

Д. Г. АФОНИН, М. Н. ДЕВЯТКОВ, Ю. А. ПИРОГОВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРОВ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ЗЕРКАЛАМИ

Показана возможность применения простой методики для измерения добротностей открытых резонаторов. С помощью пробного тела определены виды колебаний, возбуждаемые в резонаторе, по радиусам каустических поверхностей. Экспериментально исследовано изменение характеристик открытых резонаторов со сферическими зеркалами в зависимости от изменения связи, радиуса кривизны и апертуры зеркал.

Открытые резонаторы со сферическими зеркалами, обеспечивающие высокую добротность вследствие малых омических потерь и потерь на излучение, являются перспективными резонансными системами для ряда применений в технике миллиметровых и субмиллиметровых длин волн [1, 2].

Теория открытых резонаторов, развитая за последнее время [3, 4, 5], не позволяет, однако, точно рассчитывать добротность таких систем, не учитывает влияние величины связи и качества зеркал на характеристики резонаторов. Поэтому ряд важных закономерностей и характеристик конкретных конструкций резонаторов могут быть установлены только экспериментальным путем. Эксперименты проведены в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн.

### Зеркала открытых резонаторов

Экспериментально исследовались четыре типа открытых резонаторов со сферическими зеркалами. В дальнейшем, для простоты будем называть их резонаторами № 1, № 2, № 3, № 4.

Сферические поверхности зеркал вытачивались фигурными резцами, заточенными с точностью до 0,01 мм, и доводились полировкой вручную. Зеркала резонатора № 1 изготовлены из латуни; зеркала для резонаторов № 2—№ 4 медные.

Возбуждение резонаторов осуществлялось через круглое отверстие в центре одного из зеркал (рис. 1), к которому подключался стандартный прямоугольный волновод. Через такое же отверстие в центре другого зеркала и выходной волновод открытый резонатор был связан с детекторной головкой  $D_2$  (рис. 2).

Размеры зеркал резонаторов приведены в таблице.

№ резонатора	Диаметр апертуры $D$ (мм)	Радиус кривизны $R$ (мм)	Диаметр отверстия связи $d$ (мм)	Глубина отверстия связи $h$ (мм) *
1	100	239	1,5	0,5
2	60	75	2,3	0,15
3	60	75	2,5	0,3
4	45	75	2,3	0,15

Одно зеркало резонатора при помощи специальной оправки и рейтера укреплялось неподвижно на оптической скамье, другое зеркало при помощи такой же оправки закреплялось на столике с продольной

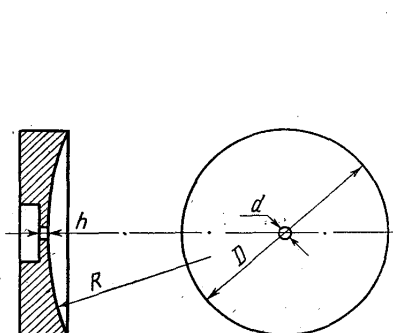


Рис. 1. Зеркало открытого резонатора.  $D$  — диаметр апертуры,  $R$  — радиус кривизны,  $d$  — диаметр отверстия связи,  $h$  — глубина отверстия связи

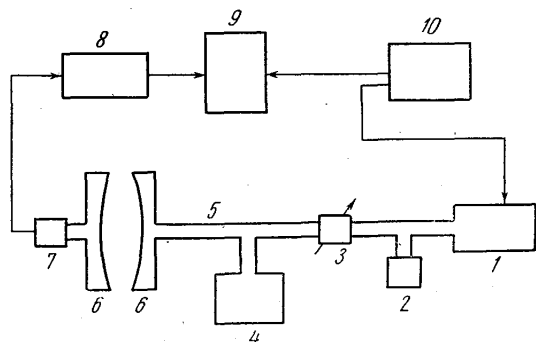


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки. 1 — клистронный генератор, 2 — детектор  $D_1$ , 3 — развязывающий аттенюатор, 4 — гетеродинный волномер, 5 — волноводный тракт, 6 — зеркала открытого резонатора, 7 — детектор  $D_2$ , 8 — усилитель; 9 — осциллограф, 10 — генератор синусоидального напряжения

и поперечной микрометрическими подачами, который, в свою очередь, неподвижно устанавливался на оптической скамье. Таким образом, одно из зеркал можно было плавно перемещать вдоль оси резонатора и в перпендикулярном направлении. Эти перемещения измерялись с точностью до 0,005 мм. Оправки, на которых укреплялись зеркала, имели по три подстроечных винта, осуществлявших соосную установку зеркал.

### Методика измерений

В качестве источника СВЧ-колебаний применялся клистронный генератор (рис. 2). Развязывающий аттенюатор с затуханием 25—30 дБ исключал влияние нагрузки на мощность и частоту генерируемых колебаний.

Добротность открытых резонаторов определялась по ширине резонансной кривой, наблюдаемой на экране осциллографа в режиме частотно-модулированных колебаний. Погрешности за счет амплитудной модуляции, свойственные этому методу при определении сравнительно низких добротностей объемных резонаторов, для больших значений добротности открытых резонансных систем сводятся до мини-

мума вследствие уменьшения ширины резонансной кривой и увеличения отношения  $\frac{\Delta f_r}{\Delta f_p}$ , где  $\Delta f_r$  — диапазон электронной перестройки частоты клистронного генератора,  $\Delta f_p$  — ширина резонансной кривой. Для уменьшения этой погрешности режим работы клистрона выбирался таким образом, чтобы частота в центре одной из зон генерации совпадала с резонансной частотой исследуемого резонатора.

Настройка генератора на частоту  $f_0$  в центре зоны генерации осуществлялась в режиме непрерывных колебаний по максимуму тока детектора  $D_1$  (рис. 2). В режиме частотно-модулированных колебаний резонаторы возбуждались на этой частоте в такие моменты времени, когда напряжение модуляции проходит через нуль. При этом резонансные кривые, наблюдаемые на экране осциллографа, образуют эквидистантную последовательность. В процессе исследований при изменении расстояния между зеркалами по признаку эквидистантности резонансных кривых осуществлялась настройка резонаторов на частоту  $f_0$ .

Частотная модуляция осуществлялась синусоидальным напряжением, подаваемым на отражатель клистрона. При этом напряжение на отражателе имеет постоянную и переменную синусоидальную составляющие, т. е.

$$V_{отр} = U_{отр} + U_0 \cdot \sin \Omega \cdot t, \quad (1)$$

где  $\Omega \equiv 2\pi F$ ,  $U_{отр}$  — постоянная составляющая напряжения на отражателе;  $F = \frac{1}{T}$ ,  $T$  и  $U_0$  — соответственно период и амплитуда модулирующего напряжения.

При достаточно большой амплитуде модулирующего напряжения и при возбуждении резонатора на частоте  $f_0$  в центре зоны генерации можно с большой степенью точности считать, что время  $\Delta t$ , необходимое для развертки резонансной кривой на экране осциллографа, мало,  $\sin \Omega \cdot t$  близок к нулю, а зависимость  $V_{отр}(t)$  — линейная:

$$\Delta V_{отр} = U_0 \sin \Omega \Delta t \cong U_0 \Omega \Delta t. \quad (2)$$

В пределах, необходимых для наблюдения резонансной кривой, частота генерации линейно зависит от напряжения на отражателе, т. е.

$$f = kV_{отр}, \quad (3)$$

где  $f$  — частота генерации клистрона,  $k$  — некоторый постоянный коэффициент.

Ширина резонансной кривой на уровне половинной мощности определяется так:

$$\Delta f = k\Delta V_{отр}. \quad (4)$$

Коэффициент  $k$  находился по экспериментальной градуировочной кривой с точностью до 300 кгц/в при помощи гетеродинного волномера (рис. 2), подключенного к СВЧ-тракту через направленный ответвитель.

Согласно (2) и (4)

$$\Delta f = 2\pi k U_0 F \Delta t \quad (5)$$

(здесь  $\Delta t$  — «временная» ширина резонансной кривой на уровне половинной мощности, которая измерялась на экране осциллографа по меткам времени).

Добротность открытого резонатора рассчитывалась по формуле

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{2\pi k U_0 F \Delta t} \quad (6)$$

Описанный метод определения добротностей открытых резонаторов имел относительную ошибку 8—12% в основном за счет погрешности в измерении ширины резонансной кривой и неточной настройки возбуждения резонатора на частоту в центре зоны генерации.

При раздвижении зеркал исследовались спектры возбуждаемых в резонаторах колебаний и измерялись радиусы внешних каустических поверхностей. Виды колебаний определялись по графикам, дающим зависимость радиуса каустики от расстояния между зеркалами. Радиус каустики измерялся около поверхности одного из зеркал по уменьшению амплитуд резонансных кривых, наблюдаемых на экране осциллографа при внесении в открытый резонатор металлического диполя (пробного тела) параллельно вектору напряженности электрического высокочастотного поля.

### Экспериментальные результаты

Виды возбуждаемых колебаний. Согласно [3] частота резонансного колебания с индексами  $mnq$  в открытом резонаторе со сферическими зеркалами определяется по формуле

$$2kl = \pi q + 2(m + 2n - 1)\alpha, \quad (7)$$

где  $k = \frac{\omega}{c}$ ,  $2l$  — максимальное расстояние между зеркалами,  $\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{l}{r_0}}$ ,  $r_0$  — радиус кривизны зеркал. Формула (7) хорошо согласуется с экспериментальными результатами [6].

В данной работе использован простой метод экспериментального определения видов колебаний, который дает наглядное представление об изменении радиуса внешней каустической поверхности при изменении расстояния между зеркалами.

Резонатор № 1 возбуждался более чем на 6 видах колебаний. С помощью формулы (7) установлено, что это колебания  $onq$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots, 6$ . Методом пробного тела установлено также, что у всех видов колебаний отсутствует внутренняя каустическая поверхность; распределение поля вблизи зеркала в направлении, перпендикулярном оси резонатора, имеет один максимум поля, три, пять и т. д. соответственно для колебаний  $01q, 02q, 03q$  и т. д.

Колебания  $onq$  с одинаковыми индексами  $n$  возбуждаются в резонаторе через равные интервалы раздвижения зеркал, причем изменение размера радиуса каустических поверхностей связано в большей степени с изменением этого индекса, т. е.  $R_{01q} < R_{02q} < R_{03q} < \dots$  для всех значений  $q$  (Здесь  $R_{onq}$  — радиус каустической поверхности колебания  $onq$ ). Этим мы в дальнейшем и пользовались для определения видов колебаний.

Сказанное выше хорошо иллюстрируется графиком (рис. 3а), на котором изображены размеры радиусов внешних каустических поверхностей колебаний резонатора № 2 в зависимости от расстояния между зеркалами. В этом резонаторе возбуждались колебания  $01q, 02q, 03q$ . При увеличении расстояния между зеркалами радиусы внешних кау-

стических поверхностей растут и приближаются к краям зеркал; при этом растут потери на излучение и соответствующие виды колебаний перестают возбуждаться в резонаторе. При расстоянии, большем 70 мм, в резонаторе возбуждалось лишь колебание  $01q$ . Уменьшение апертуры зеркала по сравнению с зеркалами резонатора № 1 привело к уменьшению возбуждаемых видов колебаний. Радиусы каустических поверхностей меньше, чем для резонатора № 1. Это объясняется тем, что резонатор № 1 ближе к случаю резонатора с плоскими зеркалами, в котором колебания не ограничены каустическими поверхностями [7].

Исследование резонатора № 3, аналогичного по размерам зеркал резонатору № 2, было предпринято с целью выяснения влияния связи на характеристики открытого резонатора. Эксперименты показали, что

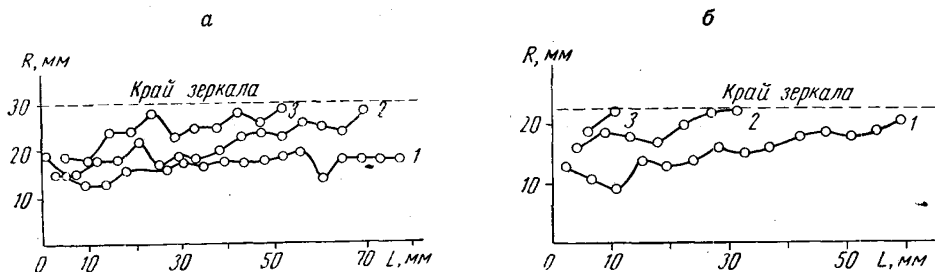


Рис. 3. Радиусы внешних каустических поверхностей: а — для колебаний резонатора № 2 и б — для резонатора № 4. 1 — колебание  $01q$ , 2 — колебание  $02q$ , 3 — колебание  $03q$  ( $\lambda = 8,40$  мм)

изменение связи за счет глубины отверстия не влияет на радиус внешней каустической поверхности и спектр возбуждаемых колебаний.

На рис. 3б показано изменение радиусов каустических поверхностей колебаний, возбуждаемых в резонаторе № 4, в зависимости от расстояния между зеркалами (апертура зеркал резонатора № 4 составляла 45 мм). Каустические поверхности колебаний очень быстро подходят к краям зеркал и при расстоянии между зеркалами 59 мм резонатор перестает возбуждаться.

Нерегулярный характер кривых на рис. 3а и б объясняется тем, что из-за достаточно больших отверстий связи в зеркалах и неидеальности поверхности самих зеркал в резонаторах одновременно с колебаниями  $01q$ ,  $02q$ ,  $03q$  иногда возбуждались с малой амплитудой поля дополнительные колебания, близкие по частоте. В тех случаях, когда было невозможно разделить эти колебания, нами регистрировался радиус каустики такого суммарного поля.

Сравнение результатов исследований, проведенных на резонаторах с различной апертурой зеркал, показали (рис. 3а и б), что уменьшение апертуры зеркал не влияет на размер радиусов внешних каустических поверхностей (вследствие уменьшения апертуры зеркал в резонаторе № 4 при наименьшем расстоянии между зеркалами возбуждались колебания  $0nq$  с индексами  $q$ , на единицу большими, чем в резонаторе № 2).

### Добротность открытых резонаторов

Добротность резонатора № 1 исследовалась при раздвижении зеркал до 40 мм. При этом для колебания  $01q$  добротность возрастала от 3300 до 4100, а для колебания  $02q$  от 2600 до 4000. В экспериментах

с резонатором № 1 исследовано влияние отклонения зеркал от соосности на добротность открытых резонаторов. При расстоянии между зеркалами, равном 4 мм, отклонение оси одного из зеркал от оси резонатора на 5 мм уменьшало добротность вдвое. При увеличении расстояния между зеркалами добротность резонатора становится менее критичной к отклонению зеркал от соосности.

На рис. 4а представлены результаты по измерению добротности резонатора № 2 для колебания  $01q$  и  $02q$  в зависимости от расстояния

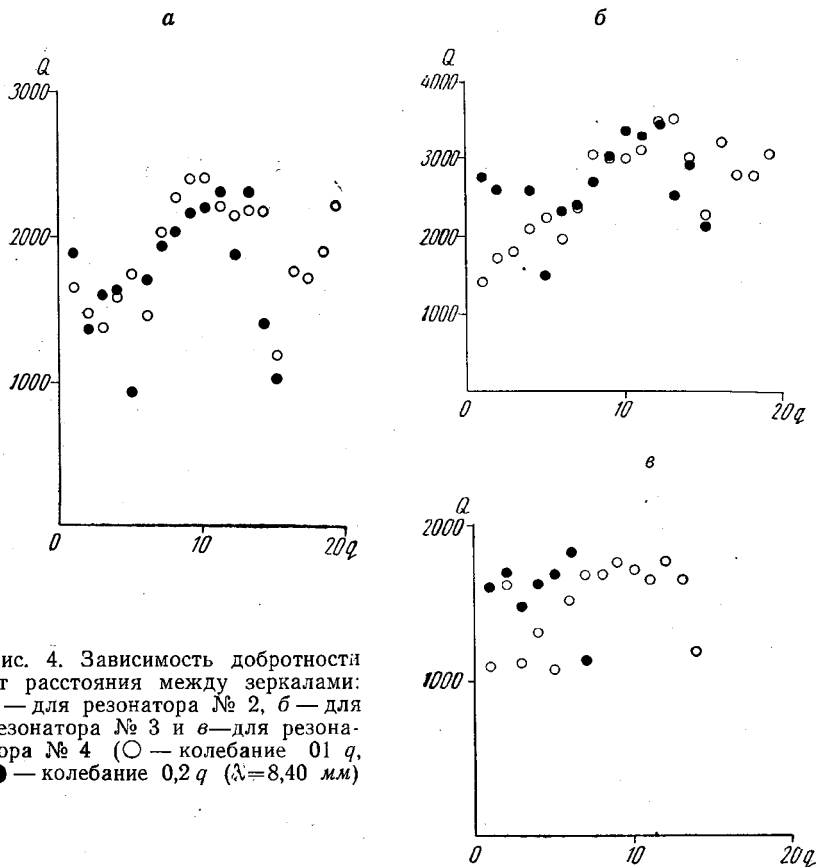


Рис. 4. Зависимость добротности от расстояния между зеркалами: а — для резонатора № 2, б — для резонатора № 3 и в — для резонатора № 4 ( $\circ$  — колебание  $01q$ ,  $\bullet$  — колебание  $0,2q$  ( $\lambda = 8,40$  мм))

между зеркалами  $q$  ( $q$  — в полудлинах волн). При  $q = 10$  добротность резонатора для колебания  $01q$  максимальна и равна 2400. При больших расстояниях между зеркалами добротность падает, причем для колебания  $02q$  более резко. Невысокое значение добротности резонатора в конфокальном случае объясняется тем, что при раздвижении зеркал значительно увеличиваются потери на излучение из-за недостаточно хорошей сферичности поверхностей зеркал.

Максимальное значение добротности резонатора № 3 для колебания  $01q$  — 3600, для колебания  $02q$  — 3500 (рис. 4б). В конфокальном случае добротность этого резонатора 3000. Большие значения добротности такого резонатора несмотря на увеличение связи объясняются меньшими омическими и дифракционными потерями.

На рис. 4в показаны результаты измерения добротности резонатора № 4. Уменьшение апертуры зеркал ведет к увеличению потерь на

излучение и снижению добротности резонатора. Максимум добротности для колебания  $02q$  достигается при меньших расстояниях между зеркалами ( $q=6$ ), чем для колебания  $01q$  ( $q=12$ ).

Разброс точек на рис. 4 объясняется в большей степени возбуждением более сложных видов колебаний чем  $01q$  и  $02q$  (о чем говорилось ранее) нежели неточностью метода измерений. Причем возбуждение дополнительных колебаний, как правило, ведет к ухудшению добротности, так как эти колебания имеют большие потери на излучение.

Эксперименты по измерению добротностей открытых резонаторов со сферическими зеркалами показали, что величина добротности в значительной степени зависит от качества обработки поверхностей зеркал и отверстий связи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zimmerer R. W. Rev. Sci. Instr., 33, No. 8, 858, 1962.
2. Feinstein J. Tubes hyperfréquences, 506—508, Paris, 1965.
3. Вайнштейн Л. А. ЖЭТФ, 45, № 3 (9), 684, 1963.
4. Быков В. П. Сб. «Электроника больших мощностей», № 4, 66, 1965.
5. Fox A. G., Li T. Bell System Tech. Journ., 40, No. 2, 453, 1961.
6. Богомолов Г. Д. Сб. «Электроника больших мощностей», № 3, 154, 1964.
7. Вайнштейн Л. А. ЖЭТФ, 44, № 3, 1050, 1963.

Поступила в редакцию  
6. 12 1966 г.

Кафедра  
радиотехники