ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Том XXXI, № 7 РАДИОФИЗИКА 1988

УДК 621.372.413

ПОЛУСИММЕТРИЧНЫЙ ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ ЗЕРКАЛОМ. I

А. А. Вертий, С. П. Гаврилов, В. Н. Деркач

Приведены результаты расчета и экспериментального исследования полусферического открытого резонатора (ОР) в режиме «на проход» с входным отражателем (элемент распределенной связи) в виде многослойной перестраиваемой диэлектрической структуры. Показано, что наличие перестраиваемого входного отражателя позволяет эффективно управлять оптическими характеристиками и резонансными свойствами ОР. Расчет выполнен в рамках модели слоистого интерферометра.

Резонансные характеристики квазиоптического двухзеркального открытого резонатора (ОР) с распределенной связью, такие, как резонансный коэффициент передачи (РКП ОР) и резонансная длина (L), определяются его конфигурацией и оптическими свойствами зеркал. Особый интерес представляет возможность изменения этих характеристик при плавном изменении оптических параметров отражателей резонатора. Так, в ряде случаев [1, 2] необходимо согласовывать ОР с волноведущей линией или с приемным устройством. При этом коэффициент отражения резонатора в момент резонанса может быть как минимальным, что соответствует согласованному входному сопротивлению приемного устройства, так и максимальным, как в приемном устройстве фурье-скаттерометра [2]. Использование одиночных частично прозрачных металлических слоев не позволяет достичь подобных режимов работы.

В диапазоне миллиметровых волн (ММВ) в конструкциях перестраиваемых отражателей обычно используются металлические решетки с периодом, намного меньшим рабочей длины волны [3, 4]. Однако такие зеркала имеют значительную азимутальную анизотропию оптических характеристик, что приводит к изменению состояния поляризации падающей волны. Кроме того, в коротковолновой части ММВ характерный размер проволочек и непрозрачных штрихов настолько мал, что отражающие элементы имеют низкую механическую прочность, а также химическую и коррозийную стойкость. Свободно от перечисленных недостатков многослойное диэлектрическое зеркало, изготовленное из материалов с малыми потерями на ММВ [5].

В настоящей работе предложено использовать в ОР в качестве элемента связи многослойный диэлектрический интерферометр, образованный изотропными диэлектрическими плоскопараллельными слоями (кварц, воздух), конструкция которого описана в [6].

1. Методы расчета и схема измерений. Исследуемый резонатор представляет собой систему двух зеркал, установленных соосно на расстоянии L (рис. 1а) относительно друг друга. Одно из зеркал плоское, выполненное в виде многослойного диэлектрического отражателя (N пластин), другое — сферическое, с радиусом кривизны R. Резонатор со стороны плоского зеркала возбуждается электромагнитной волной, которая представляет собой основную моду полого диэлектрического лучевода EH_{11} с плоским фазовым фронтом и осесимметричным амплитудным распределением с максимумом на оси, спадающим к краям лучевода по закону Бесселя.

Рассмотрим стационарный режим работы резонатора. В общем случае расчет исследуемого резонатора на основе строгой теории сложен.

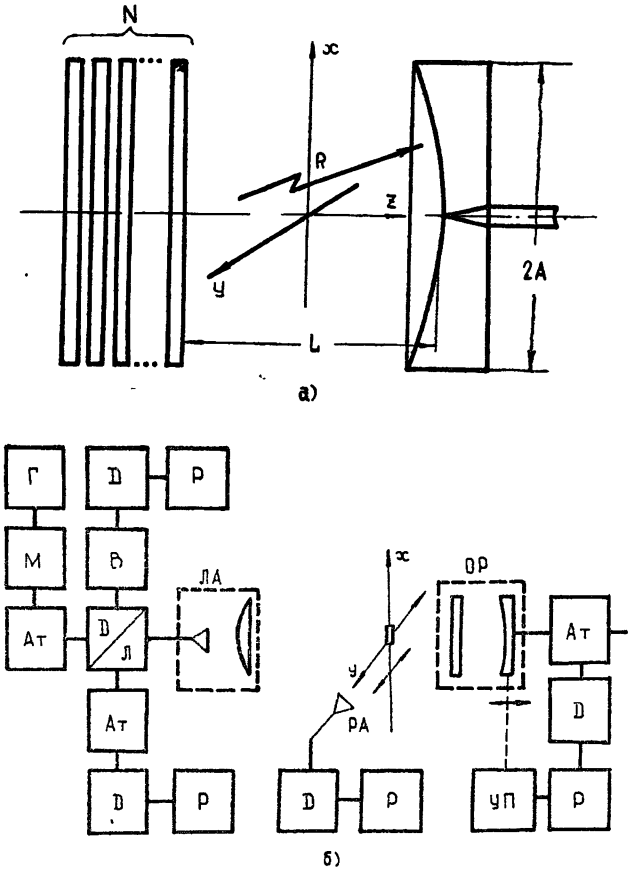

Рис. 1.

Простейшей теоретической моделью может служить плоскослоистый интерферометр, теория которого в приближении плоских волн рассмотрена в [7]. При этом к слоистому интерферометру применима и матричная теория, развитая для оптических многослойных систем [8]. Воспользуемся этой моделью для приближенного расчета основных физических характеристик исследуемого ОР.

Согласно принятой модели ОР на плоскопараллельный резонатор вдоль его оси (ось z) падает монохроматическая плоская волна, линейно поляризованная в плоскости, перпендикулярной оси z. Апертуры зеркал резонатора неограниченные. Моделью сферического зеркала с элементом связи в виде щели является плоское частично прозрачное зеркало, его энергетический коэффициент пропускания определяется параметром связи. Амплитудный коэффициент отражения этого зеркала будет определен, если ввести фазовые условия следующим образом: при отражении от зеркала фаза волны в резонаторе изменяется на π, а при прохождении зеркала сдвиг фазы равен нулю, т. е. фазовые сдвиги на элементе связи не учитываются.

Присвоим окружающим исследуемый интерферометр средам индексы i и k, а прослойке интерферометра (внутренний объем ОР) индекс j, тогда, согласно [7], можно определить матрицу преломления интерферометра в виде

$$W_{ik} = W_{ij} U_j W_{jk}, \tag{1}$$

где W_{ij}, W_{jk} — матрицы преломления отражателей, а U_j — матрица набега фазы на длине резонатора L. Используя явный вид матриц пре-

ломления зеркал резонатора, а также то, что матрицу $\dot{W}_{ik}$ можно записать в виде

$$W_{ik} = \frac{c_{ik}}{\dot{t}_{ik}} \begin{pmatrix} 1 & -\dot{r}_{ki} \\ \dot{r}_{ik} & \dot{\xi}_{ik} \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где $\dot{t}_{ik} \equiv \dot{t} = \tau \exp(-i\beta)$ — амплитудный коэффициент передачи резонатора; $\dot{r}_{ik} \equiv \dot{r} = \rho \exp(-i\alpha)$ и $\dot{r}_{ki} \equiv \dot{r}'' = \rho'' \exp(-i\alpha'')$ — амплитудные коэффициенты отражения резонатора со стороны плоского и сферического зеркал соответственно, можно получить следующие выражения для элементов матрицы (2):

$$\dot{t} = \frac{\tau_1 \tau_2' \exp[-i(\pi p + \beta_1 + \beta_2')]}{1 - \rho_1' \rho_2' \exp[-i(2\pi p + \alpha_1' + \alpha_2')]}; \tag{3}$$

$$\dot{r} = \frac{\rho_1 \exp(-i\alpha_1) + \dot{\xi}_1 \rho_2' \exp[-i(2\pi p + \alpha_2')]}{1 - \rho_1' \rho_2' \exp[-i(2\pi p + \alpha_1' + \alpha_2')]}; \tag{4}$$

$$\dot{r}'' = \frac{\rho_2 \exp(-i\alpha_2) + \dot{\xi}_2 \rho_1' \exp[-i(2\pi p + \alpha_1')]}{1 - \rho_1' \rho_2' \exp[-i(2\pi p + \alpha_1' + \alpha_2')]}. \tag{5}$$

В формулах (3)—(5) τ_i, τ_i' и β_i, β_i' — модули и фазы амплитудных коэффициентов пропускания зеркал резонатора; ρ_i, ρ_i' и α_i, α_i' — модули и фазы их амплитудных коэффициентов отражения; $\dot{\xi}_i = \dot{t}_i \dot{t}_i' - \dot{r}_i \dot{r}_i'$; $p = 2L/\lambda_0$, λ_0 — рабочая длина волны. Коэффициенты $\dot{r}_i$, $\dot{r}_i'$ и $\dot{t}_i$, $\dot{t}_i'$ записываются в виде

$$\dot{r}_i = \rho_i \exp(-i\alpha_i); \tag{6}$$

$$\dot{r}_i' = \rho_i' \exp(-i\alpha_i'); \tag{7}$$

$$\dot{t}_i = \tau_i \exp(-i\beta_i); \tag{8}$$

$$\dot{t}_i' = \tau_i' \exp(-i\beta_i'). \tag{9}$$

Здесь величины, относящиеся к волнам, идущим изнутри интерферометра, обозначены штрихами, индекс $i=1$ относится к плоскому зеркалу, $i=2$ — к сферическому.

При расчете параметров ОР амплитудные коэффициенты отражения и пропускания отражателя, соответствующего сферическому зеркалу, $\dot{r}_2'$ и $\dot{t}_2'$ определялись по (7) и (9) при $\alpha_2' = \pi$, $\beta_2' = 0$, $\tau_2' = \sqrt{\eta_{св}}$, $\rho_2' = \sqrt{1-\eta_{св}}$. При этом согласно [9] коэффициент связи $\eta_{св}$ между рабочими модами внешней линии и резонатора в случае, когда он образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами (фокусное расстояние $R/2$, расстояние между отражателями $2L$) с отверстиями связи (нерезонансная щель размером $a \times d$) в их середине, а внешняя линия — одномодовый прямоугольный волновод сечением $a \times b$ с волной H_{10}, может быть записан в виде

$$\eta_{св} = 4kha^5(R/L-1)^{1/2}\{\pi bR/2k[\pi^2(ka)^2]^2[\ln(kd/4)]^2\}^{-1}, \tag{10}$$

где $k = 2\pi/\lambda_0$, $h = 2\pi/\lambda_в$ — постоянная распространения во внешнем волноводе ($\lambda_в$ — длина волны в волноводе). Амплитудные коэффициенты $\dot{r}_1$, $\dot{r}_1'$ и $\dot{t}_1$, $\dot{t}_1'$ плоского многослойного отражателя рассчитывались по рекуррентным формулам, приведенным в [8].

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1б. СВЧ сигнал от генератора ММВ (Г) через полупроводнико-

вый модулятор (М), развязывающий аттенюатор (АТ) и делитель луча (ДЛ) поступал на линзовую антенну (ЛА), которая формировала квазиоптическую волну в виде слаборасходящегося волнового пучка. Этот пучок, распространяясь вдоль оси резонатора под углом, близким к нормальному, падает на входной отражатель ОР и возбуждает в нем резонансные колебания. РКП ОР или амплитудный спектр ОР регистрировались на выходе резонатора (после детектирования и усиления) в виде осциллограмм на экране ЭЛТ или кривых на ленте самописца, синхронизованного с перемещением одного из зеркал. Геометрические параметры исследуемого резонатора следующие: сферическое зеркало изготовлено из меди, размер апертуры $2A=30\lambda_0$ и радиус кривизны $R=30\,\lambda_0$; плоское диэлектрическое многослойное зеркало с размером апертуры $2A=25\,\lambda_0$ образовано чередующимися диэлектрическими пластинами $N=8$ (кварц $\varepsilon=3{,}84$) и воздушными зазорами. Общее число слоев равно 15. Толщина кварцевых пластин фиксирована и равна $5\lambda_0/4\sqrt{\varepsilon}$, величина зазора между пластинами $(\delta-\delta_0)/\lambda_0$, где δ — рабочий зазор (мм), $\delta_0=1{,}65$ мм, может изменяться в пределах $0\div0{,}15$ [6]. Параметр L/R, где L — резонансная длина ОР, изменялся в пределах $0{,}25\div1{,}0$. Величина δ определялась с точностью 1 мкм, а L — с точностью 5 мкм. Экспериментальное исследование ОР сводилось к определению его резонансных характеристик: резонансной длины, РКП ОР и добротности в зависимости от параметра перестройки входного многослойного отражателя — $(\delta-\delta_0)/\lambda_0$. Измерения проведены в двухмиллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda_0\simeq2{,}2$ мм).

2. Резонансная длина и РКП ОР. Применение в рассматриваемом ОР сложного входного отражателя приводит к тому, что наряду с изменением резонансной длины L перестройку резонатора можно осуществить, изменяя комплексный коэффициент отражения этого зеркала, что следует из дисперсионного уравнения для полусферического ОР [10], в котором учтены фазовые сдвиги, обусловленные коэффициентами отражения r_1' и r_2' зеркал:

$$L=\{q+1/2\pi\,[\arccos(1-2L/R)\,(l+2p+1)+\alpha_1'+\alpha_2']\}\lambda_0/2\,. \qquad (11)$$

Здесь l, p и q — азимутальный, радиальный и продольный индексы резонансных колебаний TEM_{lpq}. Результаты экспериментального исследования и расчета зависимости резонансной длины ОР от параметра перестройки многослойного зеркала приведены на рис. 2. Кривые *1* и *2* рассчитаны по (11) для TEM_{00q} и TEM_{02q} ($q=23$); *3* рассчитана по (11) для плоскослоистого резонатора, эту кривую можно получить из

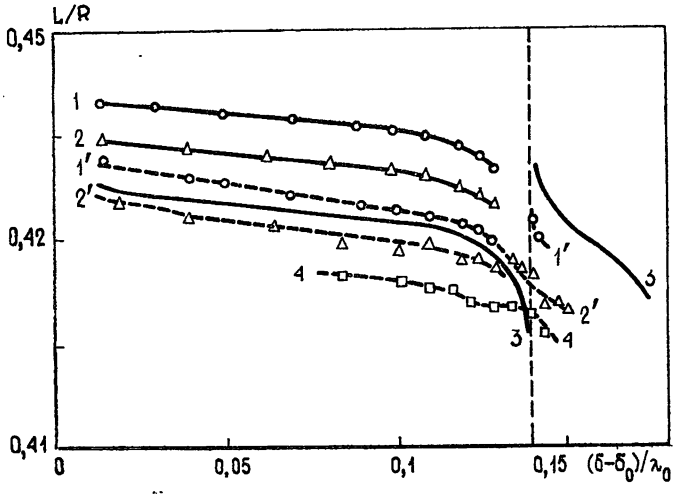

Рис. 2.

расчета по формуле (3); *1*, *2* и *4* — экспериментальные зависимости для TEM_{00q}, TEM_{02q-1} и TEM_{04q-2} ($q=23$) соответственно. Из анализа кривых следует, что, во-первых, используемая модель правильно описывает резонансные свойства реального резонатора, во-вторых, перестройка входного отражателя, изменение его коэффициента отражения приводят, как это следует из (11), к существенному изменению резонансного расстояния ОР практически на всех модах. Характерно также, что при определенном значении $(\delta-\delta_0)/\lambda_0 = 0{,}14$ изменение резонансных значений (кривые *1* и *1'*) происходит скачком. В остальной области приведенных зависимостей оно монотонно. При $(\delta-\delta_0)/\lambda_0 \geqslant 0{,}07$ резонансные свойства исследуемого ОР приближаются к свойствам плоскопараллельного слоистого интерферометра Фабри—Перо. Наблюдаемый скачок можно объяснить тем, что согласно (11) $L=L(\alpha_1')$, а фаза α_1' при $(\delta-\delta_0)/\lambda_0 = 0{,}14$ изменяется скачком на π. При этом резонансная длина L изменяется на $\lambda_0/4$. Физически это значит, что при значении параметра $(\delta-\delta_0)/\lambda_0=0{,}14+0$ наблюдается максимум РКП, а при $(\delta-\delta_0)/\lambda_0=0{,}14-0$ — минимум. При $(\delta-\delta_0)/\lambda_0=0{,}14$ резонансное колебание отсутствует, коэффициент передачи резонатора определяется коэффициентом пропускания эквивалентного зеркала. Для колебаний высших типов изменение резонансной длины ОР вблизи значения $(\delta-\delta_0)/\lambda_0=0{,}14$ выражено в меньшей мере, что объясняется различием коэффициентов отражения перестраиваемого зеркала для плоской волны и гауссовых пучков, возбуждаемых в исследуемом ОР.

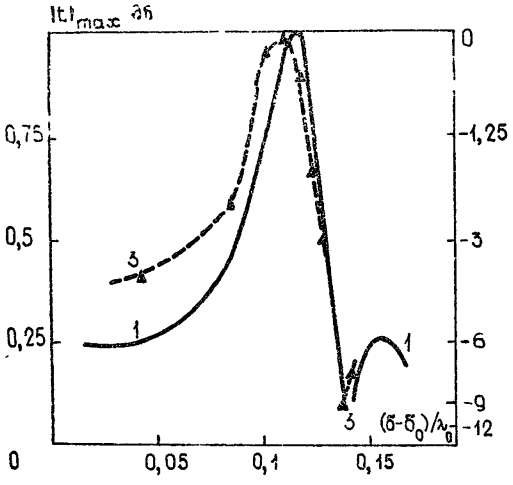

Рис. 3.

Огибающая РКП ОР (огибающая модулей резонансных коэффициентов передачи) в зависимости от параметра перестройки плоского зеркала на основном типе колебания TEM_{00q} ($q=23$) приведена на рис. 3, где кривая *1* — расчет по (3), кривая *3* — эксперимент. Наблюдается качественное соответствие кривых. Смещение максимума экспериментально полученной кривой в сторону больших значений коэффициентов отражения плоского зеркала свидетельствует о том, что в ОР существуют внутренние потери, кроме потерь на связь, такие, как потери на поглощение и дифракцию. На практике это можно использовать для измерения внутрирезонаторных потерь. Существование максимума РКП ОР объясняется тем, что выполняется равенство коэффициентов пропускания зеркал ОР, т. е. $\tau_1=\tau_1'=\tau_2=\tau_2'$, при малом коэффициенте внутренних потерь μ резонатора $|\mu \ll 1|$ и малых потерях на поглощение в его отражателях. В этом случае коэффициент передачи ОР близок к единице и по значению τ_1 могут быть найдены оптические параметры τ_2, τ_2', ρ_2, ρ_2', соответствующие согласно принятой модели ОР сферическому зеркалу с элементом связи в центре. Предлагаемая тео-

ретическая модель позволяет рассчитать РКП ОР при изменении ряда основных геометрических параметров ОР, таких, как резонансное расстояние между зеркалами, радиус кривизны сферического зеркала, размер щели связи на сферическом зеркале.

Результаты сопоставления рассчитанных зависимостей и экспериментальных данных свидетельствуют о том, что модель ОР в основном правильно описывает поведение РКП ОР при изменении этих параметров. Однако при расчете не учитываются дифракционные потери, что приводит к неверному описанию РКП ОР в области значений L/R, близких к единице при значениях $(\delta-\delta_0)/\lambda_0 \leqslant 0{,}1$.

Особый интерес для ряда практических применений представляет исследование РКП ОР на высших модах [12]. При возбуждении исследуемого резонатора по схеме рис. 1 в нем в области $L/R=0{,}5$ и оптимальном значении $(\delta-\delta_0)/\lambda_0 = 0{,}1232$ возбуждалось девять мод от TEM_{00q} до TEM_{08q}. Несмотря на то, что в таком ОР должны возбуждаться аксиально-симметричные моды, в эксперименте наблюдалось снятие вырождения высших мод при некоторых значениях $(\delta-\delta_0)/\lambda_0$. Это проявляется в появлении в амплитудном спектре ОР четно-симметричных мод двухосевой симметрии TEM'_{mnq} (m и n — поперечные индексы мод, характеризующие число вариаций поля вдоль осей x и y), что может быть связано с нарушением симметрии оптических свойств перестраиваемого отражателя. Наиболее характерной особенностью ОР с таким отражателем является то, что максимальные значения огибающей РКП ОР для всех возбуждаемых мод достигаются при разных значениях параметра перестройки. Этот результат приведен на рис. 4, из которого следует, что возможен режим согласования ОР с передающей линией. Наилучшее согласование (максимальный РКП ОР) достигается на низших модах. С ростом радиального индекса РКП ОР уменьшается, однако, перестраивая входное зеркало ОР, можно добиться оптимального режима работы резонатора на каждой из высших мод. Кривая J_Φ на рис. 4 характеризует изменение нерезонансного фона коэффициента передачи ОР при его расстройке в зависимости от параметра перестройки входного зеркала. Видно, что в диапазоне высоких значений его коэффициента отражения уровень нерезонансного фона постоянен и составляет приблизительно — 27 дБ. Это значение определяет динамический диапазон изменения коэффициента передачи исследуемого ОР.

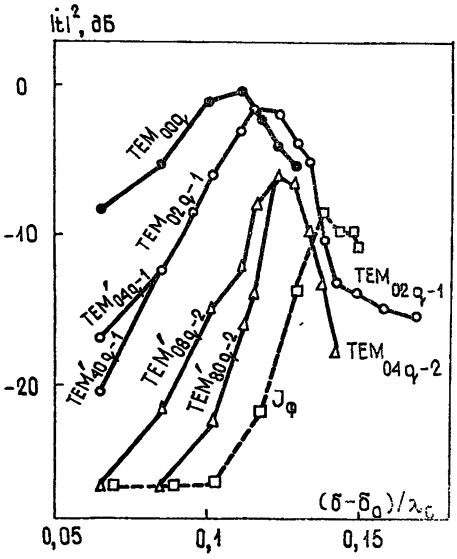

Рис. 4.

3. Добротность резонатора. Существование связи между коэффициентом передачи резонатора и его добротностью [11] позволяет, в рамках исследуемой модели, оценить изменение нагруженной добротности ОР Q от параметров входного зеркала. Если коэффициент внутренних потерь резонатора $\mu \ll 1$, то в отсутствие диссипативных потерь в отражателях и малости коэффициентов связи ОР с волноведущей линией добротность Q можно найти по формуле

$$Q = q\pi/[\mu + 1/2(\tau_1^2 + \tau_2^2)]\,. \qquad (12)$$

В эксперименте добротность определялась по ширине резонансной кривой на уровне половины мощности $Q \simeq L/\Delta L$ при неизменной частоте

генератора и перестройке резонансной длины резонатора. На рис. 5 приведены кривые, характеризующие расчетную и экспериментальную (мода TEM_{00q}) зависимости добротности от параметра перестройки $(\delta-\delta_0)/\lambda_0$. Кривая *1* рассчитана по (3); *2* — экспериментальные данные для TEM_{00q} $(q=23)$; кружки на кривой *1* соответствуют значениям Q, полученным по (12) с $\mu=0$, а на кривой *3* — значениям Q по (12) с $\mu=1{,}8\cdot10^{-3}$. Из этого рисунка следует, что расчет добротности (как и РКП) резонатора в зависимости от перестройки входного зеркала на основе используемой простой модели качественно согласуется с экспериментальным исследованием на основном типе колебания.

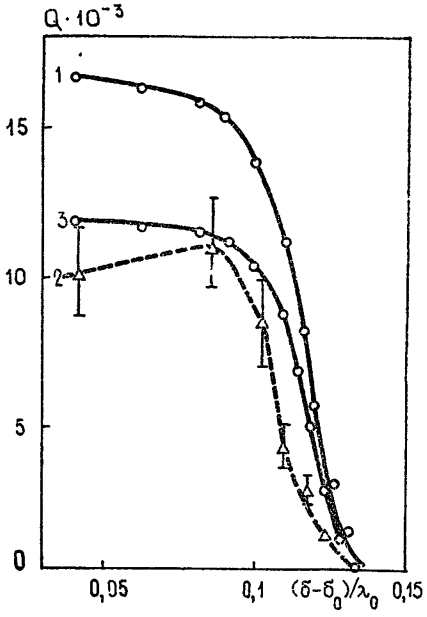

Рис. 5.

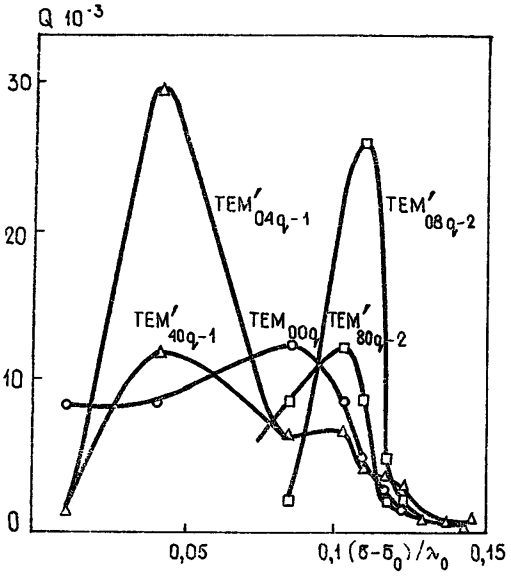

Рис. 6.

Результаты экспериментального исследования добротности высших мод резонатора приведены на рис. 6. Максимальные значения Q_{lp} соответствуют разным значениям $(\delta-\delta_0)/\lambda_0$. Этот результат может быть использован для выделения путем перестройки входного зеркала отдельных резонансных мод с заданными значениями добротности. Следует также отметить сильное различие полученных в эксперименте значений добротности расщепившихся мод TEM'_{04q} и TEM'_{40q}; TEM'_{08q} и TEM'_{80q}, что при общей симметрии системы может быть вызвано определенной азимутальной анизотропией оптических характеристик плоского зеркала для гауссовых пучков, возбуждаемых в ОР. Набор аналитических формул, рассматриваемых в рамках принятой модели ОР, позволяет рассчитывать помимо РКП ОР значения нагруженной добротности основной моды ОР в зависимости от ряда характерных параметров резонатора.

Таким образом, в результате расчета и экспериментальных исследований полусферического квазиоптического ОР с перестраиваемым входным отражателем в виде многослойного диэлектрического интерферометра, установлено следующее.

1) В определенном диапазоне изменения основных параметров исследуемого ОР для анализа его физических свойств правомерно использовать теоретическую модель слоистого интерферометра в приближении плоских волн с неограниченным фазовым фронтом. Результаты расчета в рамках этой модели и данные опытов, проведенные в диапазоне ММВ, находятся в хорошем качественном, а в ряде случаев и количественном соответствии.

2) При изменении параметра перестройки входного отражателя изменяется резонансная длина резонатора на всех модах, возбужденных в ОР. Для исследуемого ОР характерно нарушение непрерывности резонансных свойств при определенном значении параметра перестройки $(\delta-\delta_0)/\lambda_0=0{,}14$. При значениях этого параметра $\geqslant 0{,}07$ резонансные свойства ОР на основной моде приближаются к свойствам плоскопараллельного слоистого интерферометра Фабри—Перо с бесконечными зеркалами. Для высших типов колебаний особенность в резонансных свойствах ОР выражена в меньшей степени. При $(\delta-\delta_0)/\lambda_0\leqslant 0{,}07$ резонансные свойства ОР на всех модах близки к свойствам классического ОР с металлическими зеркалами , описанного, например, в [10].

3) Максимальные значения резонансного коэффициента передачи ОР на разных модах достигаются при различных значениях коэффициента отражения входного отражателя. При этом можно достигать оптимального согласования возбуждающего ОР пучка с каждой из резонансных мод в отдельности.

4) При определенных значениях коэффициента отражения входного зеркала и резонансных длинах резонатора снимается вырождение некоторых высших аксиально-симметричных мод. При этом значения РКП ОР и добротности расщепившихся компонент существенно отличаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вертий А. А., Деркач В Н., Шестопалов В. П. Тезисы докладов Всесоюзной конференции — Хабаровск, 1981, 3, с. 100.
2. Вертий А А, Деркач В. Н, Попков Ю П, Шестопалов В. П Вкн.: Физика и техника миллиметровых волн — Киев· Наукова думка, 1983, с. 68.
3. Богомолов Г. Д., Русин Ф. С. — Радиотехника и электроника, 1970, **15**, вып 4, с. 852.
4. Яновский М.С., Князьков Б.Н., Кулешов Е.М. — Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1980, **23**, № 2, с. 101.
5. Culshou W. — Proc Phys Soc., 1953, **66B**, № 403, p. 597.
6. Вертий А. А., Гаврилов С П., Деркач В. Н, Шестопалов В. П — Изв. вузов — Радиофизика, 1985, **28**, № 6, с. 783.
7. Розенберг Г В Оптика тонкослойных покрытий. — М: Физматиздат, 1958, с. 570
8. Бернинг П. Х. — В сб· Физика тонких плонок. — М.: Мир, 1976, с. 370.
9. Казанцев Ю. Н. — Изв. вузов — Радиотехника, 1967, **10**, № 4, с. 518.
10. Валитов Р. А, Дюбко С. Ф., Камышан В. В. и др. Техника субмиллиметровых волн. — М.: Сов. радио, 1969. — 477 с.
11. Пиппард А. Физика колебаний. — М. Высшая школа, 1985 — 456 с
12. Вертий А. А., Деркач В. Н., Шестопалов В. П. Препринт ИРЭ АН УССР № 245. — Харьков, 1984.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
21 июля 1986 г.

SEMISYMMETRIC OR WITH THE RETUNED INTERFERENCE MIRROR. PART 1

A. A. Vertij, S. P. Gavrilov, V. N. Derkach

The results of calculation and experimental investigation of a semisymmetric open resonator (OR) in the regime «for the transmission» with an input reflector in the form of a multilayer retuned structure are given. It is shown that the presence of the retuned input reflector allows are to control effectively optic characteristics and resonance OR properties. The calculation has been carried out for the multilayer interferometer model.