

# 大功率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器非稳腔的设计与实验

郭汝海,李殿军,杨贵龙,张来明

(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:**为在不降低传统稳腔高功率 TEA CO<sub>2</sub>激光器功率的基础上,改善其光束质量。本文基于原有的稳腔激光器,设计了3组望远镜虚共焦腔。给出了完整的设计过程并进行了理论分析,同时对不同组的非稳腔激光器进行了对比实验。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器远场发散角,其中最佳腔镜组合能够获得单脉冲能量13.7 J,发散角1 mrad(稳腔为2.4 mrad),激光脉宽50 ns(稳腔为98 ns)。改进的设计方案为 TEA CO<sub>2</sub>激光器应用于激光制造领域奠定了基础。

**关键词:**TEA CO<sub>2</sub>激光器;非稳腔;光束质量;远场发散角

**中图分类号:**TN248.22 **文献标识码:**A

## Design and experiment of unstable resonator for high-power TEA CO<sub>2</sub> laser

GUO Ru-hai, LI Dian-jun, YANG Gui-long, ZHANG Lai-ming

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

**Abstract:** With the aim to improve the laser beam quality and to keep the high output power for a high-power TEA CO<sub>2</sub> laser, three sets of telescopic positive-branch confocal resonators are designed by using a unstable resonator scheme based on a original stable resonator, and the whole design process and theoretical analysis are given. The corresponding comparison experiments are conducted for single-pulse energy, divergence angles and pulse duration time. Experimental results indicate that using unstable resonator not only can largely improve the divergence angle, but also can maintain the high single-pulse energy for the TEA CO<sub>2</sub> laser. When the designed unstable resonator is in the best combination state, it can provide the single-pulse energy of 13.7 J, a divergence angle of 1 mrad (stable resonator as 2.4 mrad) and the pulse duration time of 50 ns (stable resonator as 98 ns), which shows this work will contribute to this kind of laser to be widely used in the field of laser manufacture.

**Key words:** TEA CO<sub>2</sub> laser; unstable resonator; beam quality; divergence angle of far field

## 1 引言

CO<sub>2</sub>激光器经过了近40年的发展,已经广泛地应用于激光制造加工领域,如激光切割、激光焊接和激光熔覆等<sup>[1~4]</sup>。与国外发达国家相比,我国激光制造技术和应用水平仍然存在着较大差距,主要的原因是缺乏高功率连续稳定工作并具有高光束质量的激光器。目前,长春光机所已经拥有自主知识产权的高功率、高重频的TEA CO<sub>2</sub>激光器,平均功率已经能够达到万瓦量级。高功率和高光束质量是对制造用激光光源和激光应用技术提出的两个基本要求,如何在保证高功率的前提下进一步提高其光束质量一直是研究者面临的难题<sup>[5]</sup>。

目前高功率稳腔TEA CO<sub>2</sub>激光器的技术已经日益成熟,为了能在改善其光束质量的同时也能保证较高平均功率,现在普遍设想采用非稳腔的结构,此结构能获得接近衍射极限(发散角小)的高质量单模输出光束,能够输出大能量和空间分布更加均匀的激光束<sup>[6~8]</sup>。

本文在原有大功率TEA CO<sub>2</sub>激光器谐振腔的基础上,利用非稳腔的设计原理,设计加工了3组望远镜虚共焦腔镜,并对其进行了测试对比分析。

## 2 非稳腔设计原理

非稳腔能够在大截面短谐振腔中产生小发散角的输出光束。最有用的非稳腔是共焦非稳腔,这一结构的主要优点是自动对准的输出光束,这意味着光束在最后通过增益介质时被准直。

对于激光谐振腔的设计,通常由 $g$ 参数表征,定义如下:

$g$ 参数:

$$g_i = 1 - \frac{L}{\rho_i}, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

等效 $G$ 参数:

$$G = 2g_1g_2 - 1, \quad (2)$$

式中,

通过以上参数定义非稳腔,即 $|G| > 1$ 为非稳腔结构。本文采用正分支实焦非稳腔结构,反射

镜的半径为:

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

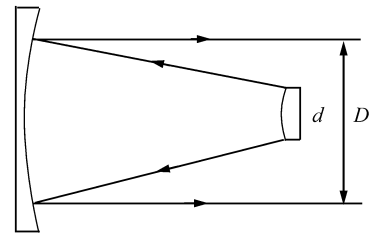
式中, $L$ 为谐振腔长, $R_1$ 、 $R_2$ 分别为输出镜和后腔镜的曲率半径。 $M$ 为非稳腔的横向放大率。

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,该耦合输出器使反馈增大返回到谐振腔内。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:

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

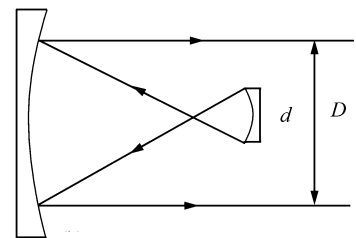
式中, $d$ 为输出镜的直径, $L$ 为谐振腔长。

共焦非稳腔结构如图1所示。



(a) 虚焦非稳腔

(a) Virtual confocal unstable resonator



(b) 实焦非稳腔

(b) Real confocal unstable resonator

图1 共焦非稳腔结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of confocal unstable resonator

已知稳腔CO<sub>2</sub>激光器的实际腔长 $L = 2\ 081$  mm,电极间距为 $40$  mm  $\times$   $40$  mm,由于输出镜会固定在腔内,调整激光腔长 $L = 2\ 060$  mm。同时为了充分利用激光器的模体积,使后反镜略大于电极间距,取 $D = 42$ ,通过(1)式~(5)式计算3组非稳腔的结果见表1。

表1  $L=2\ 060\ \text{mm}, D=42\ \text{mm}$  下的3组非稳腔参数Table 1 Three sets of parameters for unstable resonator when  $L=2\ 060\ \text{mm}$  and  $D=42\ \text{mm}$ 

No.	Magnification ratio	Equivalent Fresnel number	Radius of output mirror/mm	Curvature radius of rear mirror/mm	Diameter of output mirror/mm
1	1.5	2.244	-8 240	12 360	28
2	2	2.525	-4 120	8 240	21
3	2.5	2.424	-2 746.7	6 866.7	16.8

设计了3组非稳腔,其横向放大率  $M=1$ 、5、2.0、2.5,耦合输出率  $\delta=1-1/M^2$ ,遮拦比  $\varepsilon=1/M=0.636\ 5$ 、0.495 5、0.404 0。

非稳腔的输出光束为环形,且具有被输出镜挡住的那部分光束所产生的零强度中心区,其中虚共焦非稳腔输出为一环形平行光束。波恩在光学原理一书中,讨论了环孔光学系统的分辨率,得出环孔光束远场衍射光强分布<sup>[9]</sup>:

$$I(\theta) = \frac{1}{(1-\varepsilon^2)^2} \left[ \frac{2J_1(k\theta a)}{k\theta a} - \varepsilon^2 \frac{2J_1(k\varepsilon\theta a)}{k\varepsilon\theta a} \right]^2 I(\theta), \quad (6)$$

式中: $a$ 为圆环外径; $\theta$ 为远场发散角; $\varepsilon$ 为遮拦比; $k$ 为波数; $J_1$ 为一阶贝塞尔函数; $I_0=|C|^2\pi^2 a^4(1-\varepsilon^2)^2$ 为衍射光斑峰值强度。

$$C = \frac{1}{\lambda R} \sqrt{\frac{E}{\pi a^2 (1-\varepsilon^2)}}$$

$E$ 为光束总能量, $R$ 为衍射孔到屏的距离。

下面用这个式子来讨论虚共焦非稳腔环孔激

光光束远场衍射特性。在分析中改变  $\varepsilon$  来观察远场分布特性的变化,结果如图2所示。

从图中可以看出,遮拦比越大对应的中心亮斑的内角半径越小,这里定义在图2的光强分布图上光强的第一个极小值为0时(即相对强度为零), $\theta$ 的值为内角半径。图中最小的内角半径  $x=2.9$ 时, $\theta$ 为远场发散角半径(半角),它的理论值可以计算得到:

$$\theta = \frac{x}{ka} = \frac{2.9 \times 9.2 \times 10^{-3}}{2 \times 3.14 \times 42} = 1.02 \times 10^{-4}, \quad (7)$$

可以看到理论计算的远场发散角在遮拦比为0.636 5时最小,约为0.1 mrad,光束质量相比于稳腔(稳腔发散角实测约为2.4 mrad)得到了极大的改善。

### 3 测试结果与讨论

在相同的气体配比  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:3:10$  和放电电压为36 kV的实验条件下,对3组非稳腔分别进行了单脉冲能量,光斑形状和脉宽的测量,其中第一组镜子在激光器出口处得到的最大的单脉冲能量为13.7 J,它的光斑在不同距离打在热敏纸上的形状如图3所示。利用脉宽测试仪测量其FWHM为50 ns,原有稳腔的约为98 ns,脉宽图如图4所示。

从光斑形状可以看到,由于设计采用了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,这将对光束的聚焦特性产生不利的影,并影响最终激光加工产品的质量,可以通过设计合适的后反镜大小来消除这种影响。通过上面4个光斑大小

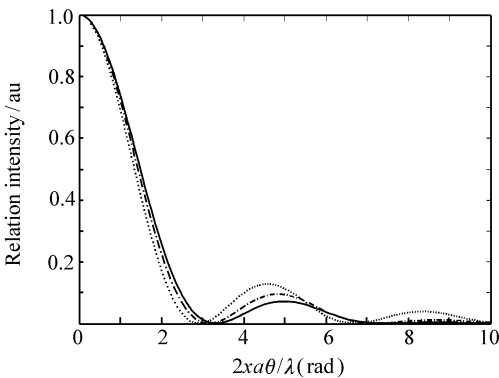


图2 不同遮拦比下非稳腔的光强分布

Fig. 2 Optical intensity distribution under different block ratios

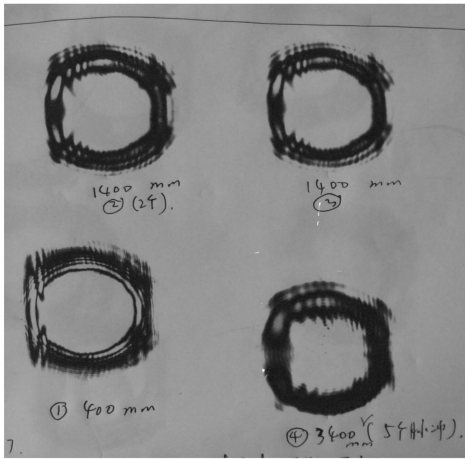


图3 不同位置光斑形状

Fig. 3 Optical spot shapes in different positions

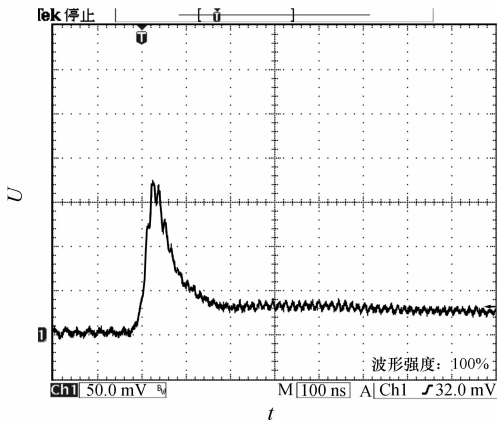


图4 非稳腔脉宽

Fig. 4 Pulse width of unstable resonator

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 mrad,比原稳腔结构的激光器的发散

角(2.4 mrad)提高了一倍以上。

以上的测量数据表明:该非稳腔的发散角很小,但是,比理论值还是要大很多,这是因为一般情况下,在对共焦型非稳腔进行理论输出和发散角计算时,都把它看成是平行光,但是,实际的非稳腔输出光束应该是一个近平行光,有一定的几何发散角,这是腔镜间距和曲率误差等因素造成的;另外,正如上文所述,由于电极衍射的影响,计算发散角也会相应增加;再者,由于腔的长期使用老化,输出窗口的热变性等,使得输出的衍射变得更大。总的说来,测量数据十分理想,与稳腔相比,由于脉宽压缩一倍,发散角减少一倍以上,激光器的光束质量得到了极大的提高。

按照此脉冲激光器在最高重复频率工作条件下,用第一组腔镜能够达到平均功率 6 kW 以上。由于光束质量的提高,理论上相当于目前稳腔激光器平均功率超过 25 kW 所能达到的制造加工效果(不考虑聚焦光学系统的影响)。

## 4 结 论

理论上设计了 3 组非稳腔镜,给出了完整的设计过程。通过试验对比,分析说明了非稳腔大功率 TEA  $\text{CO}_2$  激光器相比于稳腔结构能够有效地提高其光束质量,为激光器应用于激光制造领域奠定了基础。

下一步的工作将是设计采用高半整数等效菲涅耳数的非稳腔,计算合适的后反镜直径,加入相变制冷技术降低输出镜热变形,保证其连续稳定的工作,在达到指定功率输出的情况下,进一步提高其光束质量。

## 参考文献:

- [1] 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.
- ZUO T CH. *Advanced Manufacture in 21st Century:laser Technology and Engineering*[M]. Beijing:Science Press,2007. (in Chinese)
- [2] WEICHIAT C, PAUL A, PAL M.  $\text{CO}_2$  laser welding of galvanized steel sheets using vent holes[J]. *Mater. Design*, 2009: 245-251.
- [3] PETER A A. Some aspects of high-pressure  $\text{N}_2$ -assisted  $\text{CO}_2$  laser cutting of metals[J]. *SPIE*, 1992, 1810:628-631.
- [4] KOTLIKOV E N, KHONINEVA E V, PROKASHEV V N. Beamsplitting coatings for the polarized  $\text{CO}_2$  laser radiation [J]. *SPIE*, 2007, 6611:66110N.
- [5] GENERALOV N A, SOLOVYOV N G, YAKIMOV M Y, et al. High-power  $\text{CO}_2$  laser with VRM unstable resonator; beam

quality control and characterization[J]. *SPIE*,2000,4165:210-218.

- [6] 范嗣强,戴特力. 望远镜非稳腔光束发散角的测量与结果分析[J]. 激光杂志,2006,27(1):12-13.  
FAN S Q,DAI T L. The measurement and result analyse of beam divergence angle of telescopic unstable resonator[J]. *Laser J.*,2006,27(1):12-13. (in Chinese)
- [7] 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.  
LUO SH R,LÜ B D,HUANG L. The far-field intensity distribution and beam quality of unstable resonators[J]. *Laser Technol.*,1999,23(5):281-284. (in Chinese)
- [8] TAKENAKA Y,KUZUMOTO M,YASUI K. 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 Electronics*,1992,28(9):1855-1858.
- [9] BORN M,WOLF E. *Principles of Optics(Fifth Edition)*[M]. Oxford:Pergmon Press,1975,362-368.

作者简介:郭汝海(1976-),男,辽宁大连人,助理研究员,主要从事激光器技术的研究。E-mail: hitgrh@163.com

## 《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- \* 美国工程索引 EI 核心期刊
- \* 中国精品科技期刊
- \* 中文核心期刊
- \* 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmg@sina.com

网址:http://www.eope.net

定价:50.00/册