

# 多环端镜激光谐振腔的探讨

李先枢 高燕球

(物理系)

## 摘 要

多环端镜激光腔中各阶横模特性的一些计算结果表明:适当结构的这类新型腔与普通激光腔比较,可具有较大的横模选择性与基横模光斑半径。不考虑开孔衍射的准几何光学理论不适用于这类新型腔。新型腔可使某些单横模工作激光器的最佳输出功率约为应用相应的普通激光腔时的两倍或两倍以上。

**关键词** 光学谐振腔, 横模, 横模选择性, 多环衍射屏, 激光器输出功率

## 1 前 言

自从1958年Dicke<sup>[1]</sup>, Прохоров<sup>[2]</sup>, 以及Schawlow和Townes<sup>[3]</sup>独立地提出应用法布里—珀洛干涉仪作为激光谐振腔以来,这种腔已不仅是激光器的基本组成部分,对输出激光束的许多重要性质有关键性的影响<sup>[4]</sup>,而且已有了其它重要应用<sup>[5-10]</sup>。

多环端镜激光腔最早由李先枢提出<sup>[11]</sup>,认为可具有较大的横模选择性。

本文目的是通过对具有不多个环(较易加工)的多环端镜腔的系列计算,研究这类新型腔中各阶横模的性质,特别是研究此类新的激光腔可否获得较强的横模选择性,较大的基横模光斑半径和所需的场结构。

## 2 基本公式

为简单起见,我们计算对称腔,即腔的两面端反射镜的曲率半径 $R$ 和多环结构均相同的情形,如图1所示。我们还限制环的数目 $t \leq 4$ ,端反射镜外径一律取为 $a = \sqrt{2\lambda d}$

( $d$ ——对称腔腔长, $\lambda$ ——光波波长),并取定 $g = 1 - \frac{d}{R} = 0.5$ 。

本文于1987年4月收到

这些限制表明，我们还没有去研究许多因素的影响与较复杂的结构。而且我们已计算的四环结构类型也是很少的。

图2所示的平凹腔结构中，平面反射镜可看作一个孔径无穷大的圆镜，这种腔中各阶横模场结构均与图1所示的对称腔相同<sup>[12]</sup>。图2中的

$\Sigma'\Sigma'$ 平面便相当图1中的 $\Sigma\Sigma$ 平面。图1结构中横模的单程损耗与相移便相当它在图2结构中往返一周 (a round-trip) 的全程损耗与相移。因此我们称图2结构为图1对称腔的“等价平凹腔”。这种等价关系对某些多环端镜激光腔十分重要。因为若用图2结构中的平面镜为激光器的输出镜，便可免除激光束透过多环衍射孔时产生的衍射。

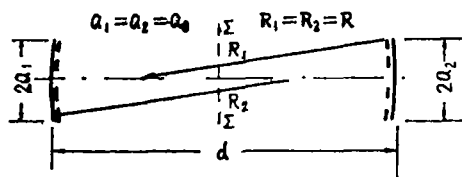


图1 对称腔结构示意图

Fig.1 Geometry of an axisymmetric optical resonator

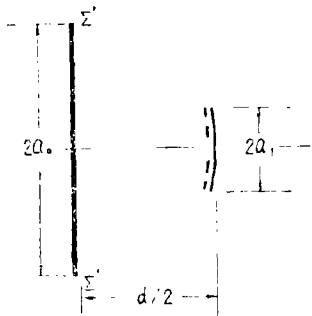


图2 图1结构的“等价平凹腔”结构示意图  
Fig.2 An “equivalent plane-concave resonator” of the structure illustrated in fig. 1

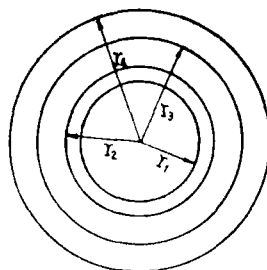


图3 多环端镜上的多环结构示意图  
Fig. 3 The multi-ring configuration on end-reflector

图3示意给出腔端反射镜上的多环结构。设第*i*个环的复振幅反射系数为  $a_i e^{j\theta_i}$ ，那么光从图1所示对称腔中紧靠一个端镜面前的球面开始，经过镜面上这个环的反射而达到紧贴在另一端镜面前的球面止的光传播矩阵  $\{A_{is}^{(i)}\}$ ，即第*i*个圆环的单程光传播矩阵，可以表示为<sup>[14,16]</sup>

$$\{A_{is}^{(i)}\} = a_i e^{j\theta_i} [\{A_s^{(i)}(r_{2i})\} - \{A_s^{(i)}(r_{2i-1})\}]. \quad (1)$$

式中  $A_s^{(i)}(r_n)$  是端反射镜为半径  $r_n$  的圆镜时，该谐振腔的单程光传播矩阵，它是对于场结构具有1-重轴对称性质的横模的。矩阵  $\{A_s^{(i)}(r_n)\}$  据[14]写出。与所沿用的计算机程序有关，本文中采用的参照光场同[13]。经检验，所得各种对称稳定激光腔中各阶横模性质均与[15]中所得的符合。

整个多环端镜激光腔单程光传播矩阵为<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} \left\{ A_{s\Sigma}^{(1)} \right\} &= \sum_{i=1}^t a_i e^{j\theta_i} \left\{ A_{is}^{(1)} \right\} \\ &= \sum_{i=1}^t a_i e^{j\theta_i} \left[ \left\{ A_s^{(1)}(r_{2i}) \right\} - \left\{ A_s^{(1)}(r_{2i-1}) \right\} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

与[11,13]中对普通激光腔性质的计算一样,把(2)式代入自治场矩阵方程<sup>[11]</sup>,便可求得各阶横模TEM<sub>p<sub>l</sub></sub>的本征值 $\gamma_p^{(1)}$ 与本徵矢——横模的场分布矢量 $\vec{X}_p^{(1)} = [\alpha_{p0}^{(1)}$ ,

$\alpha_{p1}^{(1)}, \alpha_{p2}^{(1)}, \dots, \alpha_{pN}^{(1)}]$ , 这里(N+1)为矩阵方程截取的阶数。由此求得该横模的单程损耗 $L'_{pl} = 1 - \left| \gamma_p^{(1)} \right|^2$ , 与单程附加相移 $\theta_p^{(1)} = \arg(\gamma_p^{(1)}) + \cos^{-1}g$ 。据[16]已知 $\vec{X}_p^{(1)}$ 与参照光场性质,便可求出镜面上的场分布

$$U_p^{(1)}(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^N \alpha_{pn}^{(1)} \phi_{ln}(\xi, z) \cdot e^{jsl\varphi} \quad (3)$$

$$\text{而 } \phi_{ln}(\xi, z) = \frac{\sqrt{(2n+1)\pi}}{\Gamma(n+l/2+1)} \left(\frac{\rho^2}{q}\right)^{n+1/2} e^{-\rho^2/q} u_n(0, z) \quad (4)$$

我们不重复[16]中的有关介绍,仅指出,为确定(4)中的q值,需把图1所示腔变成图4所示等价腔。L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>为二薄透镜,面1与面2应对图1所示腔中两个端镜的镜面。设a→∞时图4中基横模在面1、面2上的光斑半径为w<sub>f</sub>,轴附近等相面曲率半径为±R<sub>f</sub>,则(4)式中

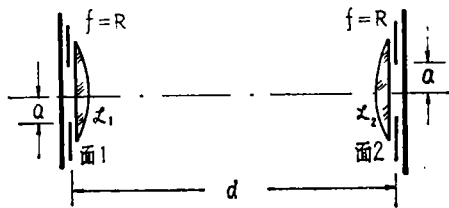


图4 与图1结构等价的平面屏系统L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>为二薄透镜,与开孔及反射镜面无限靠近

Fig.4 A system, consisting of planescreens, is equivalent with structure figured in Fig.1. L<sub>1</sub>,L<sub>2</sub> are two thin lenses, infinite closed to the apertures and mirror surfaces

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{w_f} \mp j \frac{k}{2R_f} \quad (5)$$

在所取参照光场情形

$$w_f^2 = \frac{\lambda d}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-g^2}}, \quad \frac{1}{R_f} = 0 \quad (6)$$

而(3)式中 $e^{jsl\varphi}$ 仅取实部或虚部,即可写为 $\cos(sl\varphi)$ 或 $\sin(sl\varphi)$ 。计算中我们取 $u_p^{(1)}$

$(\rho, \varphi) |_{max} = 1 (\rho \leq a)$ 。

在所有计算中截取光传播矩阵为20阶(N=19),经检验,所得结果的精度已很充分,损耗值已可有两位或两位以上的有效数值。

### 3 已得的部分结果

为说明多环端镜腔的某些重要性质，本节挑选介绍几个这种腔的计算结果。表1、表2中罗列了这些腔中损耗较低的一些横模的性质，图5—7中绘出了其中一些横模场的实振幅分布。

分析这些结果可得出如下结论：

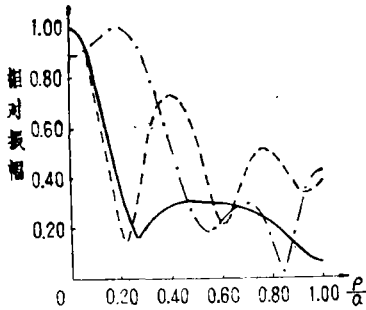


图5 SC I.6.23 腔中几个损耗较低的  $TEM_{p0}$  模场的相对振幅分布  
 ——  $TEM_{00}$  模，-----  $TEM_{10}$  模，  
 - · - · -  $TEM_{20}$  模

Fig.5 The relative amplitude distributions of the field of several  $TEM_{p0}$  modes with the lowest losses in resonator SC I.6.23. Key: ——  $TEM_{00}$ , -----  $TEM_{10}$ , - · - · -  $TEM_{20}$

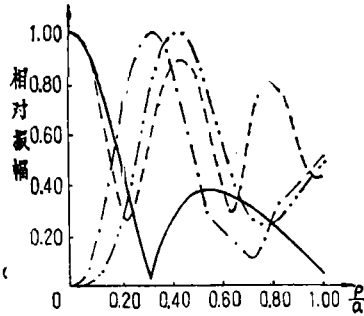


图6 SC I.6.2—多环端镜腔中几个损耗最低的横模实振幅的径向分布  
 -----  $TEM_{00}$  模，——  $TEM_{10}$  模，  
 - · - · -  $TEM_{02}$  模，- - - -  $TEM_{03}$  模

Fig.6 The radial real amplitude distributions of several transverse modes in resonator (with multi tiring end-mirror) SC.6.2 Key: ——  $TEM_{00}$ , -----  $TEM_{10}$ , - · - · -  $TEM_{02}$ , - - - -  $TEM_{03}$

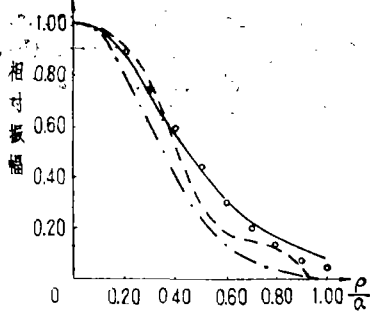


图7 几个腔中基横模场结构的比较：

- SCI.1.6-多环端镜腔，
- FPCI.4.3-多环端镜腔，
- · - · - FN=2,  $g_1=g_2=0.5$ 的普通对称激光腔，
- o o o o 函数  $\exp(-\rho^2/w^2)$ ，其中  $w$  为 SCI.1.6-腔中基横模的光斑半径

Fig.7 Comparison of field structures of fundamental transverse modes in several resonators Key:

- resonator (with multi-ring end-mirror) SCI.1.6, ----- resonator (with multi-ring end-mirror) FPCI.4.3, - · - · - conventional symmetric laser resonator FN=2  $g_1=g_2=0.5$

第一，多环端镜腔中横模的场结构一般与不考虑开孔衍射的准几何光学近似结果—拉盖尔—高斯光束场结构相差较远，例如图5中不仅各  $TEM_{p1}$  模的场分布的极小值均异于零，而且其极小值的数目均不等于  $p$ 。

第二，普通激光腔中的模简并规律，一般被彻底破坏了。据准几何光学近似，普通

对称稳定腔中, 损耗较小横模的单程相移可以相当好的由下列公式近似表示,

$$\theta_p^{(l)} = (2p + l + 1) \cos^{-1} g \quad (7)$$

因此, TEM<sub>p,l</sub>模的共振频率与TEM<sub>p-1,l+2</sub>模的相同。从表1、表2中看出, 这种模简并规律显然不成立。

第三, 普通轴对称激光腔中横模损耗的顺序被破坏了。

我们曾计算过许多轴对称稳定激光腔<sup>[13,16]</sup>, TEM<sub>0,l+1</sub>模的损耗总大于TEM<sub>0,l</sub>模的损耗。但这规律在表1所示腔中显然不适用。

表1 SC II.6系列多环端镜腔中各阶TEM<sub>p,l</sub>模的特性示例  
Tab.1 Typical examples of characteristics of various order TEM<sub>p,l</sub> modes in SC II.6 series resonators with multi-ring end-mirrors

多环端镜腔 结构编号		SC II.6.23			SC II.6.2		
横模标志		单程损耗		单程	单程损耗		单程
l	p	L'	L = -ln(1-L')	相移	L'	L = -ln(1-L')	相移
l=0	0	0.039	0.0397	0.31°	0.052	0.053	0.55°
	1	0.59	0.892	109.91°	0.58	0.87	109.36°
	2	0.63	0.994	72.12°	0.66	1.08	79.91°
	3	0.86	1.966	40.91°	0.84	1.83	26.39°
	4	0.97	3.507	117.50°	0.96	3.22	99.45°
l=1	0	0.51	0.713	63.17°	0.70	1.20	63.05°
	1	0.72	1.273	123.93°	0.81	1.66	12.06°
	2	0.83	1.772	12.17°	0.84	1.83	128.42°
	3	0.84	1.833	7.85°	0.88	2.12	32.64°
	4	0.95	2.996	23.98°	0.92	2.53	2.42°
l=2	0	0.48	0.654	356.12°	0.52	0.73	353.41°
	1	0.67	1.109	39.81°	0.67	1.11	95.03°
	2	0.91	2.408	59.69°	0.88	2.12	47.63°
	3	0.97	3.507	132.26°	0.97	3.51	93.35°
l=3	0				0.51	0.71	88.30°
	1				0.59	0.89	91.50°
	2				0.60	0.92	44.91°
	3				0.98	3.9	58.47°

\*同一系列的多环端镜腔结构大致相同, 只是其中某一环的宽度不同。

以上三点可以归结为: 对普通激光腔很有用处的准几何光学近似, 对多环端镜激光腔却一般不适用——这里必须考虑衍射的影响。

第四, 可使普通激光腔中某一高阶模成为多环端镜腔中的基横模, 并具有较高的横模选择性——此横模损耗很低的同时, 所有其它横模的损耗却相当高。

表2 FPC I.4.3和SCI.1系列多环端镜腔中TEM<sub>pl</sub>模特性示例  
 Tab. 2 Typical examples of characteristics of TEM<sub>pl</sub> modes in FPC I.4.3 and SCI.1 series resonators with multi-ring end-mirrors

多环端镜腔 结构编号		FPCI.4.3		SCI.1.6		SCI.1.5		SCI.1.4	
基横模光斑半径		w <sub>m</sub> = 0.468a*		w <sub>m</sub> = 0.555a		w <sub>m</sub> = 0.545a		w <sub>m</sub> = 0.53a	
横模标志		L = -		L = -		L = -		L = -	
1	p	单程损 耗L'	单程 相移 ln(1-L')	单程损 耗L'	单程 相移 ln(1-L')	单程损 耗L'	单程 相移 ln(1-L')	单程损 耗L'	单程 相移 ln(1-L')
0	0	0.0122	60.64°	0.0122	60.65°	0.00767	60.59°	0.00495	60.56°
0	1	0.362	26.33°	0.242	335.14°	0.234	336°	0.239	336.29°
0	2	0.377	338.11°	0.251	25.15°	0.257	23°	0.266	21.32°
1	0	0.232	125.49°	0.211	125.96°	0.153	123.22°	0.0998	121.96°
1	1	0.360	105.1°	0.314	102.87°	0.4271	98.91°	0.426	96°
1	2	0.527	98.39°	0.430	98.89°	0.4272	97.35°	0.510	92.37°
2	0	0.315	342.51°	0.195	339.45°	0.200	340.03°	0.221	340.54°
2	1	0.345	21.98°	0.233	20.99°	0.244	19.16°	0.256	16.81°

$a = \sqrt{2\lambda d} \approx 1.41\sqrt{\lambda d}$ ,  $\lambda$  —— 光波长,  $d$  —— 对称激光腔 (图1所示) 腔长

表3 在准几何近似的TEM<sub>10</sub>模节线处加一个黑环的SCI.4.1腔的横模损耗特性  
 Tab. 3 The losses of transverse modes in resonator SCI.4.1 with a black ring at the node line of TEM<sub>10</sub> obtaining in quasi-geometric approach

横模 标志	1 =	0	1	2	3	1	2
单程损耗L'	p =	0	1	2	3	0	1
0.00337	0.169	0.178	0.714	0.119	0.385	0.846	0.104
							0.224
							0.691

通常在低增益激光器中,在准几何近似中某一 $TEM_{p,l}$ 模节线处加上不反光的细线圈,便可使激光器实现这种横模的单横模运转。这种方法常用于显示激光器中横模的模式。但这种腔的横模选择性过去并不高,也不见把它应用在控制产生较强激光器的单横模运转上<sup>1)</sup>。这是由于过去计算此种腔还较为困难,一直只能以定性考虑作为结构设计基础,结构简单之故。由于我们能进行这类腔的系列计算,才能设计与选择性质较好的、较杂复的结构。SC II 6.2腔的性质虽仍非理想,但横模选择性已有了相当的提高。并且由图6看出,改进上述腔结构,进一步大大提高其选择性,估计并非难事。

第五,可增加具有近高斯分布的横模场的光斑半径,并同时增加横模选择性。比较图7中诸横模场分布曲线,便可看出SCI.1.6号腔中基横模光斑半径较普通激光腔中增加。下节例(iii)的数据表明,腔的横模选择性也同时增强了。

综合上述第四、五两点可以看出:适当改变腔的多环结构,有可能按照人们的需要来控制与塑造腔中各横模的场结构以及它们的损耗。这种可能性显然是十分诱人的。

## 4 讨论

本节据A. yariv的专著[17],将SC II .6.2与SC I .1.5腔应用于激光器,使之实现单横模运转,与普通小孔激光腔比较,考察它们的实用价值。

设 $L'_0$ 为腔中基横模场往返一周的损耗<sup>[17]</sup>, $L'_1$ 为损耗第二小横模的此种损耗, $g_0 = 2al(l$ —激光物质长度, $\alpha$ —腔中激光物质增益系数, $r_1$ 、 $r_2$ 为两个腔端镜实振幅反射系数。令

$$L_0 = -\ln(1 - L'_0), L_1 = -\ln(1 - L'_1), T = -\ln r_1 r_2, \quad (8)$$

那么当

$$g_0 = T + L_1 - \text{小数} \approx T + L_1 \quad (9)$$

时,激光器应刚好能实现单横模运转。据[17],挑选输出镜透过率使激光器获得最大输出功率,这时的 $T$ 值应取为

$$T_{opt} = -L_0 + \sqrt{g_0 L_0} \approx \frac{1}{2} L_0 \left[ \sqrt{1 + 4 \left( \frac{L_1}{L_0} - 1 \right)} - 1 \right] \quad (10)$$

上式中应用了(9)式,而激光器单横模输出功率

$$(P_0)_{opt} = 2I_s A (\sqrt{g_0} - \sqrt{L_0})^2. \quad (11)$$

上式中 $I_s$ 称为饱和强度,仅与激光物质有关。令 $V_m$ 为横模体积, $w$ 为光斑半径,则

$$A = V_m / l \propto w^2. \quad (12)$$

为确定起见,下面各例中假设 $L'_0$ 、 $L'_1$ 便是横模的衍射损耗,即忽略吸收与散射等损耗。

4.1 取SC II 6.2 对称腔构造激光器。由表I查得 $L_0 = 2 \times 0.053$ ,  $L_1 = 2 \times 0.73$ 。据(10)式与(9)式,选择 $T = 0.33$ ,  $g_0 = 1.78$  (光在腔内往返一周,增益为 $e^{g_0} = 5.93$ ),

1) 一个性质较好的这种腔中各横模的损耗特性见表3。

据(11)式激光器输出功率为

$$(P_0)_{opt} \propto 2I_s w_m^2 (1.017)$$

$w_m^2$ 为SC II 6.2腔中基横模光斑半径。

在我们已有计算资料中查到： $g_1 = g_2 = 0.5$ 的对称腔中，当 $FN = 0.5$ ， $TEM_{00}$ 与 $TEM_{01}$ 模的单程衍射损耗为 $L'_{00} = 0.168$ ， $L'_{01} = 0.53$ ，即 $L_0 = 2 \times 0.184$ ， $L_1 = 2 \times 0.76$ 其中 $L_1$ 与SC II 6.2腔较接近，便以此腔构造激光器，类前取 $T = 0.49$ ， $g_0 = 2.00$ （增益 $e^{g_0} = 7.39$ ）得此时激光器单横模输出功率为

$$(P_0)'_{opt} \propto 2I_s w^2 (0.652)$$

二个输出功率之比

$$\beta = \frac{(P_0)_{opt}}{(P_0)'_{opt}} = \frac{w_m^2}{w^2} \cdot \frac{1.017}{0.652} = 1.56 \times \frac{w_m^2}{w^2} \quad (13)$$

式中 $w$ 为上述普通腔中基横模的光斑半径，与图7所示差不多，显然 $w^2 < w_m^2$ ， $\beta > 2$ 。

本例中应注意，二个激光器的增益比为 $\frac{7.29}{5.93} = 1.25$ 。结果增益小的激光器因用了多环端镜腔，其单横模输出功率反而比增益大的激光器大得多。而且强度也是前者比后者大（比例1.56）

4.2 前例中，两种腔均改用等价的平凹腔，应用SC II 6.2腔时， $L_0 = 0.053$ ， $L_1 = 0.73$ 。类前取激光器 $T = 0.165$ ， $g_0 = 0.89$ （ $e^{g_0} = 2.435$ ）。激光器单横模输出功率为

$$(P_0)_{opt} \propto 2I_s w_m^2 (0.508)$$

应用前例普通激光腔的等价平凹腔。求得 $L_0 = 0.184$ ， $L_1 = 0.76$ 。取 $T = 0.245$ ， $g_0 = 1.00$ （ $e^{g_0} = 2.718$ ）。激光器单横模运转输出功率

$$(P_0)'_{opt} \propto 2I_s w^2 (0.326)$$

二者之比

$$\beta = \frac{(P_0)_{opt}}{(P_0)'_{opt}} = 1.56 \frac{w_m^2}{w^2} \quad (14)$$

与例(i)差不多。虽然采用SC II 6.2腔时，输出激光束场结构可能不够理想，但它可使增益非很小的激光器实现单横模运转，若把 $g_0$ 按某种比例缩小些（采用普通激光腔时也需要这样）便可获稳定的单横模输出，消除多横模运转时输出光束场结构与输出功率变动不定的缺点。它的输出光束场结构也比多模输出好。而它的功率 $(P_0)_{opt}$ ，特别是平均光强 $(P_0)_{opt}/w_m^2$ 均比小孔选模时明显高。

4.3 我们已有计算资料中， $FN = 0.90$ ， $g_1 = g_2 = 0.5$ 的对称腔中， $TEM_{00}$ 与 $TEM_{01}$

模单程衍射损耗为  $L'_{00} = 0.023$ ,  $L'_{01} = 0.13$ , 而基横模光斑半径  $w = 0.61\sqrt{\lambda d}$ . 用它的等价平凹镜组成单横模工作激光器, 如前例, 求得  $L_0 = 0.0233$ ,  $L_1 = 0.139$ , 取  $T_{opt} = 0.0415$ ,  $g_0 = 0.17 (e^{g_0} = 1.185)$ . 求得激光输出功率

$$(P_0)_{opt}' \propto 2I_s w^2 (0.0674).$$

$L_1$  与它接近的多环端镜腔是表 I 所示 SCI.1.5. 由表 I 得  $L_0 = 0.0077$ ,  $L_1 = 0.166$ . 取由它构成的激光器的  $T_{opt} = 0.0313$ ,  $g_0 = 0.187 (e^{g_0} = 1.206)$ , 单横模工作激光器的输出功率据(11)式求得为

$$(P_0)_{opt} = 2I_s w_m^2 (0.119)$$

其中  $w_m = 0.545\sqrt{2\lambda d} = 0.771\sqrt{\lambda d}$ . 于是求得

$$\beta = \frac{(P_0)_{opt}}{(P_0)_{opt}'} = \frac{w_m^2}{w^2} \cdot \frac{0.119}{0.0674} = 2.82 \quad (15)$$

本例中二激光器增益( $e^{g_0}$ )之比为1.02.<sup>2)</sup>

在实际工作中由于电源功率等各种起伏, 上述各例中所有  $g_0$  值应按一定比例取小一些, 才能保证稳定的单横模输出, 防止横模跳跃现象。这时将导致  $\beta$  明显增大。但若考虑散射与吸收,  $L_0$  将增加一常数, 它会导致  $\beta$  减小。但至少气体激光器情形, 前一影响应显著得多。

以上的讨论只是纯理论的, 实际激光器当然要复杂得多。但  $\beta$  值明显大于 1, 在只考虑谐振腔的性质与作用时, 显然具有不容忽视的实际意义。还应提到: 通常放电管长近一米左右的低压连续  $\text{CO}_2$  激光器的增益, 已与例(i)讨论情形相差不远。而放电管长一米左右的  $\text{H}_e\text{-Ne}$  激光器的增益则与例(iii)情形差不多(在上述两种情形下, 一般说来平均增益都与放电管内径有关)。此外, 在两种情形下, 多环端镜的外径也均适宜。可见本节的讨论是有实际意义的。

还应说明, 本文报导的结果是十分初步的。我们认为已有的几次系列计算显示了大大改进多环端镜腔性质的可能性。这类新型腔的发展前景是十分诱人的。

作者认为, 作为谐振腔性能指标之一的横模选择性, 无论是用  $(L'_1 - L'_0)$ , 或用  $L'_1/L'_0$  来量度都不妥当。因此, 建议参照(11)式, 用量

$$K = (\sqrt{L_1} - \sqrt{L_0})^2 \quad (16)$$

作为腔的横模选择性的量度。

2) 倘若用 SCI.1.5 的平凹腔构成的激光器, 也是  $g_0 = 0.17$ , 即与本例中前述普通(小孔)平凹腔相同, 那么选择 T, 按(11)式求得  $(P_0)_{opt} \propto 2I_s w_m^2 (0.105)$ ,  $\beta = 2.489$ , 此时  $T_{opt} = 0.0305$ ,  $g_0$  小于  $T_{opt} + L_1$  稍多, 单横模输出应较稳定。

谨对广东省电力勘探设计院梁惠庄工程师在计算机程序、计算方法等计算方面给予我们的帮助表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] R.H.Dicke, *Sept. U.S.Patent*, 2851—652, September 9, 1958.  
 [2] A.M. Прохоров, *ЖЭТФ*, 34 (1958), 1658.  
 [3] A.L.Schowlow, C.H.Townes, *Phys. Rev.*, 112 (1958), 1940.  
 [4] P.W.Smith, *Proceedings of the IEEE*, 60(1972),422.  
 [5] Y.C.See, S. Guha, and J.Falk, *Appl. Opt.*, 20 (1981), 1211.  
 [6] P.W smith, E.H.Turner, *Appl. Phys. Lett.*, 30 (1977), 280.  
 [7] S.D. Smith et al., *Opt. commun.*, 51(1984), 357  
 [8] Y.T. Chow et al., *J.Opt. Soc. Am.*, B3 (1986), 1335.  
 [9] W. Streifer et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE—21 (1985), 539.  
 [10] A.S.Sudbø, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE—21 (1985),551.  
 [11] 李先枢, *物理学报*, 32 (1983), 990.  
 [12] H.Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.*, 44 (1965), 455.  
 [13] 李先枢等, *物理学报*, 32(1983), 1002.  
 [14] 李先枢, *物理学报*, 30(1981), 1325.  
 [15] 李先枢、徐家进, *物理学报*, 35(1986),1088.  
 [16] 李先枢, *物理学报*, 30(1981), 503,  
 [17] A.Yariv, "Quantum Electronics" second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.

## An Elementary Research for the Laser Resonators with Multi-ring Reflectors

Li Xianshu      Gao Yanqiu

### Abstract

The results of calculations for characteristics of various order transverse modes in resonators with multi-ring end-reflectors show that The selectivity of transverse modes, and the widths of the fundamental transverse modes in proper structures of the new kind of resonators can all be greater than those in the corresponding common laser resonators. The quasi-geometric optical theory ignoring the aperture diffraction effects can not be suited for these new resonators. It is shown that the optimal out-put powers of lasers of new kind of resonators operating with single transverse modes are about equal to or greater than the double of that can be obtained from corresponding common laser resonators.

**Keywords** opical resonator, transverse mode, transverse mode selection, multi—ring diffroction scteen, out-put power of laser