

文章编号: 0258-7025(2003)09-0799-04

# 高功率激光束整形技术及其数值模拟

侯冬兰, 张耀宁, 邹雪芬, 余文峰, 程祖海

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为了使高功率、大增益的 CO<sub>2</sub> 激光器光束均匀化, 提出了一种新方法: 在不增加插入损耗的前提下, 利用平凹谐振腔中凹镜的曲率半径周期改变使激光光束的模式不断变化, 从而使叠加的光束在时间上实现了光滑化处理。

**关键词** 激光技术; 光束均匀化; 高增益激光器; 周期振动

中图分类号 TN 248.2<sup>+</sup>2; O 242.1 文献标识码 A

## Optical Beam Shaping Technology and Numerical Simulation for High-power Lasers

HOU Dong-lan, ZHANG Yao-ning, ZOU Xue-fen, YU Wen-feng, CHENG Zu-hai

(State Key Lab of Laser Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** In order to gain uniform intensity from a high-power and high-gain CO<sub>2</sub> laser, an time-average approach is proposed. By periodic change of curvature of concave mirror, the modes of beams transform with time. Thus the average out at intensity profile with good uniformity is obtained.

**Key words** laser technique; beam uniformity; high-gain laser; periodical change

### 1 引 言

激光材料的处理和加工等许多应用都要求激光束空间光强分布是均匀的。为了使光束强度的分布均匀化、光滑化, 已提出小透镜阵列、随机相位片、色散元件、二元光学器件、光学系统成形等种种方法<sup>[1,2]</sup>。但上述方法都有其局限性, 都是针对功率比较低的激光器而言的。关于高功率激光束整形的报道目前国内外还是很少, 而且大部分有关的方法属于腔外整形或者是在腔内插入整形器件。J. Armengol 等曾采用双面振镜将光束分成两子波后交叠的方法对多模激光束作光滑化处理, 但是两镜面之间的缝隙将严重影响光束的光滑性<sup>[3,4]</sup>。而在腔内插入器件(透镜或者相位片)不但会增加损耗而且容易因功率过高引起器件热畸变。

在实际应用中, 万瓦级高功率气体激光器通常

是流动型介质, 其增益区中增益分布不均匀, 上游处高, 下游处低。在光斑中常常是一边强一边弱。为了适应这种万瓦级高功率的激光束整形, 本文提出了一种新方法: 在不增加插入器件的前提下, 利用平凹谐振腔中凹镜曲率半径的周期振动改变激光束的振荡模式, 利用时间的相关性消除因上下的增益不一致引起的光强分布不均匀, 实现激光束光斑光滑化。对此方法的理论研究和数值模拟都表明此方法对增益不均匀的高功率激光器是可行的。

### 2 系统的结构和理论分析

本文研究的谐振腔系统结构如图 1 所示。它包含一个平面镜、一个凹面镜和一个能控制其振幅和频率的振子。振子固定在凹镜的中心, 振子的振动使凹镜的曲率半径发生改变。

收稿日期: 2002-05-13; 收到修改稿日期: 2002-07-08

基金项目: 激光技术国家重点实验室(编号: 0114)资助项目。

作者简介: 侯冬兰(1976-), 女, 湖南郴州人, 现在华中科技大学激光院攻读硕士学位, 主要从事高功率气体激光器的研究。E-mail: hailaini@sohu.com

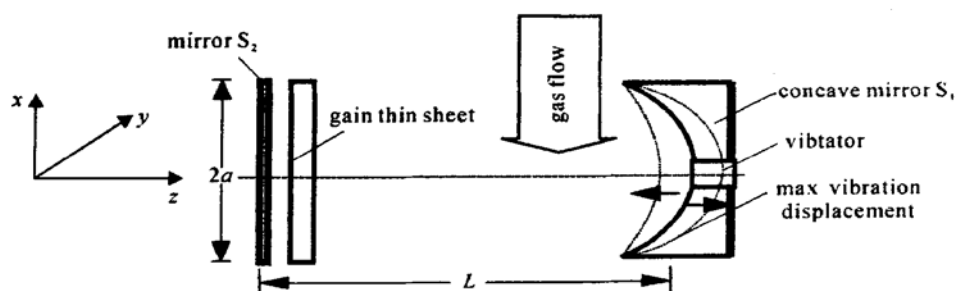


图 1 带振动镜的谐振腔结构示意图

Fig. 1 Resonator system with a vibration concave mirror

本文中谐振腔模式分析的理论基础是菲涅耳-基耳霍夫衍射积分公式<sup>[5]</sup>

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{ik}{4\pi} \iint u_1(x_1, y_1) \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) ds_1 \quad (1)$$

图 1 是一个不对称结构的谐振腔, 根据积分和展开公式<sup>[5]</sup>

$$\rho = L + \frac{(x_1 - x_2)^2}{2L} + \frac{(y_1 - y_2)^2}{2L} - \omega_1(x, y) - \omega_2(x, y) \quad (2)$$

$\omega_1(x, y)$  为镜面 1 的表达式,  $\omega_2(x, y)$  为镜面 2 的表达式。 $\omega_1(x, y) = \frac{(x_1^2 + y_1^2)}{2R}$ , 其中  $R$  为凹镜的曲率半径。

考虑到图 1 的谐振腔中由于气体的流动, 使得增益沿截面的分布不均匀, 而引起腔内模的畸变。对于增益不均匀情况的处理通常是采用集中参数模型来处理的。即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<sup>[6]</sup>, 这样谐振腔的积分方程可写为

$$u_2(x_2, y_2) = g(x, y) \frac{ik}{4\pi} \times \iint u_1(x_1, y_1) \frac{e^{-ik\rho}}{\rho} (1 + \cos\theta) ds \quad (3)$$

其中  $g(x, y)$  为增益分布函数, 考虑到实际应用的高功率气体激光器小信号增益系数较高, 由此产生的增益饱和的影响,  $g(x, y)$  可具体表示成

$$g(x, y) = \exp \frac{g_0(x, y)L}{1 + u_2(x, y)} \quad (4)$$

其中  $g_0(x, y)$  为小信号增益系数。对于任意形式的增益分布函数  $g(x, y)$ , 方程(3)只能用数值方法来求解。可以看出方程(3)现在与不均匀反射谐振腔的积分方程具有相同的形式。

由公式(1)知每改变  $R$  一次, 就可以得到一个

那一刻的谐振腔振荡模式, 而且因为  $R$  在各个时刻都有不同的值, 所以在振子的振动周期内就得到了一连串的不同光强分布的谐振腔振荡模式。在激光加工和材料的表面处理等应用中, 光能在样品表面的热弛豫时间在 ms 量级, 而振子(假设为压电陶瓷)的响应速度可达  $10 \mu\text{s}$ 。那么

$$N = \frac{1 \text{ ms}}{10 \mu\text{s}} = 100$$

$N$  为周期时间内谐振腔振动模式改变的最大次数。周期时间内的平均光强可表示成

$$U_{\text{ave}}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_2(x, y) \quad (5)$$

其中  $U_2(x, y)$  是公式(3)经过迭代后的稳定光强强度, 此时(3)中  $\rho$  由公式(2)给出, 但公式(2)中的  $R$  必须由  $R_n$  (由振子的振幅和频率决定, 且随时间周期变化) 代替,  $g(x, y)$  由公式(4)给出。

### 3 数值模拟和分析

在数值分析中, 主要是讨论凹镜周期振动后输出的强激光光束的光强分布特性, 也就是光束随时间变化的平均光强分布。我们用一个高功率  $\text{TEM}_{01}$   $\text{CO}_2$  激光光束作为初始入射波。考虑到我们的实际情况, 图 1 中各参数选取为: 波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ , 谐振腔腔长  $L = 1.5 \text{ m}$ , 凹镜的初始曲率半径为  $R_0 = 10L$ , 镜子线宽  $2a \times 2a$ ,  $a = 10 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 两镜面上的取样点数均为 50。振子的振幅  $A_m = \lambda/2$ , 振子的频率范围为(假设振子的最快和最慢响应速度分别为  $10 \mu\text{s}$  和  $20 \mu\text{s}$ ) ( $1/20 \mu\text{s} = 50 \text{ kHz}$ )  $\leq f \leq (1/10 \mu\text{s} = 100 \text{ kHz})$ 。为了计算的方便, 我们只计算了一维的光强分布, 不均匀的增益介质集中在谐振腔反射面  $S_2$  上一个薄层内, 设小信号增益系数沿气流方向线形减弱( $g(x) = Cx + D$ ,  $C = -$

$\frac{1}{2a}, D = \frac{1}{2}$  )。再采用衍射积分方程的边界有限元法<sup>[7]</sup>来分析计算。即把输出面  $S_2$  和输入面  $S_1$  分割成有限的  $n$  个面积微元, 输出面  $S_2$  上的任一微元  $u_j$  都是输入面  $S_1$  上所有微元的叠加(设每个微元的值为常数)

$$u_j'(x_2, y_2) = \sum_{i=1}^n \iint_{\Delta x_i} u_i(x_1, y_1) K(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_1 = \sum_{i=1}^n u_i(x_1, y_1) \iint_{\Delta x_i} K(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_1$$

令

$$g_{ij} = \iint_{\Delta x_i} K(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_1 dy_1$$

则

$$u_j' = \sum_{i=1}^n u_i \cdot g_{ij}$$

那么  $S_2$  上的光场可以用以下矩阵来表示

$$\begin{pmatrix} u_1' \\ u_2' \\ \dots \\ u_n' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & \dots & \dots & g_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n1} & \dots & \dots & g_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{pmatrix}$$

简化为

$$U' = G' U$$

如果再加入饱和不均匀增益的话,  $U' = gG' U$ 。同样地, 当光场从  $S_2$  渡越到  $S_1$  时也存在一个表征光场变换的矩阵  $G''$ 。

经过  $S_1 \sim S_2, S_2 \sim S_1$  的往复渡越, 在  $S_1$  上重新生成光场  $U''$

$$U'' = G'' g G' U = G U$$

这里  $G$  称为光传输矩阵, 当光场在光腔中渡越足够多次时, 光场模式将出现自再现。

有限元方法不但可以计算高阶模, 而且收敛速度快, 特别适合于 MATLAB 平台。

利用上述方法来计算公式(1)和公式(5)就得到了图2和图3。图2为未加振动时谐振腔的归一化稳定光强(在  $\varepsilon = |u_{j+1} - m_j| \leq 10^{-4}$  时判定光强达到稳定)输出分布, 图3为振动后的归一化光强输出分布特性。由此可很清楚地看到: 未加振动的稳定输出光束由于增益的分布不均匀引起了模的畸变, 而模畸变的程度又跟凹镜曲率半径有关, 曲率半径越大, 峰值个数越少, 模畸变越少, 越容易得到稳定。同一点的幅值在各个图中都不同, 可能在这个时刻是最大值, 在下一时刻因为  $R$  的改变而变成最小值, 这样在一个周期内许多不同的模式的叠加就使最后输出光强得到了平均(如图3)。由图3可以看出, 一部分峰值确实得到了有效的平滑, 在很大范围内( $\geq 60\%$ )光强得到了均匀化。

### 4 振动对腔损耗的影响

由于振动仅改变腔镜的曲率半径, 因而不会增加失调、反射率降低等所造成的损耗。下面仅对振

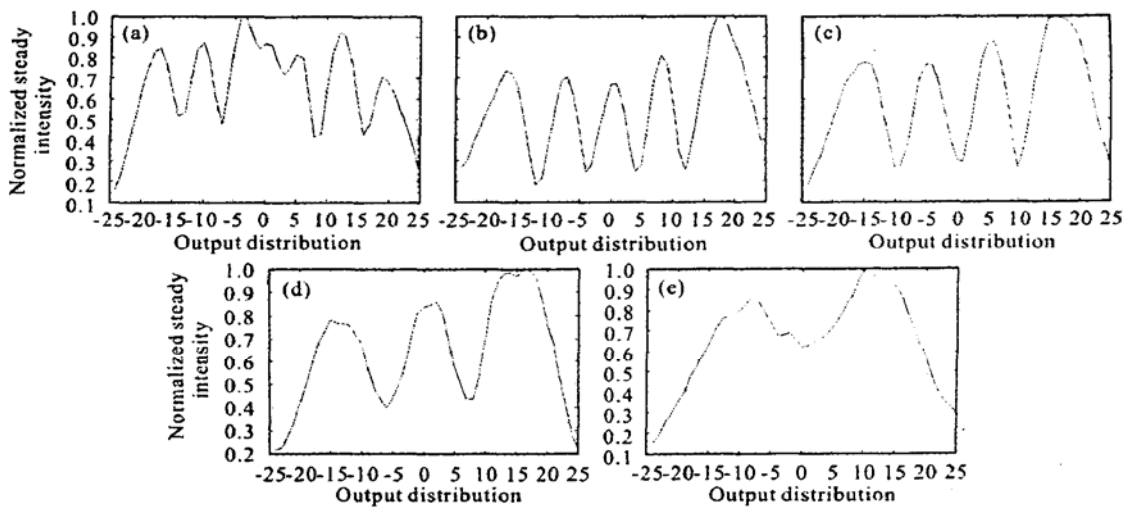


图2 未加振动时不同曲率半径 ( $R$ ) 处的归一化光强分布

(a), (b), (c), (d), (e) 曲线分别表示  $R = 4L, 10L, 15L, 30L, 90L$  的光强

Fig. 2 Normalized steady intensity of different curvature of resonator without vibration

Curve (a), (b), (c), (d), (e) denote intensity of curvature  $R = 4L, 10L, 15L, 30L, 90L$ , respectively

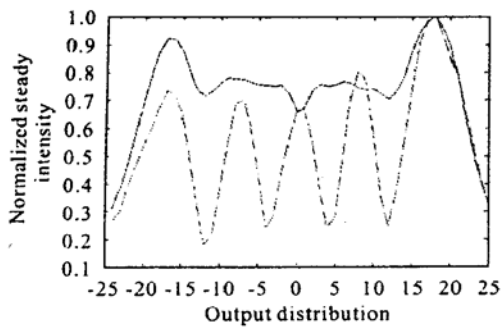


图3 实线为振动后的平均归一化光强分布;虚线为  $R = 10L$  处的归一化光强

Fig. 3 Solid line denotes normalized average output intensity distribution with vibration; dashed line denotes normalized intensity of curvature  $R = 10L$

动中凹镜在平衡位置处以及振动后的平均光强作衍射损耗计算,估算由于振动所带来的附加损耗。衍射计算公式:  $u_{j+1} = \nu u_j$ ,  $L_d = 1 - |1/\nu^2|$ , 其中  $u_{j+1}$ ,  $u_j$  为稳定后的光强分布,  $L_d$  为衍射损耗。未加振动时 ( $R = 10L$ ) 衍射损耗为 0.15%, 振动后的衍射损耗为 1.32%。振动所带来的附加损耗为 1.17%。这就是这个方法的不足之处。

## 5 结 论

高功率激光束的整形技术是气体激光技术中的一个重要组成部分,它关系到气体激光技术的进一步发展和应用。目前,提出小透镜阵列、二元光学方

法、随机相位片、色散元件等种种方法都是针对功率比较低的激光器而言的,对高功率激光器却不实用。本文提出的利用时间的相关性通过改变凹镜曲率半径的方法,在不增加插入损耗的前提下得到了均匀化很好的高功率激光光束。计算结果表明,只要严格控制振子的振幅和频率就能得到较好的输出光强分布。

## 参 考 文 献

- 1 Ximing Deng, Xiangchen Liang, Zezun Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~ 381
- 2 Mao Wenwei, Fu Zhenhai, Wu Minxian *et al.*. Binary optical elements used for agile beam transformation and their application [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(8): 693~ 698 (in Chinese)
- 3 J. Armengol, F. Vega, N. Lupon *et al.*. Two-faceted mirror for active intergration of coherent high-power laser beams [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(3): 658~ 661
- 4 Li Junchang. Study of an optical device for energy homogenization of a high power laser beam [J]. *J. Laser Appl.*, 1999, **11**(6): 279~ 283
- 5 Fang Honglie. *Theory of Optical Resonator* [M]. Beijing: Science Press, 1981. 54~ 56, 147~ 149
- 6 Du Yanyi. Stimulation of confocal unstable resonators using thin gain sheet [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2000, **12**(3): 301~ 305 (in Chinese)
- 7 Li Jiarong, Cheng Yuanying, Sun Yi. Mode analysis on square resonator of CO<sub>2</sub> laser by means of finite element method [J]. *Laser Technology* (激光技术), 1995, **19**(5): 271~ 273 (in Chinese)