

Н.П. КУНДЕНКО, канд. техн. наук, доц., ХНТУСХ им. П. Василенко,
Харьков

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Проведено перевірку достовірності теоретичних підходів і параметрів відкритого півсферичного резонатора.

Ключові слова: відображення, резонатор, добротність, коливання.

Проведено проверку достоверности теоретических подходов и параметров открытого полусферического резонатора.

Ключевые слова: отражение, резонатор, добротность, колебания.

A perevirku dostovirnosti theoreticity pidhodiv iparametriv vidkritogo pivsferichnogo cavity.

Keywords: vidobrazhennya, resonator, dobrotnist, kolivann

1. Введение

В миллиметровом диапазоне длин волн оптический резонатор (ОР) является высокочувствительным инструментом для измерения электрофизических характеристик веществ. При проведении исследований используются, как правило, плоские образцы, а в резонаторе возбуждается основное колебание TEM_{00q} . Благодаря применению полусферической геометрии резонатора устраняются ошибки, связанные с определением углового положения образца, поскольку последний в этом случае помещается на плоское зеркало ОР. В ряде практических случаев бывает необходимо исследовать образцы, имеющие цилиндрическую форму. В этом случае возникает техническая трудность, связанная с расположением такого образца в объеме резонатора, т.к. при каждом измерении последний должен помещаться в область с одной и той же напряженностью электрического поля.

2. Основные материалы исследования

Для определения достоверности параметров открытого полусферического резонатора было решено провести экспериментальные исследования. Блок-схема экспериментальной установки, с помощью которой проведены исследования по определению эффективности возбуждения колебаний TEM_{01q} в полусферическом ОР и TM_{01q} в резонаторе с отрезком сверхразмерного круглого волновода, приведена на рис. 1 Резонатор образован плоским зеркалом 9 с апертурой 38 мм и сферическим фокусирующим зеркалом 8 с такой же апертурой и радиусом кривизны $R = 39$ мм. В центре плоского зеркала расположен отрезок сверхразмерного круглого волновода 10 длиной h с поршнем 11. Элементы связи, представляющие собой плавные переходы с пониженного сечения $3,6 \times 0,16$ мм на основное сечение волновода $3,6 \times 1,8$ мм (щели связи), расположены на сферическом зеркале на расстоянии $s = 5,5$ мм от оси ОР.

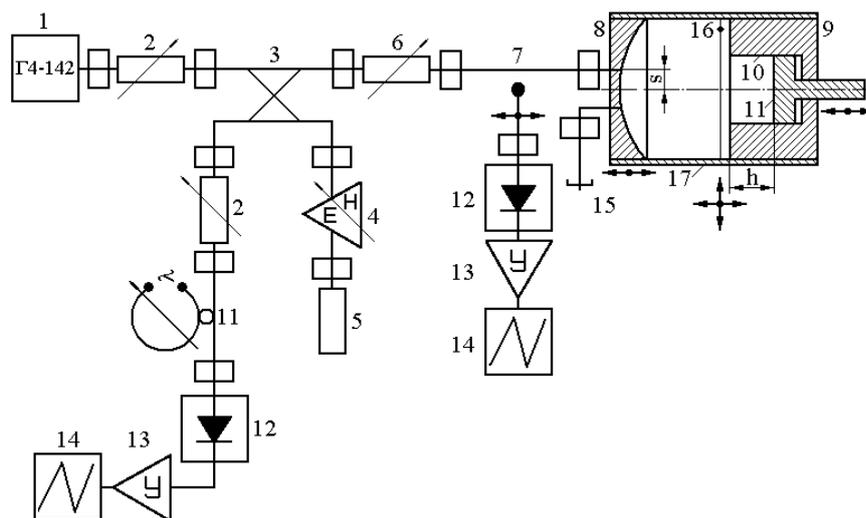


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования эффективности возбуждения различных колебаний в ОР с помощью щелевого элемента связи.

Все измерения проведены в четырехмиллиметровом диапазоне длин волн. В качестве возбуждающего генератора используется генератор сигналов высокочастотный Г4-142. Для расширения динамического диапазона СВЧ сигнал модулируется по амплитуде синусоидальным напряжением с частотой 1 кГц. Развязка генератора с ОР осуществляется с помощью установочного аттенюатора 2. Для визуальной настройки системы в резонанс (отраженный от ОР сигнал минимален) в схеме предусмотрен дополнительный приемный тракт. В состав этого тракта входят: направленный ответвитель 3, установочный аттенюатор 2, резонансный волномер 11 для контроля частоты генератора, кристаллический детектор 12, резонансный усилитель 13, настроенный на частоту модулирующего напряжения, и осциллограф 14. В плече направленного ответвителя, содержащего согласованную нагрузку 5, расположен согласователь 4, позволяющий компенсировать возможные отраженные от волноводных соединений сигналы, которые могут исказить точность настройки в резонанс. Сигнал, пропорциональный амплитуде стоячей волны напряжения в волноводе, регистрируется измерительной линией 7 типа Р1-40 и поступает в приемный тракт, состоящий из кристаллического детектора 12, резонансного усилителя 13 и осциллографа 14. Поскольку мы рассматриваем ОР, включенный по схеме на отражение, то на выходе второго элемента связи включен короткозамыкающий поршень 15. Для идентификации возбуждаемых в резонаторе типов колебаний используется пробное тело 16, закрепленное на капроновой нити вблизи плоского зеркала. КСВН исследуемого ОР вычисляется по формуле $КСВН = 10^{A/20}$. Здесь A – разность между максимальным и минимальным значениями ослабления поляризационного аттенюатора 6 в дБ. Для нахождения коэффициента отражения от резонатора воспользуемся формулами: $\Gamma = \left(\frac{КСВН - 1}{КСВН + 1} \right)$ при $\Gamma > 0$ и $\Gamma = \left(\frac{-КСВН}{КСВН + 1} \right)$ при $\Gamma < 0$. Настройка системы в резонанс осуществляется перемещением сферического зеркала резонатора. Расстояние

между отражателями определяется с помощью измерительного проекционного устройства ИЗВ–23 с точностью 1 мкм.

Для нахождения η необходимо измерять коэффициенты отражения (КСВН) от ОР и эталонного ОР (ЭОР) - резонатора с тем же распределением поля, что и в открытом, но в котором отсутствует излучение энергии в окружающее пространство. Для этого на ОР надевается экранирующий цилиндр 17. Такое сопоставление двух резонаторов правомерно, поскольку омическими потерями в стенках экранирующего цилиндра для рассматриваемых колебаний TEM_{01q} и TM_{01q} можно пренебречь. Это связано с тем, что у обоих колебаний отсутствует продольная составляющая магнитного поля ($H_z=0$). Поэтому при надевании на ОР экранирующего цилиндра мы фактически устраним связь ОР со свободным пространством. Кроме того, в работе [2] показано, что возбуждаемые в ЭОР колебания имеют параметры резонансного пучка, совпадающие с параметрами соответствующего колебания в ОР. На основании всего сказанного мы можем рассматривать ЭОР как закрытый резонатор, соответствующий ОР.

С помощью измерительной линии Р1-40 было показано, что смещения минимума стоячей волны напряжения в линии при настройке в резонанс ОР и ЭОР, возбуждаемых одним и тем же элементом связи, с точностью до погрешности измерений совпадают. Это подтверждает правильность вывода о равенстве резонансных частот ОР и ЭОР. Смещение минимума стоячей волны напряжения в волноводе для резонатора рассматриваемой геометрии составило $\Delta l = -0,033$ мм.

На рис. 2 показаны зависимости $\Gamma_{ОР}$ (кривая 1) и $\Gamma_{ЭОР}$ (кривая 2) от изменения относительного расстояния L/R между зеркалами полусферического ОР и ЭОР, в которых с помощью щелевого элемента связи возбуждается колебание TEM_{01q} . При проведении этих измерений поршень 11 расположен заподлицо с плоским зеркалом 10 резонатора (см. рис. 1). Как видно из рисунка, почти во всем диапазоне перестройки резонатора связь с нагрузкой сильная ($\Gamma < 0$). Изменение $\Gamma_{ОР}$ и $\Gamma_{ЭОР}$ при $L/R = 0,505$ (полуконфокальная геометрия резонатора) связано с тем, что в этом случае колебание TEM_{01q} взаимодействует с другим колебанием резонансной системы. Здесь же показана зависимость коэффициента эффективности возбуждения η от относительного расстояния между зеркалами L/R (кривая 3).

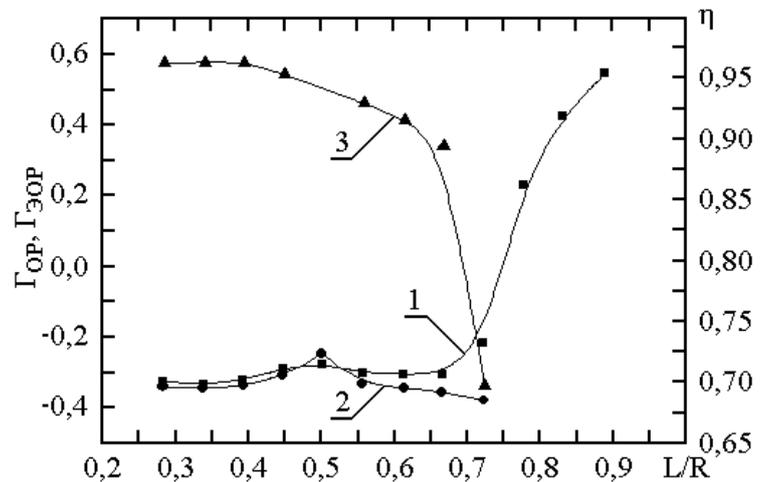


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения Γ_{OP} , $\Gamma_{ЭОР}$ и эффективности возбуждения η от расстояния между зеркалами L/R для колебания TEM_{01q} , возбуждаемого в ОР щелевым элементом связи.

Как видно, что по мере уменьшения расстояния между зеркалами резонатора, дифракционные потери уменьшаются и η растет, достигая при $L/R < 0,4$ значения 0,96, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работах [1, 3]. В области больших дифракционных потерь ($L/R > 0,7$) эффективность возбуждения колебания TEM_{01q} в полусферическом ОР не превышает 0,78. В этом случае довольно сложно экспериментально определить эффективность возбуждения колебаний в резонансной системе. Это связано с тем, что при надевании на ОР экранирующего цилиндра в области больших дифракционных потерь в резонансном объеме наряду с исследуемым колебанием будут возбуждаться и другие. В итоге это приведет к искажению результатов измерений. Режим максимальной добротности для открытой резонансной системы соответствует случаю равенства дифракционных и омических потерь. Как видно из рисунка, максимальную нагруженную добротность в ОР полусферической геометрии имеет колебание TEM_{0112} ($L/R = 0,669$, $Q_H = 2820$). При этом, однако, величина η не достигает максимальной величины, а составляет всего 0,9.

В качестве следующего шага проанализируем поведение добротностей как в полусферическом ОР, так и в резонаторе с отрезком сверхразмерного круглого волновода. Рассматривать будем нагруженную добротность Q_H , добротность связи резонансной системы с подводящим волноводным трактом Q_{CB} и собственную добротность Q_0 . На рис. 3 представлено поведение Q_H (кривая 1), Q_{CB} (кривая 2) и Q_0 (кривая 3) при изменении расстояния между зеркалами полусферического ОР, в котором возбуждается неаксиально-симметричный тип колебаний TEM_{01q} .

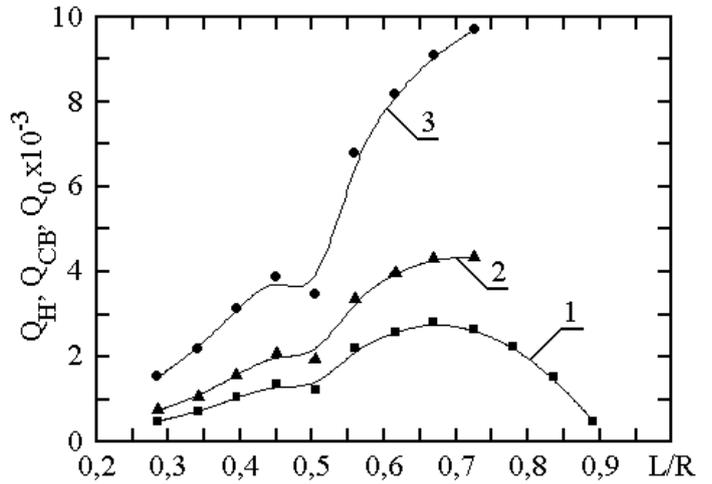


Рис. 3. Зависимости добротностей Q_H , Q_{CB} и Q_0 от расстояния между зеркалами L/R для колебания TEM_{01q} , возбуждаемого в полусферическом ОР щелевым элементом связи.

Нагруженная добротность измерялась по полуширине резонансной кривой [5]. Добротности Q_{CB} и Q_0 вычислялись из выражений, поскольку для каждого значения q мы знаем Q_H , Γ_{OP} и $\Gamma_{ЭОР}$. Из рисунка видно, что максимальную добротность $Q_H=2820$ имеет колебание TEM_{0112} при $L/R=0,669$. Уменьшение всех видов добротностей при $L/R=0,505$ связано с взаимодействием исследуемого колебания с одним из колебаний резонансной системы (полуконфокальная геометрия резонансной системы). При $L/R < 0,7$ связь резонатора с волноводным трактом сильная (см. рис. 2), поэтому в этом случае Q_H должна, в основном, определяться добротностью связи. Это мы наглядно видим из рисунка. Определить Q_{CB} и Q_0 при $L/R > 0,725$ представляет сложную задачу. Это связано с трудностями измерения $\Gamma_{ЭОР}$, поскольку при надевании экранирующего цилиндра на ОР при больших расстояниях между зеркалами в резонансном объеме возбуждаются, как правило, дополнительные колебания, взаимодействующие с исследуемым. А это, в свою очередь, может привести к неверному результату измерений.

Для резонансной системы ОР с отрезком сверхразмерного круглого волновода максимальная величина $Q_H=2170$ при $L/R=0,559$ (тип колебаний TM_{0116}). Как было сказано выше, уменьшение нагруженной добротности для такой резонансной системы связано с дополнительными омическими потерями. При этом общее поведение всех видов добротностей для ОР с отрезком сверхразмерного круглого волновода идентично полусферическому ОР. Причина, по которой мы не смогли определить Q_{CB} и Q_0 при $L/R > 0,559$ та же самая, что и в предыдущем случае.

3. Выводы

Для измерения малых сдвигов резонансной частоты при помещении измеряемого объекта в объем ОР необходимо увеличивать Q_H . Благодаря этому

мы существенно повысили чувствительность измерительной установки. Определение параметров акустических колебаний для воздействия на микрообъекты животных перед их криоконсервацией необходимо с использованием разработанной установки на основе открытых резонаторов, образованных сферическим и плоским зеркалами, с параметрами: апертура зеркал 60мм; радиус кривизны сферического зеркала 110мм; отношение $L/R=0,579$; расстояние от оси зеркал до щелей связи 9,4мм; резонансная частота 74,278 ГГц; нагруженная добротность резонаторов $Q=4120$.

Список литературы: 1. Андросов В.П. Влияние на эффективность возбуждения открытого резонатора его параметров и связи с волноводом / Андросов В.П., Кузьмичев И.К. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1987. – 30 с. - (Препринт / АН УССР, Ин-т радиофизики и электроники; № 354). 2. Вертий А.А. Экспериментальное исследование характеристик открытых резонаторов в цилиндрических оболочках / А.А. Вертий, В.Н. Деркач, Н.А. Попенко [и др.] // Украинский физический журнал. – 1978. – Т. 23, № 10. – С. 1666-1672. 3. Булгаков Б.М. Метод измерения эффективности возбуждения и вывода энергии в открытых резонаторах / Б.М. Булгаков, М.П. Натаров, В.Н. Скресанов // Приборы и техника эксперимента. – 1988. - № 4. –С. 118–120. 4. Yang Zhonghai. A method for measurement of Q-factor at millimeter wavelength / Zhonghai Yang, Chongwen Lin, Yingwei Zho // 10 International Conference "Infrared and Millimeter Waves": inter. conf., 9-13 December 1985: conf. proc. - Lake Buena Vista, Fla, 1985. – P. 350-351. 5. Техника субмиллиметровых волн / [Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Камышан В.В. и др.]; под ред. Р.А. Валитова. – М.: Сов. радио, 1969. – 480 с.

Поступила в редколлегию 11.05.201