

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0082-04

# 高功率脉冲非稳腔 TEA CO<sub>2</sub> 激光器

郭汝海 张来明 杨贵龙 李世明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 高平均功率高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器在激光加工、激光测距和军事应用领域都有非常重要的应用前景, 特别是其光束质量一直是人们关注的重点。在原有稳腔 TEA CO<sub>2</sub> 高功率激光器的基础上, 采用非稳腔的设计方案, 设计并加工了 3 组望远镜虚共焦腔镜, 并进行了单脉冲能量和远场发散角的对比实验。实验结果表明, 非稳腔能够在保证高单脉冲能量的基础上极大地改善激光远场发散角和压缩脉宽, 其中最佳腔镜组合能够达到单脉冲能量 13.4 J, 发散角为 1.2 mrad, 激光脉宽 49.5 ns。对输出镜采用相变制冷技术在高重复频率工作时, 激光器平均功率可达数千瓦以上。

**关键词** 激光器; TEA CO<sub>2</sub> 激光; 非稳腔; 光束质量

**中图分类号** TN48.2<sup>+</sup>2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0082

## High Power Pulsed TEA CO<sub>2</sub> Laser with Unstable Resonator

Guo Ruhai Zhang Laiming Yang Guilong Li Shiming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** High average power high repetition rate TEA CO<sub>2</sub> lasers have many important applications such as laser manufacturing, laser ranging and military applications, especially its optical quality is the key point for its applications. Based on original high power TEA CO<sub>2</sub> with stable resonator in this paper, three sets of telescopic positive-branch confocal resonators are designed and manufactured using unstable resonator scheme. The corresponding comparison experiments are performed with single-pulse energy and divergence angle. Experimental results indicate that using unstable resonator can largely improve the divergence angle and compress the pulse width as the same time to maintain the high single-pulse energy. The single-pulse energy 13.4 J, the divergence angle 1.2 mrad and pulse duration time 49.5 ns are obtained from the best unstable resonator. At the same time the output mirror freezing by change of state can guarantee the average power of laser greater than several kW at high repetition rate.

**Key words** lasers; TEA CO<sub>2</sub> laser; unstable resonator; optical quality

## 1 引言

高功率和大能量的激光器已经广泛地应用于激光制造加工和军事等多个领域<sup>[1~3]</sup>。其中激光器谐振腔的设计一直是人们提高激光器功率和光束质量的首选研究课题, 激光谐振腔主要分为两种类型: 稳腔和非稳腔<sup>[4]</sup>。对于大体积、高增益的气体激光器而言, 非稳腔相比于稳腔无疑具有良好的选模优势, 特别是它的模体积很大, 几乎包括了工作物质的整个体积, 因此有利于提高器件的输出功率<sup>[5~8]</sup>。

目前, 高功率脉冲 TEA CO<sub>2</sub> 激光器技术已经日趋成熟, 但如何在保持高功率的基础上进一步提高其光束质量仍然是摆在研究者面前的一道难题<sup>[9]</sup>。由于非稳腔的诸多优点, 非常适合应用于此种高增益、大体积的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 但过去对非

稳腔激光器的研究, 无论在理论上还是在实验上都相对较少, 究其原因是由于非稳腔对失调非常敏感, 调整困难, 而且非稳腔的积分方程没有精确的解析解, 只能进行数值计算<sup>[10,11]</sup>。

本文将对现有稳腔结构的激光器进行改造, 根据非稳腔的设计原理设计了 3 组非稳腔镜, 在精确装调的基础上进行了对比实验, 探索得出其中最佳的非稳腔腔镜组合, 分析了非稳腔对激光器的光束质量和输出功率的影响。

## 2 激光器非稳腔设计

图 1 给出了用于改造的高功率脉冲 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 该激光器具有高平均功率、高峰值功率和高重复频率的特点, 可以为激光加工制造和军事应用

**基金项目**: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助课题。

**作者简介**: 郭汝海(1976—), 男, 博士, 助研, 主要从事激光光学方面的研究。E-mail: hitgrh@163.com

提供光源。



图 1 TEA CO<sub>2</sub> 激光器主机图

Fig. 1 Primary machine of TEA CO<sub>2</sub> laser

此激光器的腔长  $L = 2225$  mm, 放电电极间距为 40 mm, 轴流风机达到风速 84 m/s, 气体比例为  $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 3 : 10$ , 腔内工作气压为 50 kPa, 放电电压为 36 kV. 采用相同条件设计的虚共焦的非稳腔结构如图 2 所示, 由于输出反射镜在腔内, 实际计算的腔长取为  $L = 2220$  mm.

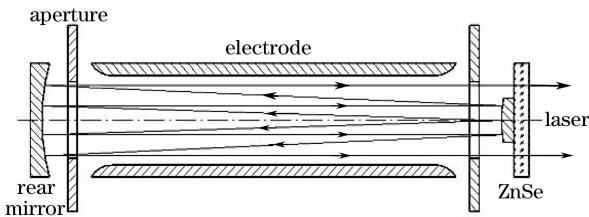


图 2 虚共焦非稳腔结构

Fig. 2 Scheme of virtual confocus unstable resonator

对于激光谐振腔的设计, 通常由  $g$  参数表征,

表 1  $L = 2220$  mm,  $D = 42$  mm 下 3 组非稳腔参数

Table 1 Three sets of parameters for unstable resonator when  $L = 2220$  mm and  $D = 42$  mm

No.	Magnification ratio	Equivalent Fresnel number	Radius of output mirror /mm	Curvature radius of rear mirror /mm	Diameter of output mirror $d$ /mm
1	1.64	2.23	-6894.4	11334	25.6
2	2.19	2.33	-3726.1	8166	19.2
3	2.45	2.25	-3060	7500	17.1

一共是 3 组非稳腔镜, 设计过程中考虑到实际加工条件, 所有反射镜均镀有对  $10.6 \mu\text{m}$  波长 100% 全

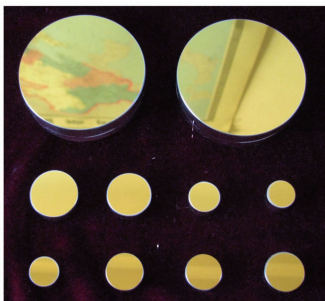


图 3 非稳腔腔镜组

Fig. 3 Mirror sets of unstable resonator

定义为

$g$  参数:

$$g_i = 1 - L/R_i, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

等效  $G$ -参数:

$$G = 2g_1 g_2 - 1, \quad (2)$$

通过以上参数定义非稳腔, 即  $|G| > 1$  为非稳腔结构。

采用正分支虚焦非稳腔结构, 反射镜的半径为:

$$R_1 = \frac{-2L}{M-1}, \quad R_2 = \frac{2ML}{M-1}, \quad (3)$$

式中  $L$  为谐振腔长,  $R_1, R_2$  分别为输出镜和后腔镜的曲率半径,  $M$  为谐振腔的放大率, 即为反馈光束在谐振腔内经历一次往返并形成输出光束时放大的量。

从物理概念上, 一半的非涅耳数与在耦合输出器上聚焦的非涅耳衍射峰相对应, 该耦合输出器使增大反馈返回到谐振腔内。为了获得最好的选模能力, 谐振腔应设计成在工作时具有一半的等值非涅耳数。对于正分支共焦谐振腔, 等值非涅耳数为

$$N_{\text{eq}} = \frac{(M-1)(d/2)^2}{2L\lambda}, \quad (4)$$

式中  $d$  为输出镜的直径。

同时为了充分利用腔内模体积, 取后反镜的直径  $D = 42$  mm, 根据上述非稳腔理论设计的 3 组腔镜的参数如表 1 所示, 输出反射镜通过连接杆结合在透过率 99% 的 ZnSe 平面镜上, 连接杆可微调腔长和平行度, 为镜组装调带来了便利。

反的金膜, 加工后的腔镜实物如图 3 所示。

### 3 结果与讨论

3 组腔镜采用和稳腔激光器相同的工作条件, 采用加拿大 Gentec 公司生产的 PS-330IR 型能量计在激光出口处测量单脉冲能量, 每次换腔镜采用平行光管调整光腔的平行度以保证非稳腔的腔镜和出光轴的对准度, 使每次测量光学谐振腔均处于同一对准精度下, 经多次测量取平均后, 测量结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 第一组腔镜得到了最大的单脉冲能量, 达到了 13.4 J。主要是因为较大的输出

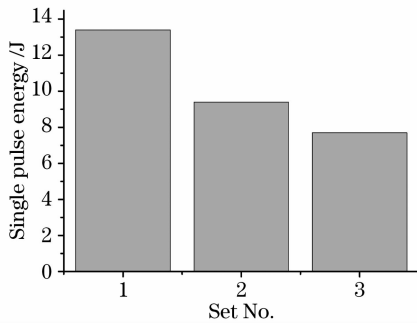


图 4 3 组非稳腔镜对应的单脉冲能量

Fig. 4 Single pulse energy corresponding to three sets of mirrors

镜直径可以使腔内产生较多次的激光振荡,进而提高了光电转换效率。对第一组腔镜采用相变制冷技术,在设计高重复频率下连续工作,平均功率可达数千瓦。利用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 JL1 型光子牵引探测器和美国泰克公司 100 M 示波器测试对应脉宽,如图 5 所示,脉宽(FWHM)为 49.5 ns。由于非稳腔属于大损耗腔,能够有效地压缩激光脉宽,相比于稳腔(100 ns)压缩了一倍以上。

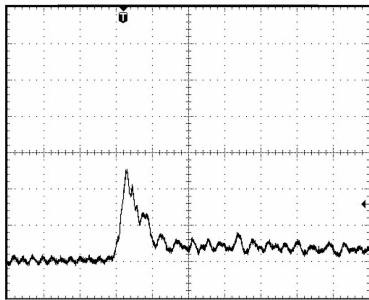


图 5 非稳腔脉宽

Fig. 5 Pulse width of unstable resonator

采用烧斑法测量不同距离的光斑形状如图 6

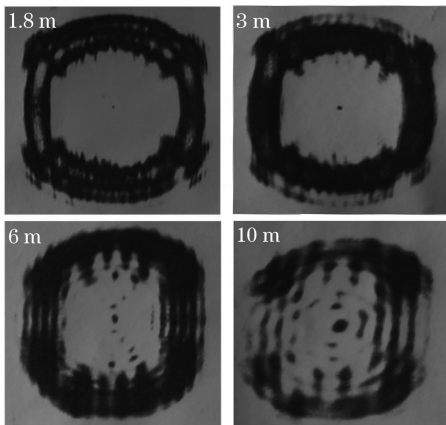


图 6 不同距离下的光斑图

Fig. 6 Spot pictures of different distances

所示。

从光斑图可以看到,由于设计时采用略大于电极间距的非稳腔设计,所以造成边缘存在电极衍射所形成的较强的高阶高斯光强分布,将对此光束的聚焦及扩束特性产生不利的影响,如激光加工的质量或者激光武器的作战效果,可以通过设计合适的后反镜大小和电极形状来消除这种影响。通过上面 4 个光斑大小和相互之间的距离,估算此非稳腔的实际光束发散角约为 1.2 mrad,相比于原稳腔结构的激光器的发散角(2.4 mrad)提高了一倍。

## 4 结 论

针对高功率脉冲 TEA CO<sub>2</sub> 激光器,设计了 3 组非稳腔镜组进行对比实验。实验结果表明此种结构的激光器能够在保持高功率的基础上大幅度地提高光束质量,其中光束发散角和脉宽都压缩了一倍,为进一步利用这种激光器进行激光加工、激光反导、反卫等军事应用奠定了基础。

## 参 考 文 献

- Zuo Tiezhao. Advanced Manufacture in 21<sup>st</sup> Century-Laser Technology and Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. 506~506
- 左铁钊. 21 世纪的先进制造——激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 505~506
- B. Molocher. Countermeasure laser development [C]. SPIE, 2005, **5989**: 598902-1~598902-10
- Y. V. Afonin, A. P. Golyshev, V. F. Filev *et al.*. Technological continuous electric-discharge CO<sub>2</sub> laser of 8 kW power with cross gas pumping and high-quality radiation[C]. SPIE, 2005, **5777**: 446~451
- N. Hodgson, H. Weber. Laser Resonators and Beam Propagation: Fundamentals, Advanced Concepts and Applications[M]. Springer, 2005. 1~15
- Y. Takenaka, M. Kuzumoto, K. Yasui. A 5 kW CW CO<sub>2</sub> laser using a novel negative-branch unstable resonator with a phase-unifying output coupler[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1992, **28**(9): 1855~1858
- Chen Jiayuan, Yu Wenfeng, Yang Feng *et al.*. Beam quality of unstable resonator of TEA CO<sub>2</sub> coaxial output laser with vortex tube cooling system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, **19**(7): 1057~1060  
陈佳元, 余文峰, 杨 峰 等. TEA CO<sub>2</sub> 激光器涡流管同轴非稳腔光束质量[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7): 1057~1060
- Yang Feng, Yu Wenfeng, Chen Jiayuan *et al.*. Beam quality of TEA CO<sub>2</sub> lasers with coaxial output unstable resonators[J]. Laser Technology, 2008, **32**(3): 314~316  
杨 峰, 余文峰, 陈佳元 等. TEA CO<sub>2</sub> 激光器同轴非稳腔光束质量[J]. 激光技术, 2008, **32**(3): 314~316
- N. A. Generalov, N. G. Solovyov, M. Y. Yakimov *et al.*. High-power CO<sub>2</sub> laser with VRM unstable resonator: beam quality control and characterization [C]. SPIE, 2000, **4165**: 210~218
- Luo Shirong, Lü Baida, Huang Lu. The far-field intensity distribution and beam quality of unstable resonators[J]. Laser

- Technology*, 1999, **23**(5): 281~284
- 罗时荣, 吕百达, 黄 鹭. 非稳腔的远场光强分布和光束质量 [J]. 激光技术, 1999, **23**(5): 281~284
- 10 Fu Lei, Shi Jiangmin, Zhang Lingxiang *et al.*. Simulation of the alignment and misalignment of an unstable resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8): 709~713
- 傅 雷, 史江民, 张岭香 等. 非稳腔准直和失调影响的计算机仿真[J]. 中国激光, 2001, **A28**(8): 709~713
- 11 Zhang Xiang, Xu Bing, Yang Wei. Influence on out coupled mode by introducing intracavity mirror tilt perturbation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 303~310
- 张 翔, 许 冰, 杨 伟. 腔镜倾斜扰动对正支共焦腔镜输出光束模式的影响[J]. 中国激光, 2006, **33**(3): 303~310