

# 带 RAVI 的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器

曾定利 卢亚雄

(电子科技大学光电子技术系, 成都, 610054)

孙年春 江 东 赵 刚 郑从众 周鼎富 王兴邦 侯天晋 屈乾华  
(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

**摘要:** 本文分析了变反射率稳定腔的优点, 将 RAVI 应用于稳定腔 TEA CO<sub>2</sub> 激光器中, 改善输出光束的质量。

**关键词:** TEA CO<sub>2</sub> 激光器 变反射率

## TEA CO<sub>2</sub> laser with RAVI

Zeng Dingli, Lu Yaxiong

(Department of Opto-electronic Technology, University of Electronic Science and Technology of China)

Sun Nianchun, Jiang Dong, Zhao Gang, Zheng Congzhong

Zhou Dingfu, Wang Xingbang, Hou Tianjin, Qu Qianhua

(Southwest Institute of Technical Physics)

**Abstract:** The advantages of employing a variable reflectivity mirror in a stable resonator are evaluated. A radial variable Fabry-Perot interferometer (RAVI) has been applied to a pulsed TEA CO<sub>2</sub> laser with a geometrical stable resonator to improve the intensity profile of output laser beam.

**Key words:** TEA CO<sub>2</sub> laser variable reflectivity resonator

### 一、引 言

为提高 TEA CO<sub>2</sub> 激光器输出光束的质量, 一般采用加限模孔的办法, 使其只产生基模。这导致激光输出功率的下降, 同时限模孔的存在会带来衍射效应, 使远场光强分布中心峰外产生波瓣。所以, 我们打算用变反射率输出镜来改善光束质量。根据理论分析<sup>[1~3]</sup>, 带变反射率镜的激光器能消除锐边衍射, 增大模体积和横模鉴别能力, 减少失调灵敏度<sup>[4~7]</sup>, 有助于得到衍射极限的高功率或高能量光束。

研制变反射率腔激光器的主要难点在于实现反射率随径向距离的变化。目前国外的变反射率镜大多通过在已镀了增透膜的透明基片上沉积一层异形高折射率介质薄膜得到<sup>[8]</sup>。国内由于技术等原因, 难以用此方法获得中心反射率较大的膜片。所以我们采用意大利人 S. De Silvestri 等人提出的径向变化 F-P 干涉仪 (RAVI)<sup>[9]</sup>, 实现反射率递减 (在膜片中心使其相长干涉, 在膜片边缘使其相消干涉)。实验表明, RAVI 应用于稳定腔 TEA CO<sub>2</sub> 激光器中能消除腔内的衍射损耗, 改善输出光束质量。

### 二、变反射率稳定腔与均匀反射率稳定腔的比较

TEA CO<sub>2</sub> 激光器通常采用平凹稳定腔, 所以采用变反射率镜后对稳定腔输出光束的影响

是值得研究的问题。变反射率镜为高斯反射率镜时,腔内模式可以用矩阵光学方法处理,但对其它变反射率稳定腔内的模式,无法用已知的理论描述。所以,我们只好采用 Fox-Li 的办法<sup>[10]</sup>,对它们腔内的场分布进行数值迭代求解。

### 1. 均匀反射率稳定腔

我们对腔长为 0.234m 的平凹腔进行了计算,输出镜为平面镜,反射率为 78%,另一反射镜是曲率半径为 20m 的凹面全反镜。采用迭代法时,当迭代次数达到 100 次后,腔内输出镜处振荡光场的相对振幅和相对位相开始保持不变。采用矩阵光学的办法<sup>[11]</sup>,知道腔内光场为高斯分布,可以求得输出镜处光斑半径为 2.69mm。

### 2. 变反射率稳定腔

我们取镜子边缘的振幅反射率为中心的 13.5%,中心强度反射率为 81%,对以  $n = 2, 2.8, 5$  和 9 的超高斯反射率镜为输出镜的稳定腔分别进行了计算,其中腔长和另一反射镜的参数与前面所述的均匀反射率腔相同,Fresnel 数为 10。当迭代次数达到 50 次后,腔内输出镜处振荡光场的相对振幅和相对位相开始保持不变。从迭代法得到的输出镜处入射光场的强度分布和对应的相位分布可知:随着  $n$  的增加,腔内光场和输出光束的光斑半径一起增加,输出镜处位相分布趋于一个平面,远场发散角减小,同时腔内光强分布开始出现波纹。计算得到的光斑半径和远场发散角见附表。对  $n = 2$  的情形,矩阵光学得到的腔内输出镜处入射光波的光斑半径为 2.43mm,与迭代法的结果几乎相等,这说明两种方法对高斯腔都是可行的。

### 3. 比较

(1)采用变反射率镜后,达到稳态解的迭代次数明显减少。这是由于普通的均匀反射率腔是靠腔内的衍射损耗来选择基模,而变反射率镜边缘透射损耗比中间大,比均匀反射率镜有更强的模式选择能力,而且反射率的渐变使其具有软边光阑的作用,避免了普通均匀反射镜边缘的硬边光阑效应,容易形成基模振荡,有利于脉冲激光器的起振。

(2)变反射率稳定腔中的光场能量主要集中在中央,镜子边缘处的光强很小,从而导致其腔内衍射损耗比均匀反射率腔的小。适当的反射率分布,如后面要讨论的 RAVI 的反射率分布,能基本上消除腔内的衍射损耗。另外,超高斯镜等变反射率镜能使光场更加充满激活工作物质。所以变反射率镜的使用有助于提高输出光束的能量。

(3)变反射率稳定腔输出光束的近场分布一般有中央凹陷,边缘的位相比较中间滞后,随着超高斯指数的增加,输出镜处的位相分布趋于一个平面,从而得到比均匀反射率腔更好的远场分布,远场发散角减小。

(4)变反射率镜反射率的渐变可以降低光腔调整时对准直的要求,降低失调灵敏度<sup>[5]</sup>,抗微扰能力增强,有利于激光器的应用。

因此,变反射率镜用作稳定腔的输出镜有助于获得基模振荡,降低腔内的衍射损耗,改善输出光束质量,降低失调灵敏度,特别适合于脉冲工作的激光器。

Table The results for super-Gaussian cavities with  $n = 2, 2.8, 5$  and 9 by using Fox-Li method, where  $\omega_i$  is the spot size of incident beam at the output mirror inside the cavities,  $\omega_o$  is the spot size of output beam at the output mirror,  $2\theta$  is the beam divergence

	$n = 2$	$n = 2.8$	$n = 5$	$n = 9$
$\omega_i$ (mm)	2.40	2.45	2.48	3.10
$\omega_o$ (mm)	3.40	3.48	3.52	4.34
$2\theta$ (mrad)	3.75	3.25	2.55	2.40

### 三、RAVI 在 TEA CO<sub>2</sub> 激光器上的实现

图 1 所示的是我们实验中采用的 RAVI。这个装置由间距很小, 相对放置的平面镜与平凸透镜组成。反射率轮廓由两个相对表面反射波的干涉决定, 是两表面间距的函数, 所以是径向变化的。选择曲率半径

$$\rho = 2a^2/\lambda \quad (1)$$

的凸面镜与平面镜组合, 使其中心距离为  $\lambda(2n + 1)/4$ 。这样便构成了反射率径向变化, 中心相长干涉、边缘相消干涉的变反射率镜。当  $d(0)$  远小于  $\rho$  时, 强度反射率沿径向的分布为

$$R(r) = R_0 / \left[ 1 + (1 - R_0) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi r^2}{2a^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中,  $R_0$  是中心强度反射率。利用多光束干涉的计算公式, 还可以求出附加相移。计算得到的 RAVI 的强度反射率分布及其附加相移如图 2 所示。强度反射率分布像一个梯形, 中心反射率  $R_0 = 79\%$ 。强度反射率在镜子边缘处的反弹是由于平凸透镜的曲率半径为 5m, 而非理想值 4.7m。附加相移在镜子中央大部分区域可以忽略, 只是在靠近镜子边缘处存在位相延迟。如果平凸透镜的曲率半径取成了理想值, 则镜子边缘处的位相延迟将减小, 但由于衍射效应的存在而不会消失。

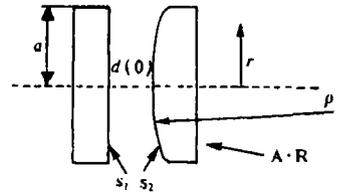


Fig. 1 Schematic of the radially variable interferometer used as the output coupler of a TEA CO<sub>2</sub> laser.  $d(0)$  is the central distance between the surfaces  $S_1$  and  $S_2$ .  $\rho$  is the radius of curvature of  $S_2$ . It is supposed that zero reflectivity is obtained at the radial distance  $a$

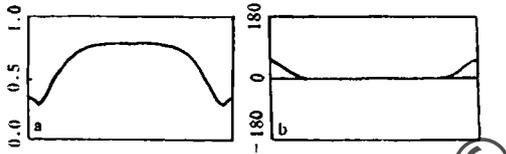


Fig. 2 Intensity reflectivity profile (a) and phase shift profile (b) of the RAVI used as the output coupler of a TEA CO<sub>2</sub> laser

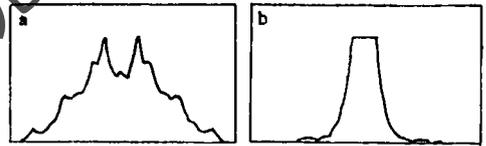


Fig. 3 The calculated near-field (a) and far-field (b) intensity profiles of the output laser beam of the stable resonator with a RAVI as its output coupler

实验用的平凹腔 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 腔长为 0.234m, 凹面镜为曲率半径为 5m 的全反射镜, 变反射率镜同时也是输出镜。激光器的孔径光阑半径为 5mm, 根据(1)式算得的凸面镜曲率半径约 4.7m, 于是我们为平凸透镜的曲率半径选择了一个相近值 5m。采用 Fox-Li 的方法, 对腔内的场分布进行数值迭代求解。经 50 次往返渡越后, 在腔内镜面处振荡光场的振幅和位相分布基本保持不变, 即腔内形成了稳态场分布。腔内输出镜处入射光波的光斑半径为 2.99mm, 与表 1 中超高斯稳定腔的数据比较可知, 干涉型变反射率镜与超高斯指数为 9 的超高斯反射率镜效果相似。计算得到的光腔损耗为 26%, 透射损耗也约等于 26%, 所以腔内的衍射损耗可以忽略。这是因为光场的位相分布几乎与镜面重合, 且边缘的光强值接近于零。理论计算得到的输出光束近场、远场分布如图 3 所示。近场分布中央有一个凹陷, 远场分布为一个尖峰加上旁边的小波瓣。远场发散角为 2.53mrad, 与此对应的均匀反射率激光器的远场发散角理论值约 4.29mrad, 即 RAVI 理论上可减小远场发散角 41%。

我们对安装平凸透镜前后激光器的近、远场光强分布进行了记录。未装平凸透镜时, 此激光器就是一台普通的均匀反射率激光器。这样, 就可以通过对它们的比较来确定干涉型变反射率镜的效果。图 4 就是实验得到的近、远场光强分布。

从图4中,我们可以发现,加平凸透镜与平面镜耦合后,

a. 近场分布变得平滑对称,中央出现了一个凹陷。

b. 远场分布也趋于平滑,中央峰外的波瓣大大减弱,发散角由不加耦合镜时的  $3.9\text{mrad}$  变为  $2.5\text{mrad}$ , 减少了  $36\%$ , 与理论预期值接近。

c. 将图3与图4比较,可以发现输出光束的近、远场分布,理论计算与实测较为符合。

d. 尽管平凸透镜的引入会带来几何束散,但用一会聚透镜沿着输出光束移动过程中,出射光束都将在后焦面上会聚。所以,带此干涉型变反射率镜的激光器的输出光束基本上是准直的。

另外,我们还对安装平凸透镜前后激光器输出的光脉冲的能量进行了测量,在相同的放电条件下,几乎不变。这可能是增加一个镜子带来的吸收和散射抵消了变反射率镜使稳定腔模体积增加带来的积极影响。

#### 四、结束语

本文总结了变反射率稳定腔的优点,实现了 RAVI 在稳定腔 TEA  $\text{CO}_2$  激光器上的应用。实验结果表明,与带均匀反射率分布输出镜的同类激光器相比,采用 RAVI 能够得到类超高斯反射率分布,消除腔内的衍射损耗,改善输出光束质量,使其近场分布更加均匀,远场分布也有改善,发散角减小,中心峰外波瓣中的能量大大减少。

#### 参考文献

- 1 Zucker H. Bell Syst Tech J, 1970;49:2349~2376
- 2 Yariv A, Yeh P. Opt Commun, 1975;13(4):370~374
- 3 Silvestri S De, Wagni V, Svelto O *et al.* IEEE J Q E, 1990;QE-26:1500
- 4 WcCarthy N, Lavigne P. Appl Opt, 1984;23:3845
- 5 WcCarthy N, Lavigne P. Appl Opt, 1983;22:2704
- 6 WcCarthy N, Lavigne P. Opt Lett, 1985;10:553
- 7 Belanger P A, Lachance R L, Pare C. Opt Lett, 1992;17:739
- 8 Lavigne P, WcCarthy N, Demers J G. Appl Opt, 1985;24:2581
- 9 Silvestri S De, Laporta P, Magni V. J O S A, 1987;A4:1413
- 10 Fox A G, Li T. Proc IEEE, 1963;5:80
- 11 卢亚雄,吕百达.矩阵光学.大连:大连理工大学出版社,1989

作者简介:曾定利,男,1970年2月出生。硕士。现在清华大学电子工程系攻读博士学位。从事激光技术研究。

收稿日期:1995-01-23

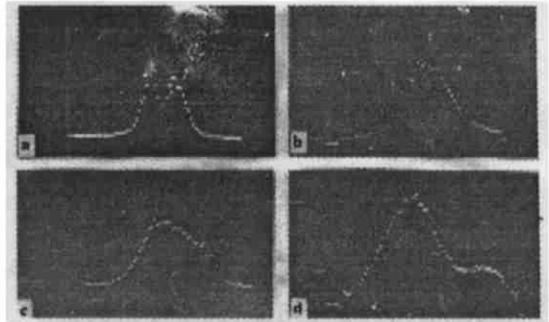


Fig.4 Experimental near-field (a) and far-field (b) intensity profiles of TEA  $\text{CO}_2$  laser with a RAVI as its output coupler, experimental near-field (c) and far-field (d) intensity profiles of TEA  $\text{CO}_2$  laser without a RAVI