\circ$. Идея об использовании двух ДВ, расположенных под углом друг к другу, для регулирования связи с квазиоптическим ДДР впервые была высказана и реализована в работе [6], после чего она постоянно используется при работе с другими типами квазиоптических ДР (например, [7]).

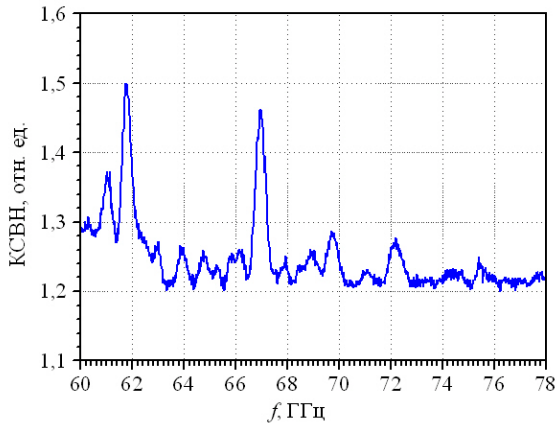


Рис. 2. КСВН перехода металлический волновод – ДВ

Поляризацию мод в ДДР можно было изменять путем вращения длинных металлических волноводов на угол $0 \div 90^\circ$. Таким образом, можно было возбуждать квази-*TE*-моды и квази-*TM*-моды. В данной работе приведены результаты для квази-*TE*-мод, характеризующихся наличием поперечной относительно аксиальной оси резонатора электрической компоненты поля.

Каждый из двух ДВ мог перемещаться независимо в продольном направлении. Кроме того, ДДР мог перемещаться вдоль ДВ. Поскольку ДВ располагались не параллельно, а под углом α , то перемещение ДДР относительно ДВ приводило к изменению расстояния между ДДР и ДВ, т. е. позволяло регулировать связь резонатора с волноводами, в том числе для фазового синхронизма волн в ДВ и ДДР [5].

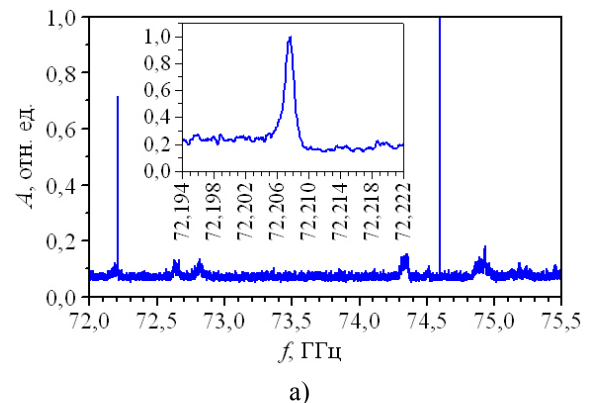
Дополнительное перемещение ДВ относительно друг друга и изменение угла α было возможно благодаря устройству в виде «ласточки хвоста» (см. рис. 1, а, поз. б). Это приводило к увеличению или уменьшению расстояния между ДДР и ДВ (зазора d). Возможность дополнительного перемещения волноводов позволяла исследовать характеристики ДДР с разными геометрическими параметрами (диаметром $d_{DDR} = 10 \div 24$ мм, высотой $h = 0,3 \div 5$ мм).

Все регулировки могли осуществляться в охлажденном режиме рабочей камеры с помощью микрометрических винтов, расположенных в верхней части электродинамического модуля и соединенных с ДДР и ДВ продольными тягами.

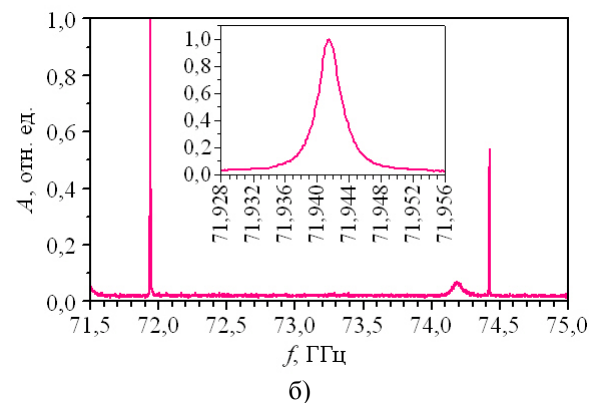
Для предотвращения влияния экрана, окружающего рабочую камеру, стенки камеры и все металлические поверхности покрывались поглощающим покрытием.

2. Результаты измерений и анализ. Исследовались спектральные и энергетические характеристики и распределения полей ДДР, изготовленных из кристаллического кварца (проницаемость в плоскости диска $\epsilon_{\perp} = 4,43$, проницаемость вдоль аксиальной оси диска $\epsilon_{\parallel} = 4,63$).

Размеры резонатора: диаметр $d_{DDR} = 19,53$ мм, высота $h = 1,07$ мм. Устройство модуля позволяло проводить исследования в диапазоне температур $4,2 \div 300$ К. Использование предложенной конструкции возможно и при более низких температурах ($T < 1$ К). На рис. 3 представлены спектральные характеристики ДДР в диапазоне частот $f = 71,5 \div 75,5$ ГГц (диапазоне длин волн $\lambda = 4,20 \div 3,97$ мм) при $T = 4,2$ К (рис. 3, а) и при $T = 300$ К (рис. 3, б), полученные путем медленной протяжки частоты с помощью аппаратно-программного комплекса, описанного в работе [8].



а)



б)

Рис. 3. Спектральная характеристика ДДР при гелиевой (а) и комнатной (б) температурах

В спектре присутствуют несколько групп мод с отличающимися азимутальным m и радиальным n индексами. Моды были идентифициро-

ваны с помощью методики малых возмущений с использованием пробного зонда. Применялось 3-координатное сканирующее устройство [9]. На рис. 4 приведена картина распределения электрической компоненты поля одной из МШГ в поперечном сечении ДДР. МШГ обладают минимальным значением индекса m и наибольшей добротностью, а также, как правило, большей амплитудой резонансных колебаний.

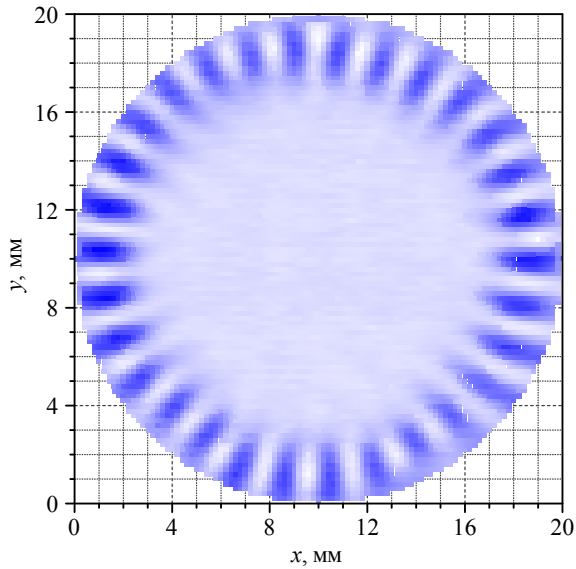


Рис. 4. Пример распределения электрического поля МШГ над поверхностью ДДР

По спектральным характеристикам определялись резонансные частоты и добротности МШГ для определенных значений зазора d . Как видно из рис. 5, значение добротности сильно зависит от расстояния между ДДР и ДВ (или величины связи ДДР с ДВ). Для гелиевой температуры (4,2 К) при $d = 2,5$ мм связь можно считать критической, так как при увеличении расстояния между ДДР и ДВ нагруженная добротность ДДР практически не изменяется. Такое расстояние, соответствующее $d = 0,6 \times \lambda$, можно считать оптимальным зазором d_{opt} .

В идеальном случае расстояние от ДВ до экрана должно превышать d_{opt} , поэтому минимальный размер рабочей камеры для проведения криогенных измерений должен быть больше, чем $2d_{opt} + 2d_{opt} + d_{ddr}$. Криоэлектронметр предназначен для измерения резонаторов из материалов с

малыми потерями, характеризующихся разными диаметрами, диэлектрическими проницаемостями и тангенсами угла потерь.

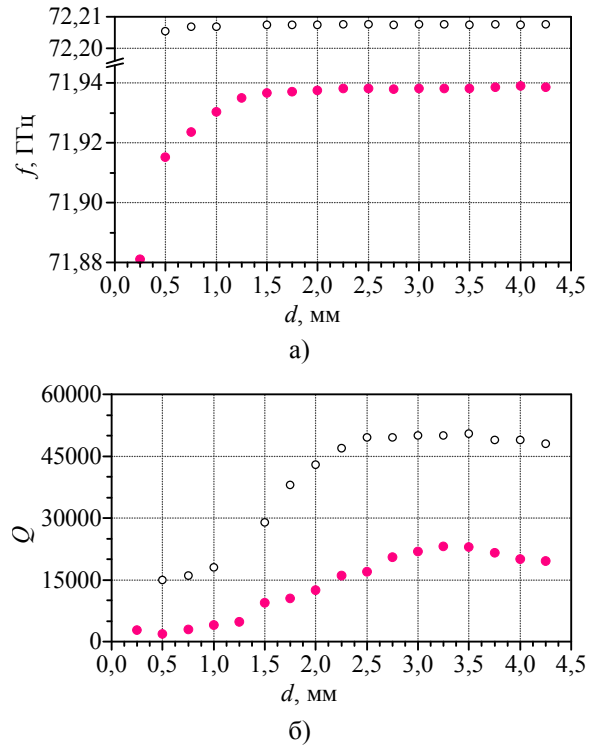


Рис. 5. Зависимости резонансной частоты (а) и добротности (б) МШГ от зазора между ДДР и ДВ: \circ – 4,2 К; \bullet – 300 К

Результаты, аналогичные представленным, позволяют определить, что с учетом угла α для проведения исследований таких резонаторов в 4-мм диапазоне длин волн диаметр рабочей камеры криогенного модуля криоэлектронметра должен составлять около 30 мм. Знание этого параметра является важным для определения объема ячейки и расхода криожидкостей, а также теплопритоков в системе. Максимальный размер высокодобротных кристаллических ДДР при работе без вакуумирования ограничен диаметром рабочей камеры криогенного модуля и составляет 25 мм, с вакуумированием – 21 мм, минимальный – расстоянием между волноводами – 7 мм.

В таблице приведены полученные результаты, а также для сравнения – результаты работы [10].

Сравнение результатов определения оптимального зазора для кристаллического кварца и Si_3N_4

Работа	Материал, ϵ	d_{ddr}	λ	d_{ddr} / λ	d_{opt}	d_{opt} / λ
Данная	Кварц кристаллический, $\epsilon_{\perp} = 4,43, \epsilon_{\parallel} = 4,63$	19,53 мм	4,17 мм	4,68	2,5 мм	0,60
[10]	$\text{Si}_3\text{N}_4, \epsilon = 4$	2 мкм	0,605 мкм	3,31	0,450 мкм	0,74
[10]	$\text{Si}_3\text{N}_4, \epsilon = 4$	10 мкм	0,801 мкм	12,48	0,480 мкм	0,60

Диэлектрическая проницаемость нитрида кремния Si_3N_4 , из которого были изготовлены ДДР, близка к диэлектрической проницаемости кристаллического кварца. Для возбуждения ДДР в исследованиях [10] также использовалась пространственно-распределенная связь. Как видно из таблицы, при использовании предлагаемой конструкции системы возбуждения полученные данные для выбора оптимального зазора d_{opt} между ДВ и ДДР качественно хорошо согласуются.

Выводы. Разработана система возбуждения для низкотемпературного резонансного электродинамического модуля, работающего в диапазоне частот 40÷150 ГГц, обеспечивающая регулируемую электродинамическую связь ДДР на МШГ с возбуждающим волноводом в диапазоне температур от комнатных до низких ($T = 1\div 300$ К).

Исследованы и оптимизированы основные параметры узла возбуждения ДДР и показано, что при расстоянии между кварцевым резонатором и ДВ $d > 0,6 \times \lambda$ потери на связь становятся пренебрежимо малыми и тангенс угла потерь в материале ДДР можно определять как обратную величину собственной добротности ДДР. Определены минимальные размеры рабочей ячейки для низкотемпературных исследований в указанном диапазоне частот.

Автор выражает благодарность В. Н. Деркачу, В. Г. Коржу и С. И. Тарапову за постановку задачи и помощь при проведении исследований.

1. Use of whispering gallery modes for complex permittivity determinations of ultra-low-loss dielectric materials / J. Krupka, K. Derzakowski, A. Abramowicz et al. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1999. – 47, N 6. – P. 752–759.
2. Whispering modes in anisotropic and isotropic dielectric spherical resonators / J. M. Floch, J. D. Anstie, M. E. Tobar et al. // Phys. Lett. A. – 2006. – 359, N 1. – P. 1–7.
3. Low temperature complex for dielectrometry measurements / V. N. Derkach, R. V. Golovashchenko, E. V. Goroshko et al. // Proc. of the Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'04). – Kharkov, 2004. – P. 760–762.
4. Криомагнітний радіоспектроскопічний комплекс міліметрового діапазону довжин хвиль / Experimental Complex – National Treasure of Ukraine [Электронный ресурс]. – Ре-

жим доступа: <http://www.ire.kharkov.ua/Radiospectroscopy/1.htm> – Загл. с экрана.

5. Диэлектрические резонаторы / под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
6. Accurate microwave technique of surface resistance measurement of large-area HTS films using sapphire quasi-optical resonator / N. Cherpak, A. Barannik, Yu. Filipov et al. // IEEE Trans. on Appl. Superconductivity. – 2003. – 13, N 2. – P. 3570–3573.
7. Quasioptical sapphire resonators in the form of a truncated cone / A. A. Barannik, S. A. Bunyaev, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich // J. Lightwave Technology. – 2008. – 26, N 17. – P. 3118–3123.
8. Аппаратно-программный комплекс для спектроскопических исследований в миллиметровом диапазоне длин волн / Р. В. Головащенко, Е. В. Горошко, А. В. Варавин и др. // 16-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006): матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2006. – С. 817–818.
9. Плевако О. Дослідження польових характеристик відкритих резонаторів / О. Плевако, Р. Головащенко // Вісн. Львівського ун-ту. Сер. фізична. – 2004. – Вип. 37. – С. 146–153.
10. Guo Z. Energy transfer to optical microcavities with waveguides / Z. Guo, H. Quan // J. Heat Transfer. – 2007. – 129, N 1. – P. 44–52.

EXCITATION SYSTEM OF A DISK DIELECTRIC RESONATOR IN THE CRYODIELECTROMETER

R. V. Golovashchenko

The description of the design of the resonance unit for the millimeter waveband cryodielectrometer on the base of a disk dielectric resonator working on whispering gallery modes is presented and main characteristics of the unit are investigated.

Key words: disk dielectric resonator, dielectric waveguides, millimeter waveband, cryogenic temperatures.

СИСТЕМА ЗБУДЖЕННЯ ДИСКОВОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЗОНАТОРА У КРІОДІЕЛЕКТРОМЕТРІ

Р. В. Головащенко

Наведено опис конструкції резонансного модуля кріодіелектрометра міліметрового діапазону довжин хвиль на основі дискового діелектричного резонатора на модах шепочучої галереї та досліджено основні характеристики модуля.

Ключові слова: дисковий діелектричний резонатор, діелектричні хвилеводи, міліметровий діапазон довжин хвиль, кріогенні температури.

Рукопись поступила 10 сентября 2009 г.