

# 全环形镜面利用的多程环形腔特性分析

李育德

(四川大学光电科学技术系, 成都, 610064)

**摘要:** 本文分析了全环形镜面利用的多程环形腔的运行特性和输出特性。

**关键词:** 谐振腔 多程环形腔

## Characteristics analysis of a multipass ring resonator using all annular surfaces of two mirrors

*Li Yude*

(Department of Opto-Electronic Science and Technology, Sichuan University)

**Abstract:** A multipass ring resonator, that the all annular reflective surface of two ring mirrors can be decomposed into many ring resonators, is introduced in this paper. The analysis and theoretical calculation show that this resonator has better operation properties and output mode.

**Key words:** resonator multiple-pass ring resonator

### 一、引 言

射频横向激励扩散冷却  $\text{CO}_2$  激光器的进展和前景令人关注, 尤其同轴射频横向放电激励圆筒形增益区  $\text{CO}_2$  激光器更为重要, 它比平板型放电更能实现紧凑性, 已成为高功率气体激光器发展前沿之一<sup>[1, 2]</sup>。其实, 需利用扩散冷却的气体激光器不限于  $\text{CO}_2$  激光器, 需要增大运动粒子同管壁接触的激光器也可不排除同轴放电室的使用。因此, 从谐振腔的角度考虑同轴放电室(含射频激励)能量的充分提取是实现紧凑化同轴放电大功率激光器的关键技术之一。文献[1, 3]多程腔提取其能量的方案、理论和实验都得到了好的证明。为了充分提取其能量, 可以增加程数, 使光束在环形镜面的光斑部分交叠, 多程光束占据大部或绝大部分激活区。但当放电室较长, 半径较大而程数又很多时, 要实现多程腔的四镜调整, 其难度是较大的。显然, 多程环形腔<sup>[4]</sup>在此情况下仍是易于实现其工作的, 可使多程光束在环形镜面交叠使环形面和放电室大部或绝大部分激活空间得以利用。当环形镜面是利用全镜面靠近外缘那一部分时, 且镜面轴线与其后表面法线一致或为已知一小夹角时, 此种腔的调整难度与普通二球面镜腔接近。本文给出利用全环形镜面的多程环形腔方案并讨论其特性。

### 二、全环形镜面利用的多程环形腔的特性分析

#### 1. 腔的构成和多腔的存在

本文仅讨论属基模高斯光束运行的环形腔。由于是全圆环形镜面利用, 故除输出耦合镜(定为  $m_1$ )有具体形状外, 其余处在环形腔各转折处的局部镜面均近似地被认为与  $m_1$  具有相同形状, 并称假想小镜面, 且相邻假想镜面可公用环形镜面的同一局部位置。由于基模高斯光

束的半径对圆形或正方形域是相同的,且当圆环半径较大时,既可用小圆区,也可用正方形区交叠盖满全环形面。同时,我们在整个讨论过程中均注意到镜面具有均匀反射率或综合起来具有近似的均匀反射率,这些均为我们仅注意基模高斯光束提供了依据。

如图 1 所示

( $m_1$  可为圆形,也可为正方形),我们画出了  $M_1$ ,  $M_2$  两环形镜面的平面示意图。 $R_1$ ,  $R_2$  是环面内、外半径,镜面曲率半径分别为  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , 两镜相距  $L$ 。将  $m_1$  确定在  $M_1$  上,中心定于半径为  $r_1$  的圆上,  $r_1 = (R_1 + R_2)/2$ , 其

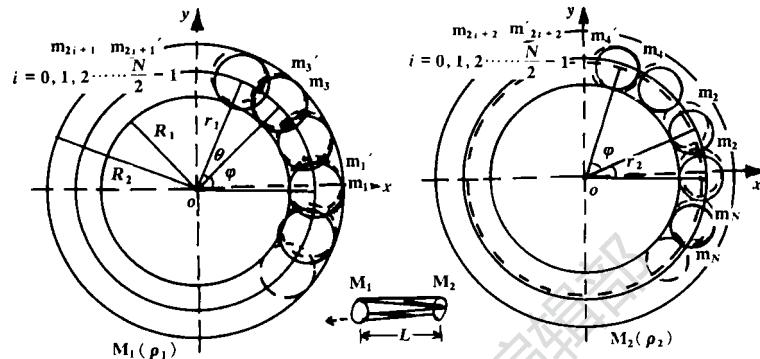


Fig. 1 Diagram of multiple pass ring resonator ( $m_1 \rightarrow m_2 \dots m_N \rightarrow m_1$  or  $m'_1 \rightarrow m'_2 \dots m'_N \rightarrow m'_1$ ).  $m_1$  is an output mirror, annular zones of  $M_1$  and  $M_2$  are divided into  $m_{2i+1}$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) and  $m_{2i+2}$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) or  $m'_{2i+1}, m'_{2i+2}, i = 0, 1, 2, \dots$  which overlap each other

余各假想镜面  $m_{2i+1}$  之中心  $V_{2i+1}$  也位于此圆上,而  $m_{2i+2}$  之中心  $V_{2i+2}$  则定位于  $M_2$  的半径为  $r_2$  的圆上,上述  $i = 0, 1, 2, \dots, r_2 = r_1 \frac{g_2}{g_1}$ 。<sup>[4]</sup> 依据  $M_1, M_2$  共轴系统的往返矩阵及  $\frac{N}{2}$  次往返矩阵

$$M = \begin{matrix} A & B \\ C & D \end{matrix} \quad (1)$$

$$M_{N/2} = \begin{matrix} 1 & A \sin \frac{N}{2} \varphi - \sin \frac{N}{2} - 1 \varphi & B \sin \frac{N}{2} \varphi \\ \sin \varphi & C \sin \frac{N}{2} \varphi & D \sin \frac{N}{2} \varphi - \sin \frac{N}{2} - 1 \varphi \end{matrix} \quad (2)$$

$$\cos \varphi = \frac{A + D}{2} \quad |\cos \varphi| < 1$$

$$\text{当 } \frac{N}{2} \varphi = u \cdot 2\pi \quad u = 1, 2, \dots \quad (3)$$

$$M_{N/2} = \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \quad (4)$$

腔内光束可沿  $m_1 \rightarrow m_2 \dots m_N \rightarrow m_1$  形成的环形腔运行。其一般情况可为图 1 所示。

由于我们设想的腔  $m_1 \dots m_{N/2}$  是在腔参数满足条件(1)~(4)式确定的。(1)~(4)式无法直接限定  $m_1$  的角向位置,这给我们镀制  $m_1$  和腔的安置带来方便,但是它又保持了以圆  $r_1$  (或圆  $r_2$ ) 上任一点为中心的小镜面(可以部分含  $m_1$ ,也可远离  $m_1$ )作为环形腔起始面的自由。即,再任意设定一个  $m'_1$  (角向位置不同于  $m_1$ ),便可再确定一个由  $m'_{2i+1}, m'_{2i+2}, i = 0, 1, 2, \dots$  构成的腔,如图 1 虚线圆所示。显然,存在无穷个腔,这里称之为存在多腔。但是,由于已设定全环形镜面利用并占据大部或绝大部分激活空间,即任一腔运行,另外的腔便不工作,故我们确定的  $m_1$  总是作为环形腔的一个镜面出现或分成若干部分而在环形腔内多次出现,因此它总是承担着任一腔的输出耦合任务。我们认为,所谓的单孔衍射腔<sup>[5]</sup>,可近似认为是由上述

运行机制支撑的,当然其腔内传播的是否属基模高斯光束还与小孔有关。当我们对  $m_1$  处模式不作特别要求时,事情就简单,当对输出模式( $m_1$  处横向分布和光束取向分布)有要求或对输出耦合要精确设计时,则事情变得复杂,此在下面予以分析并仅讨论单向行波。

## 2. 模式分析和选择

由于  $m_1$  及绝大部分假想小镜面反射率是均匀的,仅在  $m_1$  处有部分假想小镜面部分落入  $m_1$ ,部分处于全反射面处。但这少数几个小镜面中,当一个是角向前部分落入  $m_1$ ,则有另一个是后部分落入  $m_1$ ,综合起来对光束的反射又接近近似均匀。因此,腔内传播光束仍是有限均匀反射面衍射损失和腔参数确定的基模高斯光束。由于多腔的衍射损失应是同等的,故基模高斯光束运行于多腔中的哪一个,将由其他损耗来确定。这里特别考虑各腔的反射损耗(特别含  $m_1$  处因透射引起的反射损耗)。多腔中,损耗最低的腔优先振荡并控制输出模式,当若干腔损耗近似相等时,则运行腔的选取是随机的。

首先设  $m_1$  具有圆面形。为对无穷多腔的损耗进行分析,我们假定  $m'_{2i+1}$  ( $i = 0, 1, 2 \dots$ ) 以  $m'_1$  与  $m_1$  重合开始向角度增加的方向连续移动。将图 1  $m_1$  附近的情况近似为图 2,  $m_1$  的圆心为坐标系原点。设图 2 中两小镜中心相距为  $q$ ,连续移动之位移为  $\Delta$ 。为方便,将  $m_1$  左右的假想小镜重新编号,左(角增加方向)为:  $m'_1, m'_2, \dots, m'_n \dots$ ,右为  $m'_1, m'_2 \dots, m'_{(m)}, 1, 2, \dots, n$  ( $m \in \{2i+1\} i = 0, 1, \dots\}$ )。 $m'_n, m'_{(m)}$  与  $m_1$  圆交点坐标分别为

$$\begin{aligned} x_{(n)} &= -\frac{\Delta + (n-1)q}{2} \\ y_{(n)} &= \pm \sqrt{r_{10}^2 - \left(\frac{\Delta + (n-1)q}{4}\right)^2} \\ x_{(m)} &= \frac{mq - \Delta}{2} \\ y_{(m)} &= \pm \sqrt{r_{10}^2 - \left(\frac{mq - \Delta}{4}\right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

显然,当  $0 \leq \Delta \leq q$ ,可认为所有多腔均已出现。满足下面条件的假想小镜均有部分或全部落入  $m_1$

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta + (n-1)q}{2} &\geq r_{10} \\ \frac{mq - \Delta}{2} &\leq r_{10} \end{aligned} \quad (7)$$

每当  $\Delta = \Delta_n = 2r_{10} - (n-1)q > 0$ ,  $m'_n$  即与  $m_1$  相切并移出  $m_1$ ,每当  $\Delta = \Delta_m = mq - 2r_{10} \geq 0$ ,  $m'_{(m)}$  即与  $m_1$  相切并即移入  $m_1$ 。 $m_1$  是半反镜,  $m'_n$  ( $m'_{(m)}$ ) 落入  $m_1$  的面积不同时,  $m'_n$  ( $m'_{(m)}$ ) 即具有不同的反射率,各  $m'_n, m'_{(m)}$  进入  $m_1$  的面积总和越大,反射损耗就越大(透射增大),故腔的  $Q$  值越小。由于仅讨论反射损耗,对于无源腔,假定光束均匀对称分布,  $T$  为  $m_1$  的透过率,环形镜面反射率为  $R$ ,则对于  $N$  程环形腔,其反射损失为:

$$\begin{aligned} \delta &= 1 - R^{N-N_{m_1}} \frac{S_{m'_1, m'_1} T + (1-R)(S_{m_1} - S_{m'_1, m'_1})}{S_{m_1}} \\ &\quad \cdot \frac{1 - S_{m'_2, m'_1} T + (1-R)(S_{m_1} - S_{m'_2, m'_1})}{S_{m_1}} \end{aligned}$$

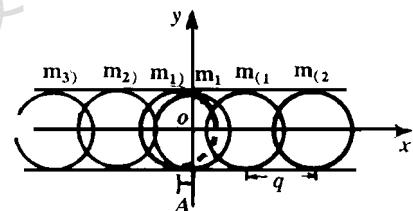


Fig. 2 Variation of  $S_{m'_n, m'_1}$  and  $S_{m'_{(m)}, m'_1}$  versus displace ( $\Delta$ ) of  $m'_n$  and  $m'_{(m)}$  ( $n, m = 1, 2, 3 \dots$ ) about  $m_1$ .  $n, (m \in \{2i+1\} i = 0, 1, 2 \dots\}$

$$\dots 1 - \frac{S_{m'_n \cdot m_1} T + (1 - R)(S_{m_1} - S_{m'_n \cdot m_1})}{S_{m_1}} \\ \dots 1 - \frac{S_{m'_m \cdot m_1} T + (1 - R)(S_{m'_1} S_{m'_m \cdot m_1})}{S_{m_1}} \quad (8)$$

式中,  $n = n_{\max}$ ,  $m = m_{\max}$ ,  $N_{m_1} = n + m$ ,  $S_{m_1} = \pi r_{10}^2$ ,

$$S_{m'_n \cdot m_1} = 2r_{10}^2 \arcsin \frac{4r_{10}^2 - [(n-1)q + \Delta]^2}{2r_{10}} \\ - \frac{[(n-1)q + \Delta]}{2} \quad 4r_{10}^2 - [(n-1)q + \Delta]^2 \quad (9)$$

$$S_{m'_m \cdot m_1} = 2r_{10}^2 \arcsin \frac{4r_{10}^2 - (mq - \Delta)^2}{2r_{10}} - \frac{(mq - \Delta)}{2} \quad 4r_{10}^2 - (mq - \Delta)^2 \quad (10)$$

$S_{m'_n \cdot m_1}$ ,  $S_{m'_m \cdot m_1}$  为  $m'_n$ ,  $m'_m$  落入  $m_1$  之面积。由于  $R \approx 1$ ,  $N_{m_1} \ll N$ ,  $T \gg 1 - R$ , 所以有:

$$\delta \approx 1 - R^{N - N_{m_1}} \left( 1 - \frac{S_{m'_1 \cdot m_1}}{S_{m_1}} \cdot T \right) \left( 1 - \frac{S_{m'_2 \cdot m_1}}{S_{m_1}} \cdot T \right) \\ \dots \left( 1 - \frac{S_{m'_n \cdot m_1}}{S_{m_1}} \cdot T \right) \dots \left( 1 - \frac{S_{m'_{(m)} \cdot m_1}}{S_{m_1}} \cdot T \right) \quad (11)$$

由(11)式有:

$$\delta \approx 1 - R^{N - N_{m_1}} + \frac{S_{\infty_{m_1}}^{IV}}{S_{m_1}} \cdot T - \frac{S_{\infty_{m_1}}^{\oplus}}{S_{m_1}} \cdot T^2 + \frac{S_{\infty_{m_1}}^{\ominus}}{S_{m_1}} \cdot T^3 \dots \quad (12)$$

$$S_{\infty_{m_1}}^{IV} = \sum_{n=1}^N S_{m'_n \cdot m_1} + \sum_{m=1}^M S_{m'_m \cdot m_1} \quad (13)$$

$$S_{\infty_{m_1}}^{\oplus} = \sum_{p \neq u} S_{m'_p \cdot m_1} \cdot S_{m'_u \cdot m_1} \quad p, u = 1, 2, \dots, n \quad (1, (2, \dots, m) \quad (14)$$

$$S_{\infty_{m_1}}^{\ominus} = \sum_{p \neq u \neq d} S_{m'_p \cdot m_1} S_{m'_u \cdot m_1} S_{m'_d \cdot m_1} \quad p, u, d = 1, 2, \dots, n \quad (1, (2, \dots, m) \quad (15)$$

$\delta$  的极小值满足条件:

$$\frac{d\delta}{d\Delta} = 0 \rightarrow \Delta = \Delta^*$$

$$\frac{d^2\delta}{d^2\Delta} \Big|_{\Delta=\Delta^*} > 0 \quad (16)$$

要想精确求出  $\Delta^*$  的值, 可用数值计算方法解决。由于对  $\delta$  的主要贡献是  $S_{\infty_{m_1}}^{IV}$ ,  $S_{\infty_{m_1}}^{\oplus}$ , 故对一、二项作如下考虑, 求出  $S_{\infty_{m_1}}^{IV}$  的极小值位置, 并分析第二项在此位置是否极靠近极大值。结论是基本肯定的。 $S_{\infty_{m_1}}^{IV}$  存在极小值满足条件为:

$$\frac{dS_{\infty_{m_1}}^{IV}}{d\Delta} = - \sum_{n=1}^N 4r_{10}^2 - [(n-1)q + \Delta]^2 \\ + \sum_{m=1}^M 4r_{10}^2 - (mq - \Delta)^2 = 0 \rightarrow \Delta = \Delta_0 \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 S_{\infty m_1}^{iv}}{d^2 \Delta} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(n-1)q + \Delta}{4r_{10}^2 - [(n-1)q + \Delta]^2} \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{mq - \Delta}{4r_{10}^2 - (mq - \Delta)^2} \Big|_{\Delta=\Delta_0} > 0 \end{aligned} \quad (17b)$$

仅当  $\Delta$  取某一值,  $y$  轴左右的假定圆镜才对称分布, 故极值必唯一地出现在  $\Delta$  为  $q/2$  处。  
(17) 式的解及相关结果为:

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= q/2 \quad n^* = m^* \\ \frac{d^2 S_{\infty m_1}^{iv}}{d^2 \Delta} \Big|_{\Delta=\Delta_0} &> 0 \quad (0 < \Delta < q) \end{aligned} \quad (18)$$

$S_{\infty m_1}^{iv}(\Delta=0) = S_{\infty m_1}^{iv}(\Delta=q) = S_{\max}^{iv}$ ;  $S_{\infty m_1}^{iv}$  在  $\Delta=\Delta_{n_1} \Delta_m$  处无极值。

$$\begin{aligned} S_{\infty m_1 m_{\min}}^{iv} &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2r_{10}^2 \arcsin} \frac{4r_{10}^2 - (n - \frac{1}{2}q)^2}{2r_{10}} \\ &- \frac{1}{2} \frac{q}{4r_{10}^2 - (n - \frac{1}{2}q)^2} \\ n^* &= m^*, n^*, m^* \leq \frac{2r_{10}}{q} + \frac{1}{2} \quad (0 \leq \Delta \leq q) \end{aligned} \quad (19)$$

又令  $\Delta = \Delta_0 \pm \varepsilon$

由于分布对称, 故有,

$$\begin{aligned} S_{m(n)}^{(\Delta_0)} m_1 &= S_{m(n)}^{(\Delta_0)} m_1, S_{m(n)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} = S_{m(n)}^{(\Delta_0)} - ds_n, S_{m(n)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} \approx S_{m(n)}^{(\Delta_0)} m_1 + ds_n \\ S_{m(n_1)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} \cdot S_{m(n_2)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} &\approx S_{m(n_1)}^{(\Delta_0)} \cdot S_{m(n_2)}^{(\Delta_0)} - S_{m(n_1)}^{(\Delta_0)} \cdot ds_{n_2} - S_{m(n_2)}^{(\Delta_0)} \cdot ds_{n_1} \\ S_{m(n_1)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} \cdot S_{m(n_2)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} &\approx S_{m(n_1)}^{(\Delta_0)} \cdot S_{m(n_2)}^{(\Delta_0)} + S_{m(n_1)}^{(\Delta_0)} \cdot ds_{n_2} + S_{m(n_2)}^{(\Delta_0)} \cdot ds_{n_1} \\ S_{m(n)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} \cdot S_{m(n)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} &\approx S_{m(n)}^{2(\Delta_0)} - (ds_n)^2 < S_{m(n)}^{(\Delta_0)} \cdot S_{m(n)}^{(\Delta_0)} \end{aligned}$$

对于  $\Delta = \Delta_0 - \varepsilon$ , 情况类似。将上述各项代入(14)式, 即可证明

$$S_{\infty m_1}^{iv} \geq S_{m(\Delta_0 + \varepsilon)}^{iv}$$

即使  $S_{\infty m_1}^{iv}$  可能出现不止一个极值, 但由于  $S_{\infty m_1}^{iv} > S_{\infty m_1}^{iv}$ ,  $S_{\infty m_1}^{iv}$  又仅一个极小值, 故有

$$\delta_{\min} \approx 1 - R^{N-4} \left( 1 - \frac{S_{m_1}^{(q/2)}}{S_{m_1}^{(q)}} \cdot T \right)^2 \left( 1 - \frac{S_{m_2}^{(q/2)}}{S_{m_1}^{(q)}} \cdot T \right)^2 \dots \left( 1 - \frac{S_{m_n}^{(q/2)}}{S_{m_1}^{(q)}} \cdot T \right)^2$$

$$S_{m(n)}^{(\Delta_0 + \varepsilon)} = S_{m(n)}^{(\Delta_0 + q/2)}, N_{m_1} = 2n^*, (n^* = m^*), n^* \leq \frac{2r_{10}}{q} + \frac{1}{2}$$

下面给出几种情况的解:

(1)  $q = r_{10}$ ,  $n^* = m^*$ ,  $N_{m_1} = 4$ ,  $0 \leq \Delta \leq r_{10}$ 。

$$\delta \approx 1 - R^{N-4} \left( 1 - \frac{T}{S_{m_1}^{(q)}} \right)^2 \left( 1 - \frac{T}{S_{m_2}^{(q)}} \right)^2 \left( 1 - \frac{T}{S_{m_3}^{(q)}} \right)^2 \left( 1 - \frac{T}{S_{m_4}^{(q)}} \right)^2$$

$$\delta_{\min} \approx 1 - R^{N-4} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{15}{4} - \frac{15}{6} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{7}{4} - \frac{3}{16} \right)^2 T^2$$

式中,  $S_{m'_1 m_1} \dots$  由(9), (10)式给出。在  $m_1$  的输出模式如图 3a,  $\delta$  随  $\Delta$  的变化如图 4。

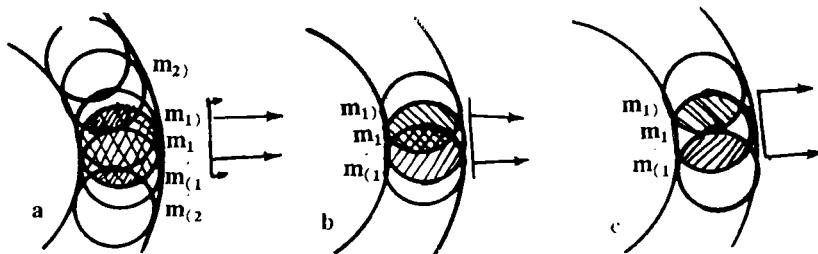


Fig. 3 The mode pattern on  $m_1$

a—when  $q = r_{10}$    b—when  $q = 1.4r_{10}$    c—when  $q = 2r_{10}$

(2)  $q = 1.4r_{10}, 0 \leq \Delta \leq 1.4r_{10}, 0 \leq \Delta \leq 0.6r_{10}, n^* = 2, m^* = 1, N_{m_1} = 3;$

$0.6r_{10} \leq \Delta \leq 0.8r_{10}, n^* = 1, m^* = 1, N_{m_1} = 2$ , 由  $n^* \leq (2r_{10}/q) + 0.5$  可知,  $q = 1.4r_{10}$ , 可代表  $n^* = m^* = 1$  时  $q$  之最小值, 交叠最好, 这也是选择  $q = 1.4r_{10}$  作代表情况之一的原因。

$0.8r_{10} \leq \Delta \leq 1.4r_{10}, n^* = 1, m^* = 2, N_{m_1} = 3$ ,

$$1 - R^{N-3} \left( 1 - S_{m'_1 m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \right) \quad 1 - S_{m'_2 m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \quad 1 - S_{m'_{(1)} m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \quad (0 \leq \Delta \leq 0.6r_{10})$$

$$\delta \approx 1 - R^{N-2} \left( 1 - S_{m'_1 m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \right) \quad 1 - S_{m'_{(1)} m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \quad (0.6r_{10} \leq \Delta \leq 0.8r_{10})$$

$$1 - R^{N-3} \left( 1 - S_{m'_1 m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \right) \quad 1 - S_{m'_{(1)} m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \quad 1 - S_{m'_{(2)} m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \quad (0.8r_{10} \leq \Delta \leq 1.4r_{10})$$

$$\delta_{\min} \approx 1 - R^{N-2} \left( 1 - \frac{1.7707}{\pi} \cdot T^2 \right)$$

式中,  $S_{m'_1 m_1} \dots$  由(9), (10)式给出。在  $m_1$  的输出模式如图 3b,  $\delta$  随  $\Delta$  的变化如图 4。

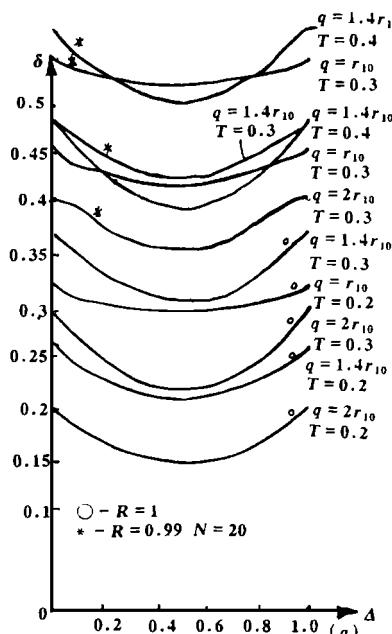
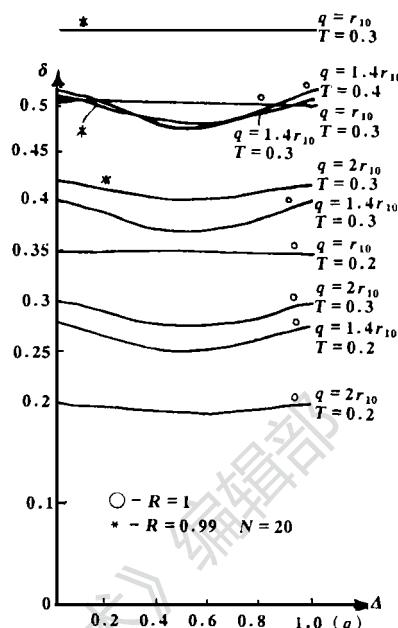
(3)  $q = 2r_{10}, n^* = m^* = 1, N_{m_1} = 2, 0 \leq \Delta \leq 2r_{10}$

$$\delta \approx 1 - R^{N-2} \left( 1 - S_{m'_1 m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2} \right) \quad 1 - S_{m'_{(1)} m_1} \cdot \frac{T}{\pi r_{10}^2}$$

$$\delta_{\min} \approx 1 - R^{N-2} \left( 1 - \frac{2\pi}{3} - \frac{3}{2} \frac{T^2}{\pi} \right)$$

式中,  $S_{m'_1 m_1} \dots$  由(9), (10)式给出。 $m_1$  处输出模式如图 3c,  $\delta$  随  $\Delta$  之变化曲线如图 4。

当  $m_1$  为边长  $2r_{10}$  的正方形时, 由于仅讨论反射损耗, 仍假定无源腔内光束为轴对称均匀分布光束在  $M_1$  的半径为  $r_{10}$ 。经类似处理,  $q = r_{10}, 0 \leq \Delta \leq r_{10}; q = 1.4r_{10}, 0 \leq \Delta \leq 1.4r_{10}; q = 2r_{10}, 0 \leq \Delta \leq 2r_{10}$  三情况下  $\delta$  随  $\Delta$  的变化如图 5。

Fig. 4  $\delta$ - $\Delta$  curves (m<sub>1</sub>- circular)Fig. 5  $\delta$ - $\Delta$  curves (m<sub>1</sub>- square)

### 三、结 束 语

上面的初步分析表明, 全环形镜面利用的多程环形腔可以充分提取腔内能量。当限制腔内传播基模高斯光束时, 输出耦合镜处出射光束也已不同于一般多程环形腔的出射光束, 就单向行波而言, 即可出现多于一个的出射光束, 但通过腔的设计可以使其夹角很小。同时, 由分析可见, 适当选择腔参数和输出镜面形状可以在全环形镜面利用的情况下获得好的或较好的输出模式。

### 参 考 文 献

- 1 辛建国, 魏光辉. 中国激光, 1994; A21(5): 371~ 376
- 2 丘军林. 中国激光, 1994; A21(5): 377~ 381
- 3 程兆谷, Seguin H J J. 光学学报, 1989; 9(2): 113~ 118
- 4 李育德. 中国激光, 1992; A19(10): 755~ 758
- 5 中国科学院安徽光机所. 光电子技术与信息, 1991; (6): 39



作者简介: 李育德, 男, 1944 年出生。副教授。长期从事激光技术、激光物理与激光化学方面的科研和教学工作。

收稿日期: 1995-02-13 收到修改稿日期: 1995-04-20