

文章编号: 0253-2239(2004)12-1653-5

# 输出环状光束的新型激光谐振腔

吕 岩 于延宁 万重怡

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 提出一种输出环状光束的新型激光谐振腔,即在稳定激光谐振腔中采用外环耦合方式得到环状光束的输出。利用 Fox-Li 数值迭代算法求解此类激光谐振腔的积分方程,通过计算机编程计算了平面-凹球面稳定谐振腔的输出端平面镜在不同半径的情况下,谐振腔镜面上和衍射耦合输出场基模的振幅和相位分布。计算结果预示了当输出端平面镜半径小于通常的稳定腔的基模半径时,衍射耦合输出场有稳定的环状光束输出。实验中 TEA CO<sub>2</sub> 激光器采用印刷电路板预电离结构,增益长度 90 cm,腔长 5 m,球面全反射镜曲率半径 20 m,输出端平面镜半径 4.5 mm,得到了内环半径为 4.5 mm、外环半径为 5.5 mm 的基模环形光斑输出。从而在理论上和实验上证实了该方案产生环状光束的可行性。

**关键词:** 激光技术; 稳定腔; 环状光束; Fox-Li 迭代算法; TEA CO<sub>2</sub> 激光器

中图分类号: TN243 文献标识码: A

## A New Type of Laser Resonator with Annular Output Beam

Lü Yan Yu Yanning Wan Chongyi

(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 17 October 2003; revised 19 April 2004)

**Abstract:** A new type of laser resonator with annular output beam is presented. Annular output beam is obtained by outer ring coupling in a stable laser resonator. The integral equation of this type of laser resonator is resolved by using Fox-Li numerical iteration method. Amplitude distributions and phase distributions of fundamental mode of the diffraction-coupling output field and the fields on the surfaces of the mirrors are computed by computer programming when the output plane mirror's radius varies in a plane-concave stable resonator. The theoretical results predict that there exists steady diffraction output field with annular beam distribution when the output plane mirror's radius is less than that of the fundamental mode in an usual stable resonator. Experimental TEA CO<sub>2</sub> laser with printed circuit board preionization is used. The laser has gain length of 90 cm. The resonator is composed of a total-reflective concave spherical mirror of curvature radius 20 m and a total-reflective plane mirror of mirror radius 4.5 mm, separated by 5 m distance. The annular output spot of fundamental mode with inner radius 4.5 mm and outer radius 5.5 mm is obtained by the experiment. Therefore the feasibility of the scheme generating annular beam has been verified theoretically and experimentally.

**Key words:** laser technique; stable resonator; annular beam; Fox-Li iteration method; TEA CO<sub>2</sub> laser

## 1 引 言

自从 Fox-Li 提出利用数值迭代方法求解谐振腔积分方程以来,人们对于各种类型的稳定谐振腔

和非稳定谐振腔进行了大量的计算<sup>[1~4]</sup>。在计算稳定谐振腔中,圆孔耦合也被深入地研究过<sup>[5]</sup>。但是我们注意到迄今为止,仍未研究过从圆形镜的边缘外环耦合的方式输出激光束的稳定谐振腔形式。卡塞格伦望远镜系统要求匹配光束为环状,因此获得环形激光光束的输出具有实际应用价值。通常环状

E-mail: lvyang@china.com

收稿日期:2003-10-17;收到修改稿日期:2004-04-19

光束的取得有非稳腔直接输出光束<sup>[6,7]</sup>、基于腔内变换<sup>[8]</sup>和实心光束棱镜变换<sup>[9]</sup>等方式。本文提出了采用稳定谐振腔外环耦合方式输出环状光束的思想。首先从理论上运用 Fox-Li 数值迭代算法研究了激光谐振腔镜面和输出场的振幅相位分布,验证了设计思想的可行性。然后通过实验在 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的稳定谐振腔中得到了基模的环形输出光束,实验结果令人满意。

## 2 理论计算

理想光学谐振腔的积分方程一般具有形式

$$u(x, y) = \frac{1}{b} \iint_s K(x, y; x', y') u(x', y') dx' dy'. \quad (1)$$

在傍轴近似下,求解谐振腔的积分方程可以分离变量,化为  $x, y$  方向上两个等价的一维问题,  $x$  方向上的积分方程为

$$u(x) = \frac{1}{b} \int_{-a}^a K(x, x') u(x') dx', \quad (2)$$

积分核

$$K(x, x') = \exp\left[-i\left(\frac{\pi}{\lambda L}\right)(g_1 x^2 + g_2 x'^2 - 2xx')\right], \quad (3)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $L$  为谐振腔腔长,  $g_1$  和  $g_2$  为谐振腔的曲率因子。

Boyd<sup>[10]</sup> 分析了方形镜共焦腔模式的标量积分方程,进行严格的解析求解后得出基模呈高斯分布:

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}\right), \quad (4)$$

式中  $\omega$  为镜面上基模的光斑半径

$$\omega = \sqrt{L\lambda/\pi}. \quad (5)$$

稳定球面镜谐振腔可以等价于共焦腔来考虑,从而可得出镜面上基模的光斑半径,例如平-凹稳定谐振腔中平面镜上基模的光斑半径为

$$\omega = \left[\frac{\lambda^2}{\pi^2}(RL - L^2)\right]^{1/4}. \quad (6)$$

凹球面镜上基模的光斑半径为

$$\omega = \left[\frac{R^2 L^2 \lambda^2}{\pi^2(RL - L^2)}\right]^{1/4}. \quad (7)$$

以上的理论计算是在谐振腔镜的半径比光斑半径大得多的假定之下得到的。当谐振腔镜的半径小于光斑半径时,激光束就从镜边缘衍射逸出激光腔,形成圆环形输出光束。下面我们计算在这种情况下

的场的振幅和相位分布。

计算中采用平-凹球面镜谐振腔,设凹球面镜 1 半径为  $r_1$ ,曲率半径为  $R$ ,平面镜 2 半径为  $r_2$ ,两镜相距为  $L$ ,如图 1 所示。选用 CO<sub>2</sub> 激光器,波长  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 。

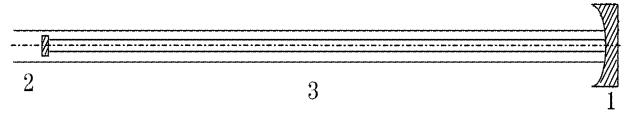


Fig. 1 The laser resonator model with fundamental mode annular beam output. 1: total-reflective concave mirror; 2: total-reflective plane mirror; 3: reference beam

求解上述谐振腔积分方程可采用 Fox-Li 数值迭代算法<sup>[1,2]</sup>,将积分方程(2)重新写成如下形式:

$$u_{m+1}(x) = \int_{-1}^1 K(x, x') u_m(x') dx'. \quad (8)$$

对于对称谐振腔,只要选择一个初始场  $u_1$  代入方程,反复迭代下去,直到  $u_{m+1}$  和  $u_m$  只相差一个常数倍为止。此时求得  $u_m$  便是积分方程的本征函数,而  $u_{m+1}$  与  $u_m$  的比值就是方程的本征值。由于我们所考虑的稳定谐振腔为不对称谐振腔,单程自再现是不可能实现的,因此积分方程便只能考虑“双程”得到,也就是利用 Fox-Li 迭代方法时,需要迭代至  $u_{m+2}$  和  $u_m$  只相差一个常数倍为止。通过计算机编程,使计算过程简单化,可得到任意精确度的数值解。

首先假设输出端的平面镜 2 足够大,即谐振腔为理想的平-凹谐振腔。取腔长  $L = 5 \text{ m}$ ,凹球面全反镜 1 曲率半径  $R = 20 \text{ m}$ ,由(6)式可得镜 2 上基模的光斑半径为  $\omega = 5.4 \text{ mm}$ 。取  $r_1$  为  $30 \text{ mm}$  不变,  $r_2$  分别为  $3 \text{ mm}$ 、 $4.5 \text{ mm}$ 、 $7 \text{ mm}$ 、 $12 \text{ mm}$ ,利用 Fox-Li 迭代算法,取  $u_1 = 1$  的平面波作为初始激发波,分别求出镜面 1 上、镜面 2 上和衍射输出场基模的振幅和相位分布如图 2 ~ 图 4 所示。

从图中可以看出,当镜 2 半径小于基模半径时,镜 1 上基模的振幅分布不是简单的高斯分布,不像稳定腔那样趋向平滑而出现较大波动。镜 2 上中心处振幅最大,从中心到边缘振幅逐渐降落。镜 2 边缘外的输出场是衍射耦合输出的。随着镜 2 的半径的增大,振幅分布曲线也愈来愈趋向高斯分布,镜面内的位相差异也趋向缓和。当镜 2 半径为  $12 \text{ mm}$  时,谐振腔近似为理想平-凹稳定腔,基模场呈高斯分布,镜 1 上振幅下降到中心(最大)值  $1/e$  处的光斑半径为  $6.2 \text{ mm}$ ,镜 2 上振幅下降到中心(最大)值

1/e 处的光斑半径为 5.4 mm, 这与根据(6)式和(7)式计算的基模的半径是一致的。综上所述, 当取平面镜 2 半径小于理想稳定腔基模半径时, 有稳定的

衍射场耦合输出, 因此可以根据以上模型来构造输出为环状光束的激光谐振腔的实验装置。

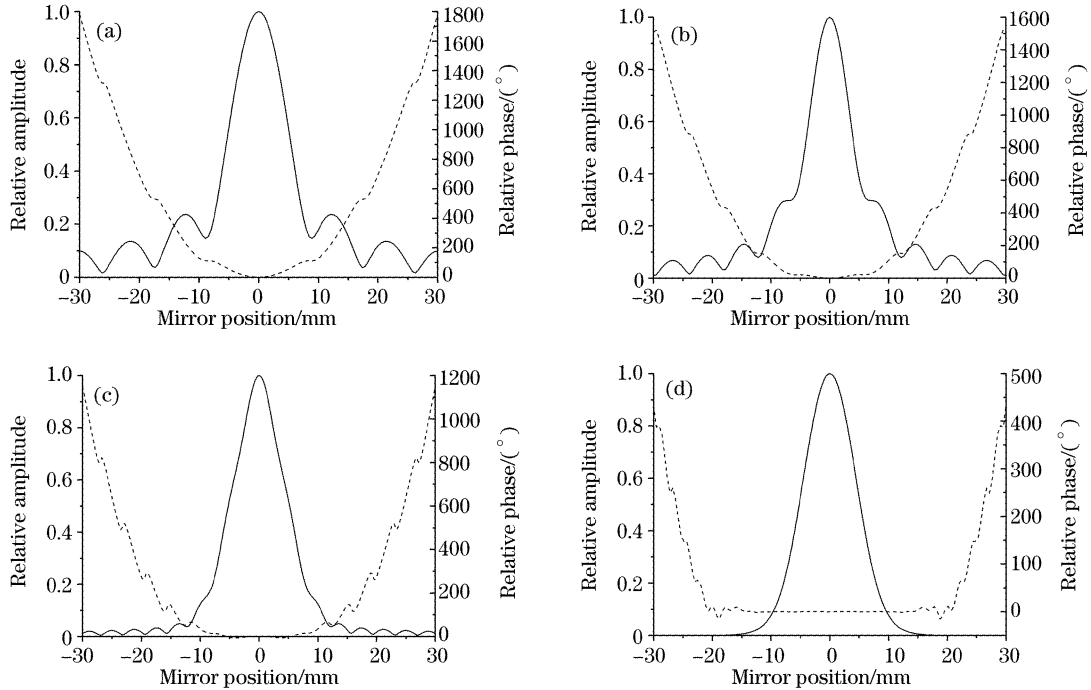


Fig. 2 Amplitude (solid line) and phase (dashed line) distributions of the fundamental mode for mirror 1, when  $r_2$  is (a) 3 mm, (b) 4.5 mm, (c) 7 mm, (d) 12 mm

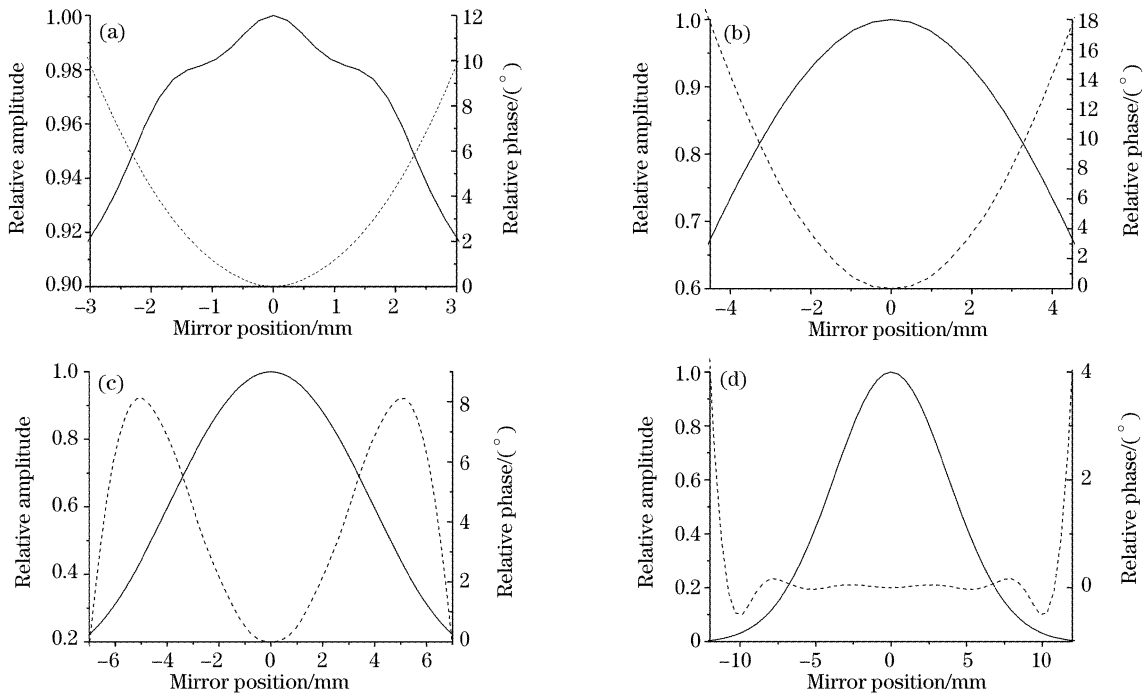


Fig. 3 Amplitude (solid line) and phase (dashed line) distributions of the fundamental mode for mirror 2, when  $r_2$  is (a) 3 mm, (b) 4.5 mm, (c) 7 mm, (d) 12 mm

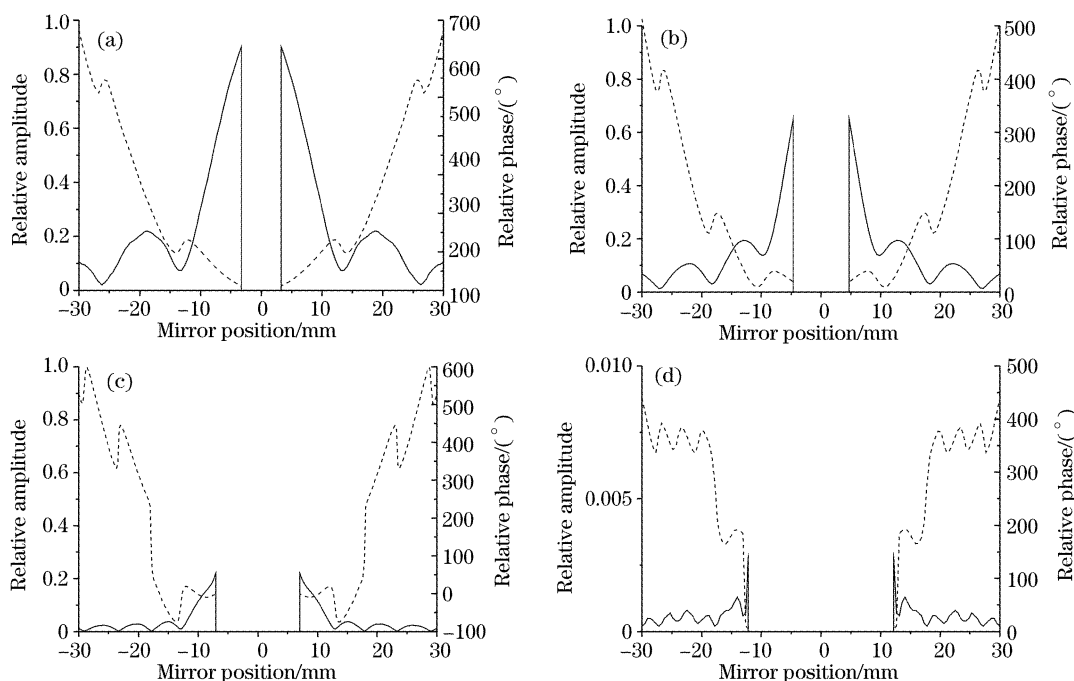


Fig. 4 Amplitude (solid line) and phase (dashed line) distributions of the fundamental mode for diffraction output field, when  $r_2$  is (a) 3 mm, (b) 4.5 mm, (c) 7 mm, (d) 12 mm

### 3 实验装置与实验结果

为了证实上述方案的可行性,我们采用高增益 TEA  $\text{CO}_2$  激光器进行实验验证。由于激光谐振腔的提取效率与激光媒质的总增益和腔的耦合率有关,在我们的外环衍射耦合方案中腔的耦合率较高,因此采用高增益的 TEA  $\text{CO}_2$  激光器是适宜的,不会影响腔的能量提取效率。实验装置如图 5 所示,激光器采用印刷电路板预电离结构的 TEA  $\text{CO}_2$  激光器<sup>[11]</sup>,放电长度为 0.9 m,混合气比例  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$  为 1:1:4,气压为 33.3 kPa。通常情况下小信号增益系数在  $0.03 \text{ cm}^{-1}$  以上,往返一次的总增益高达 6,因此激光谐振腔可以采用大的输出耦合度,适合于用来验证本文的结论。图 5 中激光谐振腔由凹球

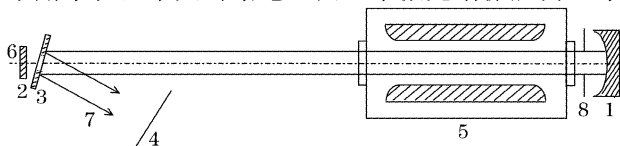


Fig. 5 The laser resonator model with fundamental mode annular beam output. 1: total-reflective concave mirror (curvature radius  $R = 20 \text{ m}$ ); 2: total-reflective plane mirror; 3: total-reflective plane mirror with a center hole; 4: output sink screen; 5: TEA  $\text{CO}_2$  laser; 6: optical axis; 7: output beam; 8: diaphragm

面全反镜 1 和平面全反镜 2 组成,在镜 2 前放置有孔平面全反镜 3,使其镜面法线方向与光轴 6 有一定夹角,输出激光光束 7 到接收屏 4 上。

实验中取谐振腔腔长  $L = 5 \text{ m}$ ,凹球面全反镜 1 曲率半径  $R = 20 \text{ m}$ ,有孔平面全反镜 3 圆孔的半径为 4.5 mm,也就是图 2~图 4 中 (b) 模拟的谐振腔参量。所得在热敏纸上记录的光斑如图 6 所示。环状光斑内环半径为 4.5 mm,外环半径为 5.5 mm。

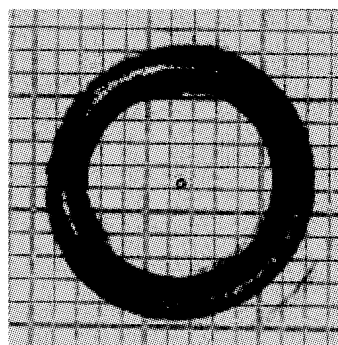


Fig. 6 The ring spot of fundamental mode on heat sensitive paper

**结论** 本文提出一种在稳定激光谐振腔中采用外环耦合方式得到环状光束输出的新型激光谐振腔。首先介绍了光学谐振腔的基本理论,然后从理论上运用 Fox-Li 数值迭代算法研究了激光谐振腔镜面和输出场的振幅和相位分布,验证了设计思想的可行

性。最后通过实验在 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的稳定谐振腔中得到了基模的环形输出光束,实验结果证实了外环耦合输出的稳定激光谐振腔的原理。

### 参 考 文 献

- 1 Fox A G, Li T. Resonant Modes in a Maser Interferometer. *Bell Syst. Tech. J.*, 1961, **40**: 453~488
- 2 Fox A G, Li T. Computation of optical resonator modes by the method of resonance excitation. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1968, **QE-4**(7): 460~465
- 3 Fox A G, Li T. Effect of gain saturation on the oscillating modes of optical masers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1966, **QE-2**(12): 774~783
- 4 Peng Xianzhao, Wu Jin, Wan Chongyi. Transverse modes and frequency selective loss function of a resonator composed of a cylindrical mirror and a diffraction grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(9): 1189~1192 (in Chinese)
- 5 McCumber D E. Eigenmodes of a symmetric cylindrical confocal laser resonator and their perturbation by output-coupling apertures. *Bell Syst. Tech. J.*, 1965, **44**: 333~363
- 6 Siegman A E. Unstable optical resonators for laser applications. *Proc. IEEE*, 1965, **53**(3): 277~287
- 7 Siegman A E. Laser beams and resonators: The 1960s. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, 2000, **6**(6): 1380~1388
- 8 Lu Xuanhui, Zhang Lei, Xue Dajian *et al.*. Hollow laser beam based on intracavity transformation. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2002, **32**(5): 309~311 (in Chinese)
- 9 Cai Bangwei, Lü Baida, Zhang Bin *et al.*. Propagation and transformation properties of axicon optical systems for laser beams. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1994, **A21**(1): 21~25 (in Chinese)
- 10 Boyd G D, Gordon J P. Confocal multimode resonator for millimeter through optical wavelength masers. *Bell Syst. Tech. J.*, 1961, **40**: 489~508
- 11 Cheng Liang, Wan Chongyi, Zhou Jinwen *et al.*. A mini TEA CO<sub>2</sub> laser using printed circuit board preionization. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(1): 7~9 (in Chinese)