

# 快速轴流CO<sub>2</sub>激光器研究

牛振亚 石立深 冯兆新\*

**摘要:** 叙述了快速轴流 CO<sub>2</sub> 激光器工作原理, 提出设计该激光器的依据, 建成最大输出功率650W, 额定输出功率550W, 基模输出为主的快速轴流CO<sub>2</sub>激光器。

## 一、引 言

快速轴流CO<sub>2</sub>激光器, 作为一种高功率、高效率、高光束质量的理想工业用激光加工光源, 越来越受到世人的瞩目。这种激光器, 除了气体沿轴向快速流动外, 其结构和普通封离型或慢流型器件的结构基本相同。归纳起来, 快速轴流CO<sub>2</sub>激光器有四大优点。第一, 结构比较简单, 只需在普通封离型或慢流型器件上附加快速气体流动循环系统。第二, 快速沿轴向流动的工作气体, 在放电激发条件下有很大的粒子数反转, 可以具有很高的增益, 因而大大提高了单位长度上的激光输出功率, 能够达到封离型或慢流型器件的10~20倍。第三, 圆柱形放电管内流动的工作气体被激发后, 增益沿径向分布比较均匀, 使激光器具有较高的效率, 最高可达30%。第四, 采用分段放电技术, 可以把放电管设计得比较细, 容易实现基模输出, 产生高质量输出光束, 特别适合切割方面的应用。因此, 在国外, 功率从1kW至3kW范围内, 快速轴流CO<sub>2</sub>激光器有逐步取代横流或慢流CO<sub>2</sub>激光器的趋势<sup>[1-3]</sup>。目前, 我国对这种器件的研究工作也正在逐步展开<sup>[4-6]</sup>。

本文报告了我们研制成功的550W快速轴流CO<sub>2</sub>激光器的基本原理及设计依据, 基本结构和实验结果。

## 二、基本原理及设计依据

对于连续运转的CO<sub>2</sub>激光器, 激光输出功率可以近似地表示为<sup>[9]</sup>:

$$P = \frac{1}{2} S T I_s \left( \frac{2G_0 L}{\alpha + T} - 1 \right) \quad (1)$$

式中:  $S$ ——反射镜有效面积

$T$ ——输出镜透过率

$I_s$ ——饱和强度

$G_0$ ——小信号增益

$\alpha$ ——单程损耗

$L$ ——增益介质长度

\*注: 参加此项工作的还有鲍今是、祝有信、李玉兰。

因此, 对给定长度的器件来说, 提高小信号增益、饱和强度等是提高功率输出的重要途径。

激光器小信号增益系数为<sup>[10]</sup>:

$$G_o(2j, 1j \pm 1) = Q S_j \frac{N_2}{T^{3/2}} \{ B_2 \exp[-F_2(J)] - \frac{B_1}{N_2/N_1} \exp[-F_1(J \pm 1)] \} \quad (2)$$

式中:  $S_j = J + 1$  对P支;  
 $S_j = J$  对R支;

$$F_i(J) = -\frac{B_i J(J+1)h \cdot c}{KT} \text{ 对 } i = 1, \text{ 或 } 2$$

$B_j$  ( $i = 1, \text{ 或 } 2$ ) 为上、下能级的转动常数  
 $J$  为转动量子数  
 $Q, h, c$  等为常数

式(2)表明增益系数与工作介质气体温度有关。Fowler<sup>[11]</sup>的理论分析指出, 增益系数随工作气体温度升高而递减。可见, 冷却问题是CO<sub>2</sub>激光器的重要环节。在封离型和慢流型CO<sub>2</sub>激光器中, 必须依靠管壁的冷却效应。在快速轴流CO<sub>2</sub>激光器中, 注入功率提高, 管壁的冷却效应已经不能满足要求, 气体中的放电残存余热依靠气体的快速循环流动转移出放电管, 由散热装置排走, 使工作气体的温度维持在容许的范围之内。

Eiichi Tsuchida 等人的研究表明, 饱和强度也随气体的流速加快而显著增加<sup>[10]</sup>。因此, 气体的流动特性直接影响着快速轴流CO<sub>2</sub>激光器的输出性能。De Maria 通过双能级分析得到:

$$\frac{P(v_f \rightarrow \infty)}{P(v_f \rightarrow 0)} = \frac{E_1 + E_2}{2E_f} \left( \frac{1 + \sigma T/E_2 + E_1/h\gamma}{1 + 2\sigma T/E_f/h\gamma} \right) \quad (3)$$

式中:  $P$ ——最大提取的功率密度  
 $v_f$ ——气体流动速率  
 $E_1, E_2$ ——碰撞驰豫时间  
 $I$ ——光场强度  
 $E_f$ ——气流通过放电区时间

式(3)表明, 在气体流速很大情况下, 最大提取功率密度随气体流速线性地增大。所以, 在快速轴流CO<sub>2</sub>激光器中, 得到高速气流是至关重要的。我们选用罗茨泵为推动气体流动的动力装置, 该泵具有流量大、允许工作压差高的特点。气体进入放电管时通过特殊设计的气体喷嘴。喷嘴主要具有以下方面的作用: 第一, 喷嘴处气路孔径减小, 气流通过时被加速。第二, 工作状态下, 喷嘴孔径大小影响循环管路中气体压力的分布, 通过喷嘴与充气气压和放电系统的配合维持一定的  $E/P$  值。第三, 气体通过喷嘴时, 流场受到扰动, 形成一定程度的紊流分布。紊流状态有利于放电均匀稳定, 而且, 处于紊流中的粒子, 在通过放电管时能有效地进入模体产生受激发射, 提高了光电转换效率。

参照 S. Muller 等人的理论计算结果<sup>[12]</sup>, 如果在我们的装置中能够得到  $G_o = 0.5 \text{ m}^{-1}$ 、 $I = 800 \text{ W cm}^{-2}$ , 在设计中选用  $L = 1 \text{ m}$  长的放电区, 放电管直径 18mm, 假设单程损耗  $\alpha = 0.04$ , 用透过率  $T = 20\%$  的输出镜, 则根据(1)式, 可估算出输出功率为  $P = 645 \text{ W}$ 。

### 三、激光器的结构

激光器由四个部分构成，即激光放电管及光学谐振腔，气体循环冷却系统，充气排气系统和电源，如图（1）。

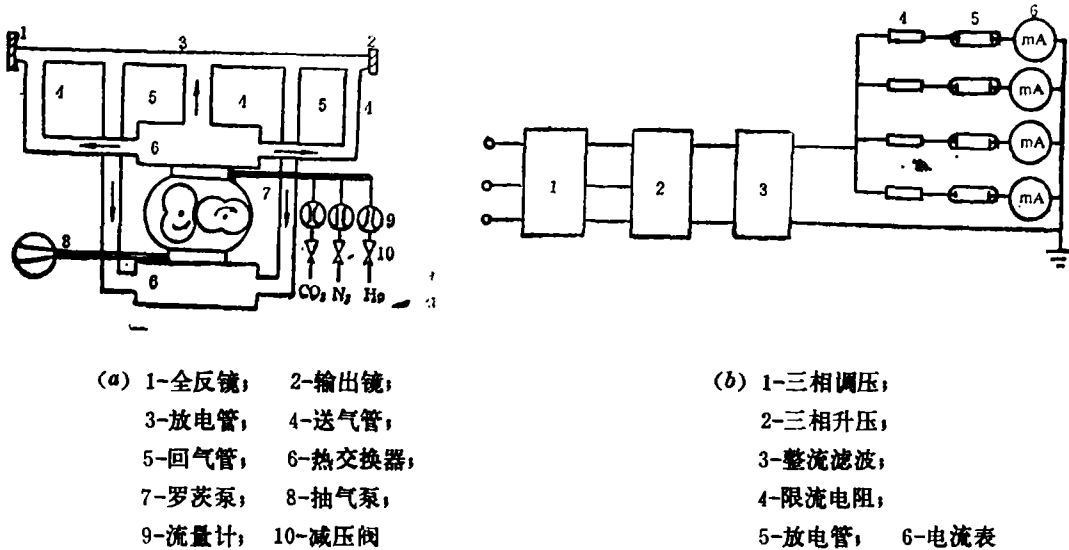


图 1

#### 1. 放电管及光学谐振腔

由四段内径17.8mm，长260mm的石英管加上必要的放电隔离区组成放电管，阳极是钨针，阴极是不锈钢筒，每个阳极附近加装一个预电离触发线圈，使四段放电管能可靠地同时均匀起辉放电。激光谐振腔总长2.3m，后端是钻石车床车削的曲率半径为10m的无氧铜全反射镜，前端是透过率为20%的镀多层介质膜的GaAs输出镜。

#### 2. 气体循环冷却系统

由一台罗茨泵、两台板翅式铝制水冷却热交换器、放电管及连接管路构成。罗茨泵的抽速为300L/s，在整机安装之前，我们曾建立一套模拟的气体循环流动装置对罗茨泵的工作性能进行了测试，充气压在86.65Pa以内时，在模拟放电管中均能得到高于200m/s的流速，同时泵的出入口压差在允许值之内，表明此泵能在实际装置中满足需要。

#### 3. 排气充气系统

CO<sub>2</sub>气体在放电条件下发生分解，为使激光器长时间工作时功率输出不下降，工作气体采用部分更新交换，即真空系统中的气体不断有小部分排走，同时新气体补充进真空系统。三种工作气体经过各自的减压阀和流量计后进入真空系统，排气由真空泵完成，它通过装有小孔的管路与真空系统相连，每小时的总换气量为30L。

#### 4. 电源

采用三相供电方式，低压部分用三相可控硅调压，高压输出为20kV、400mA，纹波系数在1%以内，对限流电阻进行风冷。

### 四、激光器的输出性能

在激光器的研制过程中，我们对激光器的输出性能进行了测试和研究，图 2 - 5 为在各种不同条件下激光器的输出功率和激光效率随注入功率密度变化的曲线。

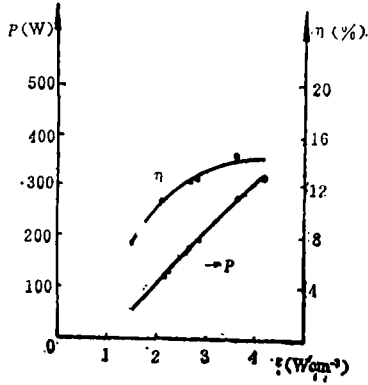


图 2  $CO_2:N_2:He = 2:3:10$ ,  
4585 Pa, 1号喷嘴,  
管径 22mm,  
放电区  $4 \times 350mm$

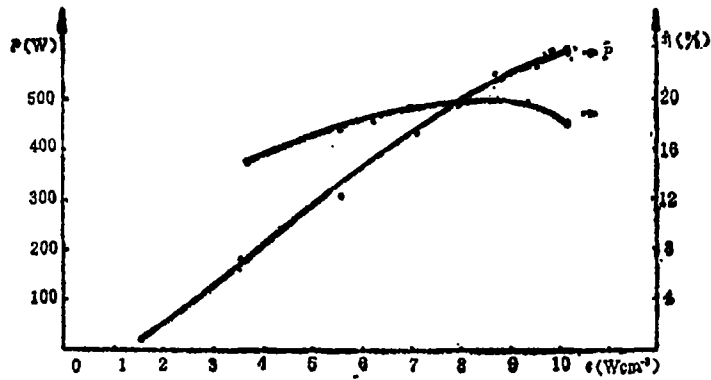


图 3  $CO_2:N_2:He = 1:2:12$  7731 Pa, 2号喷嘴, 管径18mm, 放电区  $4 \times 350mm$

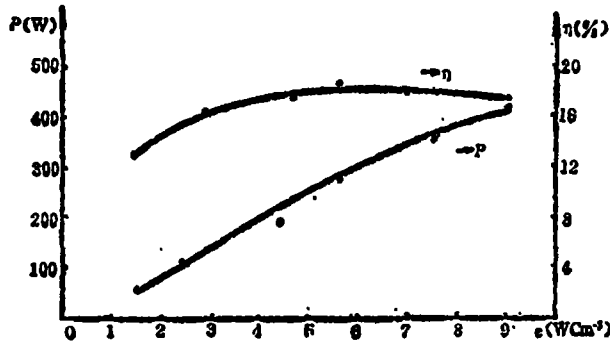


图 4  $CO_2:N_2:He = 1:2:12$  7465 Pa, 3号喷嘴, 管径 18mm, 放电区  $4 \times 260mm$

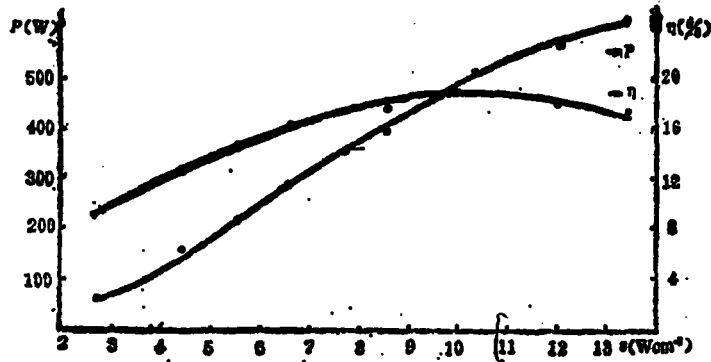


图5 CO<sub>2</sub>: N<sub>2</sub>: He = 1:2:12 7332 Pa, 4号喷嘴,管径 18mm, 放电区 4 × 260mm

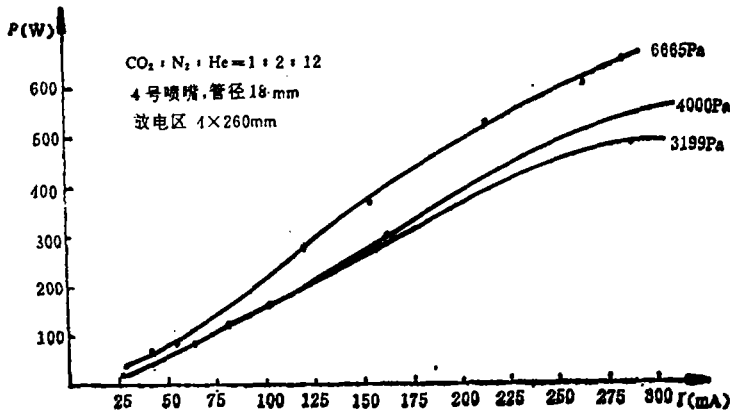


图6 不同充气压力下, 输出功率随放电电流变化的曲线。

用烧蚀有机玻璃的方法可以确认输出激光的模式是基模为主。图7为激光烧蚀的有机玻璃的剖面。

激光器长时间工作在550W时, 功率稳定度在±3%以内。比较近场与远场光斑的尺寸算得光束发散角为1.5 m rad。

本工作是在王庆云和于志勤同志的关心和帮助下完成的, 马云程同志设计了热交换器, 冯世杰、刘家燕和姜军同志参加了部分工作, 在此一并表示感谢。



图7

### 参 考 文 献

- [1] H. Hage, H Martin, T Northemann, SPIE, 801 (1987) 58-61
- [2] A. P. Schwarzenbach and U. W. Hunziker, SPIE, 1020 (1988) 43-48
- [3] J. G. Freeman, J. Leece and D. R. Martyr, SPIE, 1020 (1988) 32-26
- [4] 安承武等, 激光杂志, 1989, 第10卷, 第2期
- [5] 安承武等, 华中理工大学学报, 1989, 17, No.6

- [6] 高允贵等, 激光杂志, 1989, 第10卷, 第6期
- [7] 金光勋, 长春光机所硕士学位论文, 中国学科院长春光机所1987届论文
- [8] 杨和逸等, 《激光加工技术论文集》, 中国光学学会, 1989年10月 136-140
- [9] 周炳琨等, 《激光原理》, 国防工业出版社 1980
- [10] Eiichi Tsuchida and Heihachi Satu, Japanese Journal of Applied Physics 27, No. 8, August 1989 1445-1553
- [11] Fowler, M. C., Appl. Phys. Lett., 18, 1971, 175
- [12] S.Muller and J.Uhienbusch, J.Phys. D:Appl. Phys., 20(1987) 697-708

## Fast Axial-flow CO<sub>2</sub> Laser Study

Niu Zhenya Shi Lishen Feng Zhaoxin

### Abstract

It briefly describes the elementary principles of the fast axial-flow CO<sub>2</sub> laser, points out the evidences to design a fast axial-flow CO<sub>2</sub> laser which provides 650W maximum output power, 550W rated output power with base mode dominant.