

文章编号: 0258-7025(2005)02-0175-05

# 摆动反射镜实现高功率激光束的平滑化

朱广志, 张耀宁, 邹雪芬, 侯冬兰

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为了获得均匀化、平顶的高功率激光束,设计了一种以平面镜为输出镜、凹面镜为全反镜的新型谐振腔结构,由于凹面镜的周期摆动使得输出光束强度分布得到一个时间上的均匀化,得到近似的“平顶”高斯型。建立了理论模型,并对该整形方式进行理论分析与数值模拟。理论计算和实验结果都表明,采用这种新型的整形方式,CO<sub>2</sub>激光器输出光束光强的空间分布得到了明显的均匀化。此方法避免了传统高功率激光光束整形的弊端,提高了系统的可靠性,简化了结构设计。

**关键词** 激光技术;高功率激光器;平滑化;谐振腔;增益分布

**中图分类号** TN 242 **文献标识码** A

## Vibrating Mirror for Smoothing of High Power Laser Beam

ZHU Guang-zhi, ZHANG Yao-ning, ZOU Xue-fen, HOU Dong-lan

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** In order to acquire uniform and flatten Gaussian beam, a new resonator is designed. The beam intensity distribution is modified to obtain greater temporal uniformity by reflector's periodically vibrating. The theoretical model of this beam shaping was built and analyze. Simulated and experimental results are presented that the high-power CO<sub>2</sub> laser beam intensity distribution uniformization can be achieved using the new resonator. The novel method avoided some shortcoming in high power CO<sub>2</sub> laser beam shaping and simplified the whole system.

**Key words** laser technique; high power laser; smoothing; resonator; gain curve

## 1 引 言

在激光技术的应用领域,除了关注激光器的输出功率(能量)和效率外,对激光系统实现柔性控制,即其输出光束参数灵活可控制,也是一个研究的焦点。迄今,已发展了多种整形技术,如二元光学器件<sup>[1]</sup>、小透镜阵列<sup>[2]</sup>、变折射率透镜<sup>[3]</sup>和液晶空间调制器<sup>[4]</sup>等。然而对于高功率的 CO<sub>2</sub> 激光器而言,由于激光束功率过大,这些插入器件热畸变往往会在整形的同时又破坏了光束质量,达不到期望的整形效果。因此人们提出一种腔内整形的新方法:在不增加插入器件的前提下,将平凹腔中的凹面镜用压电陶瓷驱动。该新方法有两种实现方式,一种是通过改变凹面镜的曲率半径<sup>[5]</sup>;另一种是本文所介绍

的使凹面镜整体作周期性的摆动,从而直接对腔内振荡的随时间变化的光场作时间均匀化整形。众所周知,反射凹面镜的周期摆动将不断改变激光束的振荡模式和相位分布,就时间平均的角度来看,实现激光能量的时间光滑化处理,这在激光热处理中是有应用前景的。本文对该方法进行了理论研究和数值模拟,并根据计算结果,选择了合适的参数进行实验。数值计算和实验的结果都证实了这一时间整形方法是可行的。

## 2 基本理论

### 2.1 谐振腔的传输方程

谐振腔基本结构的横截面如图 1 所示,包含平

收稿日期:2003-09-24;收到修改稿日期:2003-12-02

基金项目:激光技术国家重点实验室基金(20010114)资助项目。

作者简介:朱广志(1977—),男,河南开封人,华中科技大学激光研究院教师,主要从事高功率激光器及激光技术方面的研究。E-mail:zgzzb@sohu.com

面镜、凹面镜和可控的振子。振子固定在凹面镜边缘,震动时使凹面镜发生倾斜。平面镜同时也是输出镜。假设谐振腔反射镜面是矩形的,并且谐振腔长远大于反射镜的直径时,可以对  $x, y$  分离变量<sup>[6]</sup>。这样关于二元函数  $u(x, y)$  的衍射积分方程将分解成两个相互独立的单元函数  $u(x)$  和  $u(y)$  的积分方程<sup>[7,8]</sup>。在理论分析中只考虑  $x$  方向宽度为  $2a$  而沿  $y$  方向无限延伸的条形腔的衍射积分方程。

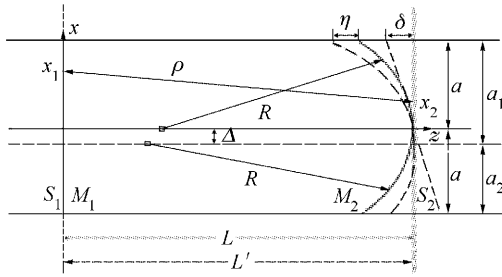


图 1 倾斜反射镜的示意图

Fig. 1 Resonator with tilted reflectors geometry

选择  $S_1, S_2$  为参考面。其中  $S_1$  与镜面  $M_1$  重合,  $S_2$  稍偏移  $M_2$ 。 $S_1$  面上的坐标表示为  $(x_1, z_1)$ ,  $S_2$  面上的坐标表示为  $(x_2, z_2)$ 。谐振腔平面反射镜面上的衍射场积分方程可以写为

$$\gamma u(x_1) = \int_{-a}^a G(x_1) K(x_1, x'_1) u(x'_1) dx'_1, \quad (1)$$

这里采用了集中参数模型<sup>[9]</sup>,  $u(x_1)$  为平面镜镜面上的场分布,  $\gamma$  为特征值。

$G(x)$  表征不均匀的介质增益。由于  $\text{CO}_2$  激光器气体流动会有一些的随机性,使得确定增益分布的函数变得困难。根据文献[10]中计算的小信号增益系数和流动参数、气压的关系曲线,再参考实际的情况我们将增益系数进行数学上的简化:一种是针对流速相对较低的情况,峰值位置靠前,上升沿陡而下降沿平缓,可以简化成为线性下降的增益情况(假定最高增益为 1,增益最低点为 0)

$$g(x) = Cx + D, \quad C = -0.5/a, \quad D = 0.5. \quad (2)$$

另一种是对于流速较高,增益峰值后移的情况,上升沿也相对平缓,不能忽略,不妨简化为对称增益情况(最高增益为 0.8)

$$g(x) = Cx + D, \quad C = 0.8/a \quad (x < 0), \\ C = -0.8/a \quad (x > 0), \quad D = 0.8, \quad (3)$$

这样就便于进行数学上的处理。

$K(x_1, x'_1)$  为积分核,其表达式为

$$K(x_1, x'_1) = \int_{-a}^a K(x_1, x_2) K(x_2, x_1) dx_2, \quad (4)$$

这里  $K(x_1, x_2)$  和  $K(x_2, x_1)$  具有同样的形式,  $K(x_1, x_2)$  可由  $K(x_2, x_1)$  互易脚标 1 和 2 得到

$$K(x_2, x_1) = \sqrt{\frac{i}{\lambda L}} \exp[-ik\rho(x_2, x_1)] = \\ \sqrt{\frac{i}{\lambda L}} \exp(-ikL) \exp\left[-\frac{ik}{2L}(\xi_2 x_2^2 + \xi_1 x_1^2 - 2x_2 x_1)\right], \quad (5)$$

式中  $\rho$  为源点与观察点之间连线的长度,  $\lambda$  为波长,  $k$  为波数,  $L$  为两参考平面间的距离,  $\xi_i = 1 - (L/R_i)$ ,  $i = 1, 2$  分别代表平面镜和凹面镜的曲率因子。

## 2.2 周期摆动的反射镜

周期性摆动凹面镜,在平面输出镜上可以得到周期的相位变化。凹面镜倾斜的谐振腔可以用等价的不对称但调节准确的谐振腔来代替计算。如反射镜位移  $\eta \ll R$  (如图 1 所示),凹面镜镜面此时与其切线近似重合,可以看作是切线的位移  $\delta = \eta$ 。对应光轴的位移量  $\Delta = R \cdot \tan\theta \approx R \cdot (\eta/a)$ 。

此时积分限变为  $a_1 = a + \Delta, a_2 = a - \Delta$ 。

$$\text{积分核为 } K(x_2, x_1) \approx \sqrt{\frac{ie^{-ikL}}{\lambda L}} \exp\left(-i\frac{\Delta^2}{2R}\right) \times \\ \exp\left[-\frac{ik}{2L}(\xi_2 x_2^2 + \xi_1 x_1^2 - 2x_2 x_1)\right]。$$

当输出镜的透射率为  $t$  时,在一段时间内平均输出光强分布可以表示成

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M t \cdot (u_i)^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M t \cdot \int_{-a}^a G \cdot K_i \cdot u_{i-1} dx_1,$$

$M$  为这段时间内波在谐振腔中来回传输的次数,  $K$  为某次传输中的积分核  $K_i(x_1, x'_1)$  (见(4)式),而此处  $\Delta_i = R \cdot (\eta_i/a)$ 。

## 3 数值模拟与分析

根据实际情况,选取计算参数为波长  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ,腔长  $L = 1.5 \text{ m}$ ,凹面镜曲率半径  $R = 20L$ ,腔镜线宽分别为  $2a = 50 \text{ mm}$ ,镜面均匀取样点  $N = 200$  个,振子的频率范围  $f = 10 \sim 100 \text{ kHz}$ 。入射波为平面波,初始光强  $I_0 = I_s$ 。

凹面镜线宽为  $2a = 50 \text{ mm}$ ,摆动最大位移  $\delta_{\text{max}} = 2\lambda$  时,叠加输出的归一化结果与平平腔结果的比较如图 2(g) 所示。图 2(a)~(f) 为在上述情况下凹面镜摆动到不同的位置时对应的光场分布情况,可以看出随着摆动位移从正最大值向负最大值变化的过程中,其输出光场分布均匀地向同一方向移动,若对上述不同时刻的光场分布进行时间上的叠加,就得出光场分布相对均匀化、平顶高功率激光束,从而

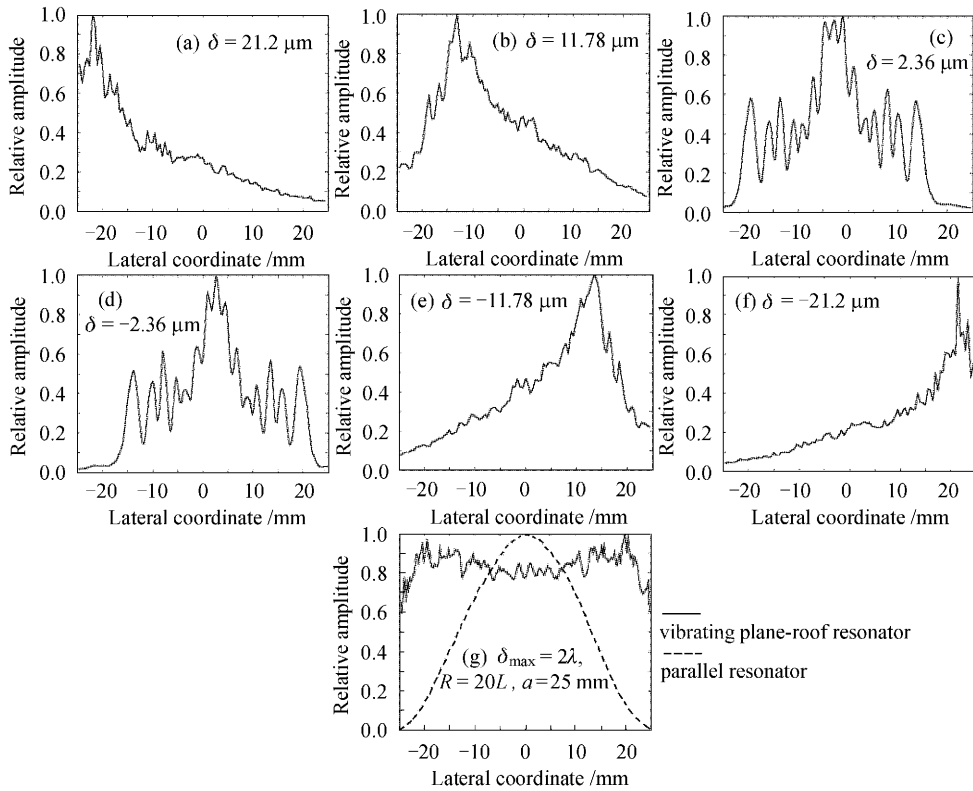


图 2 摆动平凹腔的归一化输出结果

Fig. 2 Intensity patterns of the resonator with vibrating curved mirror

实现了激光束腔内的时间整形。

根据球面腔的调整要求,允许平凹腔的最大倾

斜角为:  $\theta_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{a} = \frac{(a - w_{s1})}{R}$ , 其中  $w_{s1} =$

$\sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \left(\frac{R-L}{L}\right)^{1/4}$  为平面镜上基模光斑半径。

### 4 实验研究

按上述计算结果设计了可自由摆动的凹面镜,在 2 kW 连续 CO<sub>2</sub> 激光器上进行了初步实验。

#### 4.1 平凹腔摆动全反镜的设计

实验中凹面全反射镜曲率半径为 23 m,直径为 60 mm,腔长为 1.2 m,考虑到摆动要有一定的灵敏度,凹面镜就不能像普通的谐振腔全反镜一样固定在法兰圆筒上。因此采用了如图 3 所示的结构,凹面反射镜直接由两块压电陶瓷支撑,当驱动压电陶瓷时,凹面镜的摆动不受法兰圆筒的限制。冷却水通过凹面镜座的水嘴经软管至全反镜循环流动。

#### 4.2 压电陶瓷的驱动电路

凹面镜背后的二块压电陶瓷微位移器采用交替充放电的电路驱动,如图 4 所示。图中 1#, 2# 分

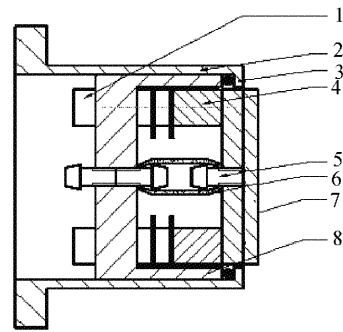


图 3 摆动镜剖视图

1: 螺栓; 2: 法兰导管; 3: 密封垫; 4: 压电陶瓷; 5: 水阀; 6: 橡皮管; 7: 凹面镜; 8: 镜座

Fig. 3 Profile view of the vibrating mirror

1: bolt; 2: flange drawtube; 3: gland; 4: piezoelectric ceramic; 5: water valve; 6: rubber tube; 7: concave mirror; 8: mirror stand

别为二块压电陶瓷微位移器的等效电容。当可控硅 SCR1, SCR3 导通, SCR2, SCR4 关闭时压电陶瓷微位移器 1# 充电、伸长,压电陶瓷微位移器 2# 放电,回复原长度。充放电速率可由  $L_1, L_2, L_3, L_4$  四个电感线圈调节。

触发 SCR1, SCR2, SCR3, SCR4 四个可控硅的

脉冲发生器主要由 KA3525A, CD4050B 两个集成块组成。KA3525A 集成块供电电压为直流 15 V, 它的 11, 14 脚分别输出两个相位差为  $180^\circ$  的方波, 其脉冲频率可调。通过 CD4050B 后将得到两两相差均为  $180^\circ$  的四个方波。再经由微分电路和脉冲变压器分别将同相位的两个触发脉冲触发 SCR1, SCR3。另两个同相位但与上述脉冲相位差  $180^\circ$  的触发脉冲触发 SCR2, SCR4。这样就实现了两块压电陶瓷微位移器的交替充放电过程。

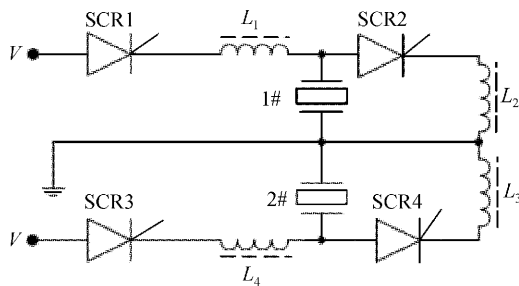


图 4 压电陶瓷的驱动电路

Fig. 4 Driving electric circuits for the piezoelectric ceramics

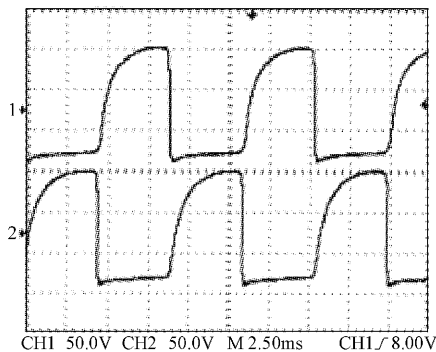


图 5 两压电陶瓷两端的电压变化

Fig. 5 Voltage shift of two piezoelectric ceramics terminal

压电陶瓷微位移器伸长的幅度可由调节充电电压  $V$  来选择。其两端的电压变化测量结果见图 5。两块压电陶瓷交替伸长缩短, 所以凹面镜就可以以两根通水软管作为支点实现周期性摆动。

## 5 实验结果及分析

将可摆动的凹面镜装在华中科技大学激光技术国家重点实验室的 2 kW 连续  $\text{CO}_2$  激光器上进行实验。实验结果如表 1 所示。可以看出凹面镜摆动后输出功率有所下降, 这说明摆动造成谐振腔损耗的增加。图 6 给出了输入电流为 3.75 A 时凹面镜摆

动前后光斑的对比图, 其摆动频率为 10 Hz, 光斑的采样时间为 5 s。可以看出当凹面镜摆动后, 光斑的能量分布趋于均匀化, 达到了光束均匀化整形的结果。

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

	Current /A	Voltage /kV	Un-vibrating power /W	Vibrating power /W
1	1.80	3.17	215	155
2	3.17	3.96	844	755
3	3.75	4.24	1080	920

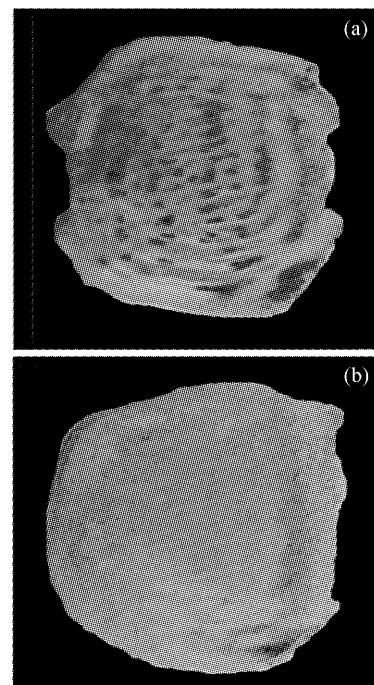


图 6 凹面镜摆动前(a)后(b)的光斑对比

Fig. 6 Beam spot contrast between unvibrated (a) and vibrated (b) mirror

为了更直观地看出实验的效果, 采用千分尺逐点对有机玻璃上记录下来的烧斑图的烧灼深度进行了取点测量。测量结果如图 7 所示, 曲线 a 为图 6 (a) 光斑的测量结果, 曲线 b 为图 6 (b) 光斑测量的结果。横坐标为取样点坐标, 纵坐标以测量值的算术平均值作为零点, 测量值在平均值上下分布, 可以清楚看出烧蚀深度的峰谷值在摆动前相差很大, 最大处比均值高出 1.8 倍, 强弱对比明显, 这样在进行热处理时将造成局部温度过高, 一方面造成工件淬火不均匀, 严重的还导致在工件内部因热应力过大而造成微裂纹; 另一方面对传输激光束的光学系统提出更为苛刻的耐热损伤要求。而加入摆动镜后的

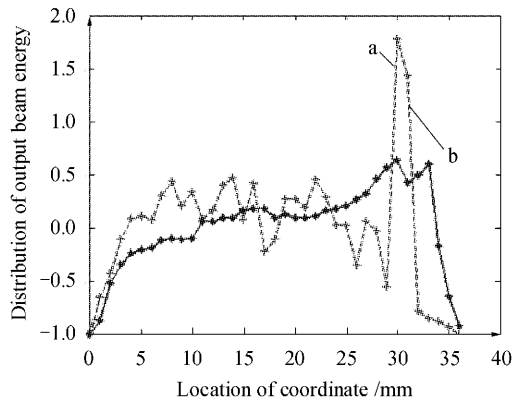


图 7 光斑光滑度对比

Fig. 7 Contrast of uniformity between unvibrate (a) and vibrate (b) mirror case

峰谷值相差不大,最大处比均值大 0.6 倍,光束能量分布相对均匀。取样值的方差计算结果也表明摆动前后的离散程度相差三倍左右。

## 6 结 论

使用摆动凹面镜腔对激光束进行时间上均匀化的实验结果与理论分析计算结果吻合较好。使用摆动凹面镜的方法,可直接由激光腔中产生时间均匀化的平顶激光束。因镜子摆动产生的失调损耗也在理论估计范围内,仅为输出功率的 14.8%。

## 参 考 文 献

- 1 J. Cordingley. Application of a binary diffractive optic for beam shaping in semiconductor processing by lasers [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(14):2538~2542
- 2 Tao Shaohua, Chen Peifeng, Qiu Junlin. Study of a diffractive-refractive optical element used for Gaussian beam's shaping [J]. *Optical Technology*, 1998, (6):3~5  
陶少华,陈培锋,丘军林. 一种用于高斯光束整形的衍射光学元件的研究[J]. *光学技术*, 1998, (6):3~5
- 3 Zhang Shaojun, Huang Liu, Liu Jing *et al.*. Design of the laser beam renovating system outside laser cavity [J]. *J. Beijing Polytechnic University*, 2000, **26**(2):122~123  
张少军,黄 骝,刘 靖 等. 腔外激光束整形系统设计[J]. *北京工业大学学报*, 2000, **26**(2):122~123
- 4 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9):1107~1111  
陈怀新,隋 展,陈祯培 等. 采用液晶空间光调整器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9):1107~1111
- 5 Hou Donglan, Zhang Yaoning, Zou Xuefen *et al.*. Optical beam shaping technology and numerical simulation for high power lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9):799~802  
侯冬兰,张耀宁,邹雪芬 等. 高功率激光束整形技术及其数值模拟[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9):799~802
- 6 A. G. Fox, Tingye Li. Resonant modes in a maser interferometer [J]. *Bell Sys. Tech. J.*, 1961, **40**(2):453~488
- 7 Fang Honglie. Theory of Optical Resonator [M]. Beijing: Science Press, 1981. 84~199  
方洪烈. 光学谐振腔理论[M]. 北京:科学出版社, 1981. 84~199
- 8 H. Stutz, C. L. Tang. Problem of mode deformation in optical masers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**(6):1816~1819
- 9 W. B. Veldkamp. Laser beam profile shaping with interlaced binary diffraction gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(17):3209~3212
- 10 Robert L. Sanderson, William Streifer. Laser resonators with tilted reflectors [J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(11):2241~2248