

文章编号: 0258-7025(2007)05-0628-05

高功率横流 CO₂ 激光器的锥面反射镜谐振腔

武建强, 唐霞辉, 秦应雄, 程祖海, 李宏棋, 钟如涛

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 根据针-板放电 5 kW 横流 CO₂ 激光器的结构特点, 设计并实验研究了直角锥面镜作为全反射镜的谐振腔。在非涅耳-基尔霍夫理论的基础上, 引入柯林斯公式并考虑增益影响, 推导了锥面谐振腔的衍射积分方程, 并进行了相应的模拟计算。研究表明, 在高功率横流 CO₂ 激光器中锥面反射镜与平面输出镜相配合使用组成稳定腔, 获得了 TEM₃₀ 的低阶模输出; 由于锥面反射镜受加工精度的影响中心残留有加工盲孔, 导致 TEM_{mn} ($m = 0, n \neq 0$) 的模损耗较大不易耦合输出; 而镜面中心场分布很弱的其他低阶模因损耗小, 则会优先输出。

关键词 激光器; 气体激光器; 横流 CO₂ 激光器; 直角锥面反射镜; 平-锥谐振腔; 衍射积分方程

中图分类号 TN 248.2 **文献标识码** A

90° Conical Reflector Resonator for High Power Transverse Flow CO₂ Laser

WU Jian-qiang, TANG Xia-hui, QIN Ying-xiong,
CHENG Zu-hai, LI Hong-qi, ZHONG Ru-tao

(Institute of Optoelectronics Science and Engineer,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Considering the structural characteristics of 5 kW transverse flow continuous wave CO₂ laser electrically excited with pin-to-flat discharge, the 90° conical reflector designed as the resonator cavity of totally reflective mirror is investigated. Based on the Fresnel-Kirchhoff theory, the diffraction integrals equation of conical resonator is deduced by using Collins formula and taking gain influence into account. The results indicate that the resonator composed of conical reflector and plane output mirror is stable and low-step output modes are acquired for high power transverse flow CO₂ laser. Limited by the processing accuracy, there is a processing residual blind-hole in the center, which brings considerable loss for TEM_{mn} ($m = 0, n \neq 0$) modes, so its output is difficult. However, the low-order modes of weak center field distribution for less loss have prior output.

Key words lasers; gas laser; transverse flow CO₂ laser; 90° conical reflector; plane-cone resonator; diffraction integrals equation

1 引言

高功率横流 CO₂ 激光器中使用的平凹腔和非稳腔在其腔镜失调后, 光场分布和模体积都会发生变化, 而使用折叠腔可以获得低阶模激光, 改善光束质量, 但随着折叠次数的增加, 激光器容易失调、不稳定。直角内圆锥面反射镜将入射光线反射后平行返回, 可利用基模体积大、失调灵敏度低, 可用于高

功率激光器; 受加工精度的影响, 顶端的盲孔对输出光束质量有重要影响。文献[1]指出双锥面谐振腔的 Q 值有一个最佳的腔长, 文献[2]研究了 90°圆锥激光谐振腔的角度失调特性, 文献[3]采用中空的圆锥全反镜获得了环形的光斑输出, 文献[4]研究了在 TEA CO₂ 激光器上圆锥全反镜的失调角度对输出功率的影响。本文将平面输出镜-直角锥面反射镜构成的谐振腔运用到横流 CO₂ 激光器上, 从理论上

收稿日期: 2006-09-07; 收到修改稿日期: 2006-11-03

作者简介: 武建强(1981—), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要从事高功率横流气体激光器谐振腔的研究。

E-mail: wujq-412@163.com

导师简介: 唐霞辉(1963—), 男, 湖南人, 教授, 硕士生导师, 主要从事高功率气体激光器、激光加工以及金刚石工具激光焊接等方面的研究工作。E-mail: txh1116@hust.edu.cn (通信作者)

推导了谐振腔的衍射方程和增益对其的影响,并通过实验在横流 CO₂ 激光器上获得了稳定激光输出。

2 平锥腔结构设计

实验装置及结构如图 1 所示,根据设计,锥面反射镜的底面直径取 $\phi 40$ mm,内表面采用超精车加工,受机械加工的精度影响,锥面镜的顶端会残存一个直径约为 $\phi 2$ mm 的盲孔,实物图如图 1(a) 所示。平锥腔腔长 $L = 3$ m,输出镜的透射率为 40%,谐振腔原理如图 1(b) 所示。实验在图 1(c) 所示的

HGL-5000 型横流电激励连续 CO₂ 激光器上进行。整机的上半部分结构包括放电结构、激光风机、热交换器、光腔结构等,下半部分结构包括安装电源、电阻箱、充排气系统等。其中谐振腔部分采用了外桥内腔式结构,这样可以减少温度、压力变化对光腔稳定性的影响。直角锥面镜、输出镜均装在激光器壳体内。直角锥面镜固定在后部支撑板上,平面输出镜固定在前部支撑板上,在输出镜的支撑板上装有微型直流电机,这样就可以在激光器运行的过程中随时进行调节。

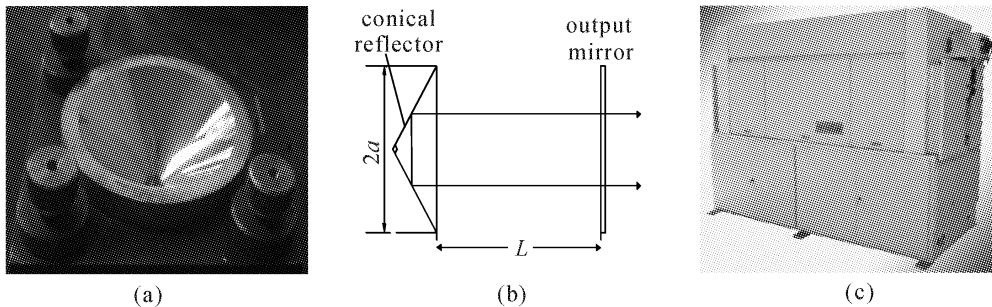


图 1 实验装置及结构简图
Fig. 1 Experimental setup and structure sketch

3 衍射积分方程的推导

理想光学谐振腔的衍射积分方程一般具有 $u(x, y) = \gamma \iint_s K(x, y; x', y') u(x', y') dx' dy'$, (1) 式中 $u(x', y')$ 为平面镜上的初始场, $u(x, y)$ 为腔内由平面镜传播到锥面反射镜时在锥面镜面上产生的场。 K 为积分核, 它的表达式为 $K(x, y; x', y') = \frac{ik}{4\pi\rho} (1 + \cos\theta) \exp(-ik\rho)$, 其中 ρ 为 x, y, x', y' 的函数, 可以表示成 $\rho(x, y, x', y')$ 。

横流 CO₂ 激光器采用不断流动的物质作为增益介质, 这就使得工作物质的增益分布不均匀。由于增益沿截面的分布不均匀也会引起模畸变, 所以当研究锥面腔时, 必须考虑增益对输出光束质量的影响。

对于增益分布不均匀的情况, 通常采用集中参数的模型来处理。假定整个激光工作物质的增益集中在谐振腔反射面上的一个薄层内^[5], 而且是谐振腔横向坐标的函数, 这时谐振腔的积分方程(1)改写为

$$u(x, y) = \gamma \iint_s G(x, y) K(x, y; x', y') u(x', y') dx' dy', \quad (2)$$

其中 $G(x, y)$ 为增益分布函数。

上述方程是可以分离变量的, 令 $u(x, y) = u(x)u(y)$, 代入(1) 式可得

$$\begin{cases} u(x) = \gamma_x G_x(x) \int_{l_x} k_x(x, x') u(x') dx' \\ u(y) = \gamma_y G_y(y) \int_{l_y} k_y(y, y') u(y') dy' \\ G_x(x) G_y(y) = G(x, y) \\ \gamma_x \gamma_y = \gamma \end{cases} \quad (3)$$

当光线在激光谐振腔中往返传播时, 光线的行为同它连续通过周期性的透镜波导时完全等同。因为所讨论的激光束在谐振腔内经历一个完整的周期的往返时间应符合自再现要求, 故只需从周期性的透镜波导中取一个完整的周期来进行计算^[6,7]。为求解图 1(b) 所示的谐振腔的光场分布, 考虑到直角

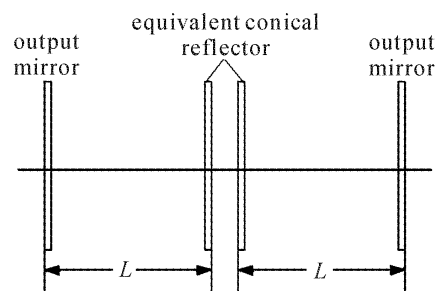


图 2 平锥腔自再现等效图
Fig. 2 Equivalent picture of plane-conical resonator self-reproduction

锥面腔的光线反射特性,在具体分析的时候将其进行了简化,如图 2 所示。

经过以上简化后,得到柱坐标系下平锥腔的本征方程

$$bu(r, \varphi) = \frac{ik}{2\pi L} G(r, \varphi) \int_0^a \int_0^{2\pi} u(r', \varphi') \exp \left\{ -ik \left[\frac{1}{2L} (r'^2 + r^2) - \frac{rr'}{L} \cos(\varphi' - \varphi) \right] \right\} r' dr' d\varphi'. \quad (4)$$

数学上已经证明了方程(1)的解存在,但求解比较困难,特别是当光学系统比较复杂时。柯林斯引入了光线矩阵,并利用入射平面和出射平面能量守恒原理,将标量衍射理论推广到用变换矩阵表示的复杂光学系统,使衍射积分大为简化,得到傍轴光学系统的衍射积分形式^[8],在柱坐标系下表示为

$$u(r, \varphi) = \left(-\frac{i}{\lambda B} \right) \exp(ikL) \iint_s u(r', \varphi') \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [Ar'^2 + Dr^2 - 2r'r \cos(\varphi' - \varphi)] \right\} r' dr' d\varphi', \quad (5)$$

式中 L 为光程, A, B, D 为光束变换矩阵 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 中的分量。令

$$u(r', \varphi') = R'(r') \exp(-im\varphi'), \quad (6)$$

$$u(r, \varphi) = R(r) \exp(-im\varphi), \quad (7)$$

将(5)~(7)式代入(4)式中可得

$$\begin{aligned} R(r) \exp(-im\varphi) &= \\ & \left(-\frac{i}{\lambda B} \right) \exp(ikL) G(r, \varphi) \iint_s R'(r') \exp(-im\varphi') \exp \left\{ -\frac{ik}{2B} [Ar'^2 + Dr^2 - 2r'r \cos(\varphi' - \varphi)] \right\} r' dr' d\varphi' = \\ & \left(-\frac{i}{\lambda B} \right) \exp(ikL) G(r, \varphi) \iint_s R'(r') \exp \left[-\frac{ik}{2B} (Ar'^2 + Dr^2) \right] \exp \left\{ \left[\frac{ik}{2B} r'r \cos(\varphi' - \varphi) - im\varphi' \right] \right\} r' dr' d\varphi'. \end{aligned} \quad (8)$$

利用贝塞耳函数的积分表达式^[9]

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp \left[ik \frac{r'r}{L} \cos(\varphi' - \varphi) - im\varphi' \right] d\varphi' = \exp \left[im \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \right] J_m \left(k \frac{r'r}{L} \right), \quad (9)$$

将(8)式化简为

$$R(r) = \left(-\frac{i^{m+1}k}{B} \right) \exp(ikL) G(r, \varphi) \int_0^a R'(r') \exp \left[-\frac{ik}{2B} (Ar'^2 + Dr^2) \right] J_m \left(\frac{kr'r}{B} \right) r' dr', \quad (10)$$

式中 J_m 为第一类 m 阶贝塞耳函数。

当考虑由于加工精度产生的盲孔时,积分方程的积分限由 $(0, a)$ 变为 (a_0, a) 。由于光线在传输过程中经过从平行平面镜到锥面镜,再从锥面镜到平行平面镜的过程,所以将传输矩阵分解为两个,即从平行平面镜到第一个反射面的传输矩阵 T_1 和反射后的光线经过第二个反射面再到平面镜的传输矩阵 T_2

$$T_1 = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

由于锥面镜的变换矩阵为 $\begin{pmatrix} -1 & -2a \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, 所以

$$T_2 = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & -2a \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -2a - L \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

对于常用的平凹腔,当考虑增益影响时推导出衍射积分方程为

$$E_2(r_2) = \left(-\frac{i^{m+1}k}{B_1} \right) \exp(ikL) G(r_2, \varphi_2) \int_0^a E_1(r_1) \exp \left[-\frac{ik}{2B_1} (A_1 r_1^2 + D_1 r_2^2) \right] J_m \left(\frac{kr_1 r_2}{B_1} \right) r_1 dr_1. \quad (11)$$

同理可以得到传输矩阵 T_0 和 T 分别为^[10]

$$T_0 = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ -\frac{2}{R} & 1 - \frac{2L}{R} \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

式中 R 为平凹腔中凹面镜的曲率半径。

4 实验结果及分析

对平-锥谐振腔的衍射积分方程(11)进行数值计算,其中部分低阶模样式如图 3 所示。

在实验中气体的混合比为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{Ar}) = 1:8:7$,总气压为 8.1 kPa,气流速度为

35 m/s,为了获得对比性,给出了平-锥腔输出镜前端放置了直径为 $\phi 37$ mm和 $\phi 30$ mm的光阑,输出镜为平面镜和曲率半径为 18 m 的凹面镜的输出模式;并给出了凹面镜曲率半径为 18 m,光阑为 $\phi 30$ mm 的平凹腔输出模式。用有机玻璃板记录了输出光束的光斑模式,如图 4 所示。

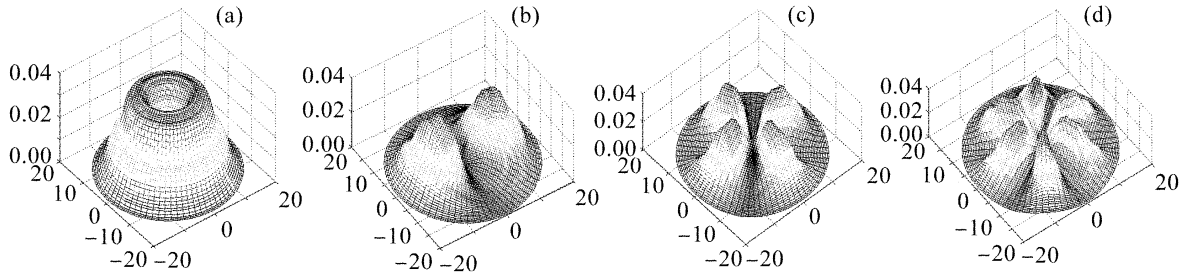


图 3 数值计算低阶模输出样式

Fig. 3 Low-order mode output patterns by numerical calculation

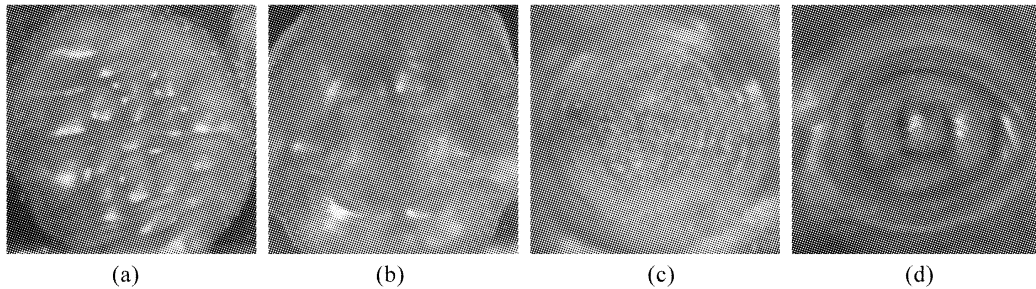


图 4 实际输出光斑模式

(a) 平面镜($\phi 37$ mm 光阑);(b) 平面镜($\phi 30$ mm 光阑);(c) 凹面镜($\phi 30$ mm 光阑);(d) 平凹腔($\phi 30$ mm 光阑)

Fig. 4 Experimental output laser patterns

(a) plane mirror ($\phi 37$ mm diaphragm); (b) plane mirror ($\phi 30$ mm diaphragm);

(c) concave mirror ($\phi 30$ mm diaphragm); (d) plano-concave resonator ($\phi 30$ mm diaphragm)

输出镜为平面镜时,采用 $\phi 37$ mm的光阑获得的输出模式如图 4(a)所示,光斑直径为 $\phi 35$ mm,光斑模式为不规则形状。这主要是由于采用 $\phi 37$ mm光阑,反射面提供有效输出的面积较大,但由于锥面反射镜形状的特殊性,靠近边缘的部分冷却不均匀,造成反射镜表面的热畸变不均匀,影响到输出光斑的模式。采用 $\phi 30$ mm的光阑获得的输出模式如图 4(b)所示,光斑直径为 $\phi 28$ mm,从输出的光斑可知模式为 TEM_{30} ,这与计算所得的输出结果(图 3(d))相符合。这是由于锥面反射镜中心有加工盲孔,使得 $m = 0$ 相对应的低次($0, n$) 模由于镜面中心场分布有极大值而使反馈消失,增加了损失,而对于一些高次模,特别是原来在镜面中心的场分布就很弱的模,不会由于盲孔而使损耗受到大的影响,反而容易输出。采用曲率半径为 18 m 的凹面输出镜并加 $\phi 30$ mm的光阑时获得的输出模式如图 4(c)所示,光斑直径为 $\phi 28$ mm,输出模式为多模。采用曲率半径

为 18 m 的凹面镜, $\phi 30$ mm光阑的平凹腔的输出模式如图 4(d)所示,光斑直径为 $\phi 28$ mm,输出模式为 TEM_{02} 。

由实验结果可知,为了获得大功率的低阶模输出,应采取:改善锥面反射镜的冷却环境,设计合理的冷却方案;提高加工精度,减少盲孔对输出光斑的影响;在反射面镀高反膜减少反射镜的体吸收,提高输出功率;输出镜采用平面镜,并选择合适的光阑。

5 结 论

主要研究了由平面输出镜和直角圆锥面反射镜构成的新型谐振腔。采用等效腔进行代替从理论上运用柯林斯公式研究了该谐振腔的本征方程,在 5 kW 横流 CO₂ 激光器上获得了 TEM_{30} 模的稳定激光输出,实验结果与理论计算结果相符。研究发现锥面镜的冷却效果以及加工盲孔对输出光束模式有

重要影响。

参 考 文 献

- 1 E. B. Treacy. The two-cone open resonator [J]. *Proc. IEEE*, 1966, **54**(5):555~560
- 2 J. Y. Liou, C. J. Chen, M. Y. Hwang. Misalignment characteristics of resonators formed by 90° cone and mirror [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(15):2569~2573
- 3 Suwas K. Nikumb, H. J. J. Seguin. Truncated cone as a pseudoconjugator in a high-power carbon dioxide laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, **64**(9):2488~2492
- 4 Hongqi Li, Zuhai Cheng. Output characteristics of right angle cone mirror cavity laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11):650~652
- 5 Du Yanyi. Stimulation of confocal unstable resonators using thin gain sheet [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(3):301~305
杜燕贻. 用薄层处理法模拟有源共焦非稳腔[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(3):301~305
- 6 Cao Qing, Xia Yuxing. Analysis on the characters of equivalent optical resonators [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1994, **11**(3):122~128
曹 清, 夏宇兴. 等价光学谐振腔的特性分析[J]. *量子电子学*, 1994, **11**(3):122~128
- 7 Cao Qing, Zhang Weijun, Luo Zhijiang *et al.*. Equivalent resonators of multielement resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(2):135~139
曹 清, 张为俊, 罗治江 等. 主多元件谐振腔的等价腔[J]. *光学学报*, 1994, **14**(2):135~139
- 8 Lü Baida. *Propagation and Control of High-Power Lasers* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999
吕百达. *强激光的传输与控制* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- 9 Fang Honglie. *Optical Resonators Theory* [M]. Beijing: Science Press, 1981
方洪烈. *光学谐振腔理论* [M]. 北京: 科学出版社, 1981
- 10 Ling Dongxiong, Fu Yunchang, Fan Zebin. Matrix analysis of eigen mode-fields of the circular plano-concave resonator with a Gaussian-reflectivity mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):25~28
凌东雄, 伏云昌, 樊则宾. 高斯型变反射率圆镜平凹腔本征模场的矩阵分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):25~28