

# 大激活体积高功率 CO<sub>2</sub> 激光器 环状输出稳定腔的研究

程兆谷

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

H. J. J. Seguin

(Department of Electrical Engineering, University of Alberta, Canada)

## 提 要

本文从理论和实验上研究了具有环状耦合、工作在稳定腔边缘的凹-凸型高功率激光稳定腔。在一台大激活体积万瓦级横流 CO<sub>2</sub> 激光器上进行实验, 获得了具有良好方向性的均匀的环状分布近场花样的 7 kW 激光输出。

关键词: CO<sub>2</sub> 激光器, 激光稳定腔。

## 一、引 言

目前, 绝大多数千瓦级乃至万瓦级横流 CO<sub>2</sub> 激光器都采用共焦非稳腔来获得高质量的激光输出。但是, 非稳腔的调整容限苛刻。另一方面, 实验表明, 共焦非稳腔环状输出敏感于镜面面形畸变, 增益分布的不均匀, 包括流场与放电的影响, 造成近场花样分布不均匀, 导致高功率(尤其万瓦级)CO<sub>2</sub> 激光器红外窗口的破坏。

经过精心设计, 工作在稳定区边缘的稳腔环状输出具有与非稳腔可比拟的良好的远场聚焦特性。但与共焦非稳腔的不足之处相比较, 稳腔环状输出容易获得均匀的近场分布, 不敏感于镜面面形畸变和增益分布不均匀, 易于调整, 并具有较高的光电转换效率。

## 二、理论分析

凹-凸型环状输出稳定选模腔的结构如图 1 所示。L 为腔长, R<sub>1</sub> 为凸面镜 M<sub>1</sub> 之曲率半径(取为正值, 以下同), R<sub>2</sub> 为凹面镜 M<sub>2</sub> 之曲率半径; O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub> 分别为凸面镜和凹面镜之球心; 凸面镜 M<sub>1</sub> 之横向尺寸(半径)为 r<sub>1</sub>, 凹面镜 M<sub>2</sub> 之横向尺寸为 r<sub>2</sub>。假设 r<sub>1</sub> 小于 r<sub>2</sub>, 激光由较小尺寸的凸面镜之边缘输出。

为计算方便, 利用下列公式<sup>[2, 3]</sup>来表达 TFM<sub>00</sub> 模之参量是合适的,

$$g_1 = 1 + \frac{L}{R_1}, \quad (1)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}, \quad (2)$$

$$W_1^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \sqrt{\frac{g_2}{g_1 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}}, \quad (3)$$

$$W_2^2 = \frac{\lambda L}{\pi} \sqrt{\frac{g_1}{g_2 \cdot (1 - g_1 \cdot g_2)}}. \quad (4)$$

这里,  $\lambda$  为激光器输出波长,  $L$  为腔长,  $W_1$ 、 $W_2$  分别为在凸面镜  $M_1$  和凹面镜  $M_2$  表面上 TEM<sub>00</sub> 模光斑尺寸(半径)。

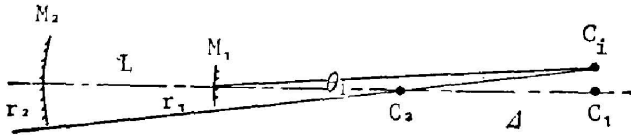


Fig. 1 Concave—convex stable resonator with annular output

由方程(1)和(2)可知,

$$g_1 \cdot g_2 = 1 - \frac{L \cdot \Delta}{R_1 \cdot R_2}, \quad (5)$$

如图1所示,  $\Delta = L + R_1 - R_2$  为二腔镜之球心  $C_1$  和  $C_2$  之间距离。如果凸面镜之球心  $C_1$  位于凹面镜之

球心  $C_2$  之右侧(如图1),  $\Delta$  为正值。由方程(5)可知,  $g_1 \cdot g_2 < 1$ , 为稳定腔。反之, 如果  $C_1$  位于  $C_2$  左侧,  $\Delta$  为负值,  $g_1 \cdot g_2 > 1$ , 为非稳腔。

为讨论方便, 可以借助于参数  $\Delta$  来表达二镜面上光斑尺寸  $W_1$  和  $W_2$ , 由方程(1)、(2)、(3)、(4)和(5), 很易求得

$$W_1^2 = \frac{\lambda \cdot L \cdot R_1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{R_2 - L}{(R_1 + L) \cdot L \cdot \Delta}}, \quad (6)$$

$$W_2^2 = \frac{\lambda \cdot L \cdot R_2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{R_1 + L}{(R_2 - L) \cdot L \cdot \Delta}}. \quad (7)$$

### 1. 失调灵敏度

众所周知, 对一谐振腔而言, 光轴位置为二球心之连线  $C_1C_2$ (如图1)。假定  $C_1C_2$  为理想之光轴, 如果凸面镜  $M_1$  偏斜角度  $\theta_1$ , 则其球心位置由  $C_1$  点移动到  $C'_1$  点, 失调之后的新光轴为  $C'_1C_2$ 。假定失调光轴  $C'_1C_2$  通过凹面镜  $M_2$  之边缘为失调灵敏度之统一判据。由简单的几何关系, 可以求得, 凸面镜  $M_1$  之调整容限  $S_1$  为

$$S_1 = \frac{r_2 \cdot \Delta}{R_1 \cdot R_2}. \quad (8)$$

类似地, 可以求得凹面镜  $M_2$  之调整容限  $S_2$  为

$$S_2 = \frac{r_2 \cdot \Delta}{R_2 \cdot (R_1 + L)}. \quad (9)$$

在方程(8)和(9)中,  $\Delta = L + R_1 - R_2$ ,  $r_2$  为较大横向尺寸腔镜  $M_2$  之半径。

### 2. 衍射损耗

D. E. McCumber<sup>[4, 5]</sup>详细地研究了腔镜中心带有小孔的对称和不对称小孔耦合共焦稳定腔的膜性质。本文把他得到的结果推广到一般稳定腔。

就对称的共焦稳定腔而言, 在其镜面上的 TEM<sub>00</sub> 模尺寸  $W_c$  为

$$W_c = \sqrt{\frac{\lambda \cdot L}{\pi}}, \quad (10)$$

$$N = \frac{a^2}{\pi \cdot W_c^2}. \quad (11)$$

这里,  $N$  为 Fresnel 数,  $N = \frac{a^2}{\lambda L}$ ,  $a$  为腔镜之横向尺寸(半径)。

如果利用  $\frac{a^2}{\pi \cdot W^2}$  来代替文献[4~5]中的 Fresnel 数  $N$ , 那末, 就得到一系列新的公式来描述其腔镜尺寸(半径)为  $a$ , 在该腔镜表面上的 TEM<sub>00</sub> 模尺寸为  $W$  的一般稳定腔的特性<sup>[4,5]</sup>,

$$k_{mn} = (-1)^m \cdot |k_{mn}|, \quad (12)$$

$$\alpha_{mn} = 1 - (k_{mn})^2, \quad (13)$$

$$1 - (-1)^m \cdot k_{mn} = \int_{2 \cdot \frac{a^2}{W^2}}^{r_1} x^n \cdot e^{-x} [L_n^n(x)]^2 \cdot dx. \quad (14)$$

这里,  $m$ 、 $n$  分别为径向和角量子数,  $k_{mn}$  为 TEM<sub>mn</sub> 模之本征值,  $\alpha_{mn}$  为其相应之单程损耗,  $L_n^n(x)$  为缔合 Laguerre 多项式。

### 3. 近场场强分布

与上节相类似, 推广 McCumber<sup>[6]</sup> 之结果到一般稳定腔, 在凸面镜输出端的近场场强分布  $E_{mn}(r)$  可以表达为

$$E_{mn}(r) = E_{mn}^0(r) \cdot \left\{ 1 + W_1^{-2} \cdot \int_{r_1}^{r_2} dr' \cdot r' \cdot [E_{mn}^0(r')]^2 \right\} - \sum_{\substack{p \neq m \\ q \neq n}} \frac{k_{pq}^2}{k_{mn}^2 - k_{pq}^2} \cdot E_{pq}^0(r) \cdot 2 \cdot W_1^{-2} \int_{r_1}^{r_2} dr' \cdot r' \cdot E_{mn}^0(r') \cdot E_{pq}^0(r'). \quad (15)$$

这里,  $E_{mn}^0(r)$  为当凸面镜之横向尺寸  $r_1 = r_2$  ( $r_2$  为较大尺寸凹面镜之横向尺寸) 时, 凸面镜表面上的 TEM<sub>mn</sub> 模之场强分布。  $W_1$  为 TEM<sub>00</sub> 模在凸面镜上之光斑尺寸;  $k_{mn}$ 、 $k_{pq}$  分别为相对应之模的本征值。  $\sum_{\substack{p \neq m \\ q \neq n}}$  表示对所有的  $p \neq m$ ,  $q \neq n$  的可能性求和。  $E_{mn}^0(r)$  可以表达为<sup>[4,5]</sup>

$$E_{mn}^0(r) = \frac{Y_{mn}(r)}{\sqrt{1 - \frac{m!}{(m+n)!} \cdot \int_{2 \cdot \frac{r_1^2}{W_1^2}}^{r_1} dx \cdot x^n \cdot e^{-x} \cdot [L_n^n(x)]^2}}. \quad (16)$$

这里,  $Y_{mn}(r)$  为二腔镜尺寸为无穷大时的凸面镜表面上 TEM<sub>mn</sub> 模之场强分布,  $Y_{mn}(r)$  为<sup>[4]</sup>

$$Y_{mn}(r) = \left[ \frac{2m!}{(m+n)!} \right]^{1,2} \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{r}{W_1} \right)^2 \right]^{n/2} \cdot e^{-r^2/W_1^2} \cdot L_n^n \left[ 2 \left( \frac{r^2}{W_1^2} \right) \right]. \quad (17)$$

### 4. 远场强度分布

如果输出端之近场场强分布  $E_{mn}(r)$  已由方程(15)求得, 其远场(焦点)密度分布可借助于近场  $E_{mn}(r)$  来表达<sup>[6]</sup>

$$F(t) = \left\{ [1 + \cos(t)] \cdot \frac{i \cdot k \cdot \exp(-i \cdot k \cdot f)}{4\pi \cdot f} \int_{r_1}^{r_2} r \cdot E_{mn}(r) \cdot J_0[k \cdot r \cdot \sin(t)] \cdot dr \right\}^2. \quad (18)$$

这里,  $F(t)$  为远场光强分布,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $f$  为聚焦透镜之焦距,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为波长,  $J_0$  为零阶 Bessel 函数,  $t$  为远场发散角。

### 三、选模考虑及计算实例

如图 1 所示之凹凸型选模腔, 由方程(6)和(7)可知, 在二腔镜表面上的光斑尺寸  $W_1$  和  $W_2$  将随二腔镜球心  $C_1$ 、 $C_2$  之距离  $\Delta$  减小而增大, 当  $\Delta$  趋于零,  $W_1$  和  $W_2$  将趋于无穷大。显然, 选模特性将随  $\Delta$  减小而变好。但是由方程(8)和(9)可知, 光腔调整容限将随  $\Delta$  减小而减小。考虑到腔的选模特性, 同时又保证合适的调整难度和较好的腔的稳定性, 选择适当的  $\Delta$  值, 只允许有限的几个低阶模振荡。

由方程(14)可知, 决定衍射损耗大小的关键参量为积分下限  $2 \cdot \frac{a^2}{W^2}$ ,  $a$  为腔镜之模向尺寸,  $W$  为该腔镜上 TEM<sub>00</sub> 模光斑大小。对于高功率大激活体积的横流 CO<sub>2</sub> 激光器而言, 一般情况下,  $r_2/r_1 \geq 1.5$  (如图 1)。计算表明, 较小尺寸腔镜端的单程衍射损耗可近似为往返损耗。由方程(14), 给出  $X = 2 \cdot \frac{a^2}{W^2}$  表达的前十个最低阶模的本征值  $k_{mn}$ :

$$\begin{aligned} 1 - k_{00} &= e^{-X}, & 1 - k_{01} &= e^{-X} \cdot (1 + X), \\ 1 - k_{02} &= e^{-X} \cdot (2 + 2X + X^2), & 1 - k_{03} &= e^{-X} (6 + 6X + 3X^2 + X^3), \\ 1 - k_{04} &= e^{-X} \cdot (24 + 24X + 12X^2 + 4X^3 + X^4), & 1 + k_{10} &= e^{-X} \cdot (1 + X^2), \\ 1 + k_{11} &= e^{-X} \cdot (2 + 2X - X^2 - X^3), & 1 + k_{12} &= e^{-X} \cdot (6 + 6X + 3X^2 - 2X^3 + X^4), \\ 1 - k_{20} &= e^{-X} \cdot \left(1 + 2X^2 - X^3 + \frac{1}{4} X^4\right), \\ 1 - k_{21} &= e^{-X} \cdot \left(67 + 67X + 29X^2 + \frac{47}{3} X^3 - \frac{7}{4} X^4 + \frac{1}{4} X^5\right), \end{aligned}$$

设  $W_{mn}$  为 TEM<sub>mn</sub> 模之相对光斑尺寸 (设 TEM<sub>00</sub> 模  $W_{00} = 1.0$ ),  $W_{mn}$  定义为其光斑最外侧光环之场强的极大值下降到  $1/e$  处之大小。由方程(13),  $\alpha_{mn} = 1 - |k_{mn}|^2$  为衍射损耗。假设如图 1 所示的较小腔镜凸面镜之横向尺寸  $r_1 = 19.0 \text{ mm}$ , 在该面上的 TEM<sub>00</sub> 模尺寸  $W = 11.0 \text{ mm}$ 。上述积分下限  $X = 2 \cdot \frac{a^2}{W^2} = 6.0$ 。

表 1 中给出了前十个最低阶模的相对光斑尺寸  $W_{mn}$  和对应的模花样, 并给出了当  $X = 6.0$  时, TEM<sub>mn</sub> 模之衍射损耗  $\alpha_{mn}$ 。

由 1 表可知, 其衍射损耗  $\alpha_{mn}$  主要取决于光斑尺寸  $W_{mn}$ , 同时也取决于模结构。表 1 中打“※”者表明由上述公式求得的  $|k_{mn}|$  值大于 1, 已失去其物理意义。

值得指出的是, 由较小尺寸腔镜 (如图 1 中之凸面镜) 边缘的衍射损耗即为激光输出。由表 1 可知, 当  $r_1 = 19.0 \text{ mm}$ ,  $W_1 = 11.0 \text{ mm}$  时, TEM<sub>00</sub> 模之衍射损耗从而对激光输出的贡献近似为零。对 TEM<sub>00</sub> 模而言, 由于“零”输出影响, 增益饱和效应将使 TEM<sub>00</sub> 模振荡受到抑制, 而将其能量转移给具有合理“输出”损耗的较高次模。

对于高功率横流 CO<sub>2</sub> 激光器而言, 小信号增益系数  $g_0$  与腔长之乘积  $g_0 L \geq 1$ , 在此情况下, 由表 1 可知, 考虑到“零”或近似零输出的增益饱和效应及衍射损耗二种因素的竞争效应, 在  $X = 2 \cdot \frac{a^2}{W^2} = 6.0$  的情况下, 只有 TEM<sub>02</sub>、TEM<sub>10</sub>、TEM<sub>11</sub>、TEM<sub>20</sub> 模可能对该环状

Table 1 Relative mode sizes  $W_{mn}$  and diffraction losses  $\alpha_{mn}$  of the ten lowest order modes TEM<sub>mn</sub>.

TEM <sub>mn</sub>	00	01	02	03	04	10	11	12	20	21
$W_{mn}$	1.0	1.50	1.77	1.99	2.17	1.91	2.17	2.38	2.42	2.63
mode pattern										
$\alpha_{mn}$	0.5%	3.4%	23.3%	99.1%		17.5%	73.1%		69.8%	

输出稳定腔有所贡献。

由方程(15)和方程(18)可以求得环状输出稳定腔的近场场强分布和远场发散角。

### 四、实验结果

实验是在一台高功率大激活体积横流 CO<sub>2</sub> 激光器上进行的。其实验装置如图 2 所示<sup>[4]</sup>。其激活体积为 9×18×300 cm，其中，放电间隔为 9 cm，沿气流方向电极长度为 18 cm，沿光轴方向放电长度为 300 cm。放电、气流、光轴呈三轴正交。谐振腔沿气流方向二次折迭加一次放大。振荡腔长 860 cm，凹面镜曲率半径为 3800 cm，凸面镜曲率半径为 3500 cm，45° 耦合反射镜通光直径为  $\phi 33.0$  mm 并十分接近凸面镜。在此凸面镜之表面上的 TEM<sub>00</sub> 模之光斑尺寸  $W_1=11.0$  mm。凹面镜之横向尺寸充分大，窗口材料为镀增透膜的 ZnSe。

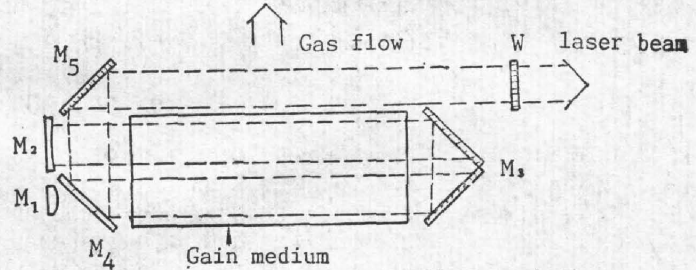


Fig. 2 Annular output stable resonator in a high-power transverse-flow CO<sub>2</sub> laser



Fig. 3 Near-field plexiglass burn pattern (output power 7 kW)

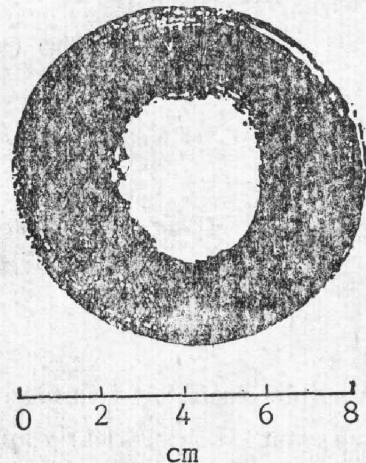


Fig. 4 Far-field plexiglass burn pattern, focal length  $f=2000$  mm

图 3、图 4 为 7 kW 稳腔环状输出的近场和远场(焦点)烧蚀有机玻璃照片。由 45° 耦

合镜提取的稳腔环状输出经过 4.5 米的腔内行程, 近场花样在离  $\text{ZnS}_9$  窗口 1.5 M 处获得, 远场花样利用曲率半径为 4 M 的凹面镜聚焦获得。

1. 上述稳腔环状耦合输出具有理想的均匀近场分布。仔细研究表明, 近场环状输出由一明显的主光环和同心衍射圆环组成。而在类似条件下, 共焦非稳腔(只改变图 2 中凸面镜的曲率半径)则敏感于镜面面形, 很难获得均匀的非稳腔近场分布, 从而对珍贵的高功率(尤其万瓦级)红外窗口造成威胁。

2. 由图 4 可知, 由长焦距  $f=2000 \text{ mm}$  的凹面镜聚焦之后的远场花样表明, 经过精心设计的稳腔环状输出具有理想的远场聚焦特性。实际测量表明, 含 80% 激光能量的远场发散角(半角)为  $0.6 \text{ mrad}$ , 与共焦非稳腔( $M=1.8$ )的远场发散角相接近。

3. 实验表明, 上述稳腔环状输出存在模式竞争效应, 其远场花样有时出现一个主极大, 有时也出现两个主极大, 在此方向, 光束发散角有所增加。在这两种情况下, 二者的光束发散角比较接近, 小于  $1 \text{ mrad}$ 。

除上述特点外, 与共焦非稳腔相比较, 稳腔环状输出还具有光电转换效率高, 易于调整, 光腔稳定性好等优点。实验表明, 当激光输出功率为  $7 \text{ kW}$  时, 该稳腔环状输出腔的电光转换效率为 10%, 优于在该激光器上得到的共焦非稳腔的电光转换效率。我们认为, 稳腔环状输出易于得到均匀的环状输出是电光效率高的主要理由之一。

#### 参 考 文 献

- [1] A. K. Nath, H. J. J. Sguin *et al.*; *J. Q. E.*, 1986, **QE-22**, No. 2 (Feb), 263.
- [2] H. Kogelnik, T. Li; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 10 (Oct), 1550.
- [3] M. Young; *Optics and Lasers*, 2nd Ed., (Springer-Verlag, 1984), 165.
- [4] D. E. McCumber; *Bell. Sys. Tech. J.*, 1965, **44**, No. 2 (Feb), 333.
- [5] D. E. McCumber; *Bell. Sys. Tech. J.*, 1969, **48**, No. 6 (Jul-Aug), 1919.
- [6] B. J. Freiberg *et al.*; *J. Q. E.*, 1972, **QE-8**, No. 12 (Dec), 882.

## Annular output stable resonator of a high power $\text{CO}_2$ laser with large discharge volume

CHENG ZHAORU

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

H. J. J. Sguin

(Department of Electrical Engineering, University of Alberta, Canada)

(Received 25 September 1987; revised 25 January 1988)

#### Abstract

A stable resonator with high power annular output operated at the stable boundary was studied theoretically and experimentally. In a high power transverse-flow  $\text{CO}_2$  laser with large active volume, the experimental results were obtained of  $7 \text{ kW}$  output power with good beam quality and uniform near-field distribution.

**Key words:**  $\text{CO}_2$  laser; stable resonator of laser.