

圆形金属腔旋流二氧化碳激光器

李再光, 龚 威

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

[摘要] 现有的工业 CO₂ 激光器, 主要为横流、纵流和扩散冷却三种。文章提出一种新型激光器, 即圆形金属腔 CO₂ 激光器。该激光器的腔体由多个等距、同轴安装的金属腔单元组成。每个腔单元有多个流道, 放电一流道与腔体接口处产生, 气流将放电及被其激活的粒子吹入腔内, 形成增益, 输出激光。文章研究了电极结构, 金属腔壁对工作气体的冷却作用和腔内的增益分布。研究表明: 多通道放电吹入和腔内旋流, 有利于腔内的均匀放电; 金属腔壁有利于腔内对流冷却, 降低对气流速度的要求, 从而缩小激光器的体积。相邻的腔单元相对转动适当角度, 可以提高腔内增益分布的圆周均匀性, 从而获得光束质量好的激光束。

[关键词] 二氧化碳激光器; 圆形金属腔; 旋流; 光束质量

1 前言

激光的不同应用, 对光束质量有不同的要求。在激光加工中占 70% 以上的激光切割, 特别是多维精密激光切割, 需要基模激光束。要获得此种高质量的激光束, 关键在于光腔内的增益分布应是圆周均匀的。国内外用于激光加工的高功率二氧化碳激光器, 主要是横流、轴流和近年出现的扩散冷却激光器。横流激光器因腔内增益分布轴不对称, 导致输出光束的功率分布轴不对称, 主要用于热处理和焊接。平板放电扩散冷却激光器也因腔内增益分布轴不对称, 其光束经光学处理后, 仍有一定的椭圆度, 主要用于平面切割和焊接。轴快流激光器可以获得基模光束, 它的腔体是圆形玻璃管, 腔内增益分布是圆周均匀的。轴快流激光器已广泛应用于多维精密激光切割。但每个腔单元长达数十厘米, 加之腔壁是玻璃的, 腔内热交换能力特别差, 需要耗电数十千瓦的罗兹泵, 产生高速气流, 进行腔外对流换热, 它的体积大、造价高。

我国自主开发的横流激光器已能满足国内的需

求, 年销售 30~50 台, 用于热处理, 并开始用于激光焊接。作为切割用的轴快流激光器及其加工系统, 近 10 多年, 已引进 100 多台套, 耗资 5 000 万美元以上。研究圆形金属激光器的目的是要尽快研制出适用于多维精密激光切割的, 光束质量可与轴快流激光器相媲美但比轴快流激光器体积小、造价低的新型 CO₂ 激光器。圆形金属腔激光器已获国家实用新型专利。本文就其结构和工作过程、放电特性和腔内增益分布作一介绍。

2 圆形金属腔激光器结构和工作过程

图 1 示: 激光器的光腔由同轴、等距安装的多圆形金属腔单元和装在箱体上的全反镜和输出镜组成。金属腔单元的个数取决于激光功率的大小, 由几个到几十个。每个金属腔单元有多个对称分布的离轴流道。所谓离轴, 即根据光腔直径的大小和对光束功率径向分布的要求, 使流道的中心线偏离腔轴一定的距离。气流进入腔内的入口处装有电极, 放电在电极和流道壁之间的短气隙中产生, 或改变绝缘结构, 使放电在流道壁之间产生。放电可

采用直流、开关、高频或射频电源。气流由风机产生，经导流器和离轴流道，将放电及被其激活的粒子吹入腔内，形成增益，产生光放大，输出激光。气流先经过离轴流道进入腔内，形成旋流^[1]，并从每个腔单元的两端离心旋出，接着从腔单元之间的间隔中流出腔体外，通过热交换器回到风机。

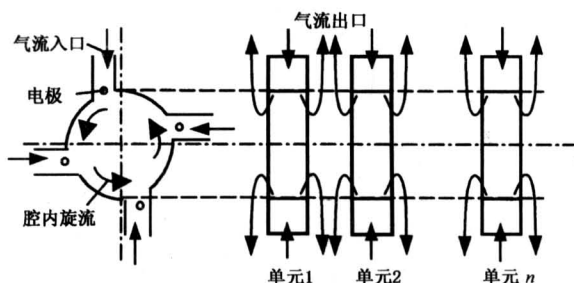


图1 圆形金属腔示意图

Fig.1 Schematic diagram of round metal resonator

3 圆形金属腔激光器的创新

3.1 圆形金属腔结构

横流激光器的腔体是平行针-板型，高功率扩散冷却激光器的腔体是平行平板形，轴快流激光器的腔体是圆形玻璃管。本项目采用圆形金属腔：腔体圆形有利于获得增益的轴对称分布；腔壁金属可以进行腔内对流换热，降低腔内温度和热气体阻力。全腔由多个腔单元组成，降低了对风机全压的要求，可采用小型风机，大大缩小激光器的体积。

3.2 多通道放电吹入

现有的横流、轴快流和板条激光器的放电都是在腔内发生和维持的，本激光器的每个腔单元有多个流道，放电在流道与腔体接口处产生，气流将放电及被其激活的粒子吹入腔内。多通道放电有利于提高注入功率和吹入放电的均匀性。

3.3 激活气体腔内旋流

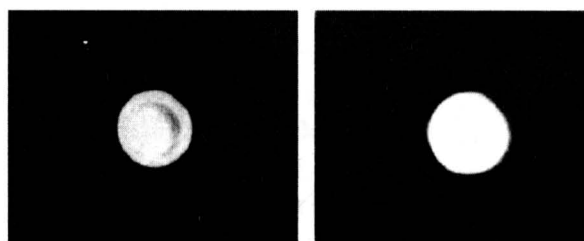
激活气体在腔内旋流可以提高腔内增益分布的轴对称性和金属腔壁的对流传热。同时气流从各腔单元的两端离心旋出，不是轴向冲出，有利于消除各相邻两腔单元流场的相互干扰，提高吹入放电的稳定性。

此三项创新技术不仅适用于百瓦级到万瓦级二氧化碳激光器，而且适用于一氧化碳激光器。

4 电极结构和腔内放电

每个腔单元有几个流道，气体通过流道将流道与腔体接口处产生的放电及被其激活的粒子吹入腔内。确定流道和电极结构要：**a.** 有利于将放电及被其激活的粒子吹入腔内；**b.** 有利于腔内形成旋流，使增益在腔内圆周分布均匀；**c.** 放电电压尽可能大，放电电流尽可能小，以减小阴极损耗在注入功率中的份额。除图1所示的四通道结构以外，还研究了双通道和单通道放电结构。实验表明：采用双通道结构能获得较好的腔内放电分布。

图2为一个腔单元的腔内吹入放电，腔单元具有两个放电通道。腔内放电呈圆弧状，是由腔内的旋流引起的。当电流升高时，呈圆弧状的阴暗区逐渐消失，腔内增益圆周和径向分布的均匀性提高。



a 放电电流较小时

b 放电电流较大时

图2 一个腔单元的腔内吹入放电

Fig.2 The blown-in discharge of one resonator unit

5 金属腔壁对放电气体升温的影响

放电气体的升温可按下式计算：

$$\Delta T = \frac{0.24[P(1-\eta) - S_m P_m]}{\rho C_p S v} \quad (1)$$

式中， S 为流道总截面积； v 为流速； C_p 为定压比热； ρ 为工作气体比重； P 为放电注入功率； η 为电光转换效率； P_m 为金属腔单位内表面因对流所传输的功率； S_m 为腔内有效金属表面积。

CO_2 激光器的腔内工作温度宜在 400 K 以下。为了保证这个温度，当腔壁为玻璃时，换热完全靠腔外的热交换器进行；当腔壁为金属时，腔外对流换热为主，腔内对流换热为辅。根据激光器的具体参数，利用式(1)计算的结果表明：腔壁为金属时所需要风速只是腔壁为玻璃时的 60%，金属腔激光器的风机及其整体体积要小得多。

6 圆形金属腔的增益特性

本激光器的特点是多通道横流放电激励和旋流

振荡放大相结合,因此可采用先计算横流放电通道内的增益分布^[2],然后计算激发粒子随气流的旋转运动和随时间的变化,从而获得圆形激光腔内增益的空间分布及其与激光器工作条件的关系。

6.1 放电通道内的增益计算

对横流 CO₂ 激光器的增益特性从理论上作定量分析,已有较多的数值计算模型。由于采用横流柱-板放电结构,粒子在放电区的滞留时间远小于扩散时间,因此轴向变化远不如流向变化重要,故可用一维模型来描述通道内的系统。

采用五能级模型,它由描述一维运动的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、气体状态方程和电子能量守恒方程组成,并考虑 CO₂ 激光器中几个重要反应过程,可得出以下方程组:

$$\frac{dT}{dX} = (P_E - GI)/A \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dX} = \frac{Kv}{KT - Mv^2} \frac{dT}{dX} \quad (3)$$

$$\frac{dN}{dX} = -\frac{N}{KT} \left(Mv \frac{dv}{dX} + K \frac{dT}{dX} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dn_3}{dX} = \frac{n_3}{N} \frac{dN}{dX} + \frac{1}{v} (n_e n_4 k_{43}^e - n_e n_3 k_{34}^e + n_2 n_4 k_{23} - n_0 n_3 k_{32}) \quad (5)$$

$$\frac{dn_2}{dX} = \frac{n_2}{N} \frac{dN}{dX} + \frac{1}{v} (n_e n_0 k_{02}^e - n_2 n k_{21n} - n_2 n_4 k_{23} + n_0 n_3 k_{32} - \frac{GI}{h\gamma}) \quad (6)$$

$$\frac{dn_1}{dX} = \frac{n_1}{N} \frac{dN}{dX} + \frac{1}{v} [f_{010} + f_{100} + f_{020}) n_e n_0 k_{01}^e + n_2 n k_{21n} + f_{010} (n_0 n k_{01n} - n_1 n k_{10n}) + \frac{GI}{h\gamma}] \quad (7)$$

$$\frac{dG}{dX} = \frac{G}{N} \frac{dN}{dX} + \frac{1}{v} h\gamma (f_{001} B_{21} \frac{dn_2}{dX} - f_{100} B_{12} \frac{dn_1}{dX}) \quad (8)$$

式中, X 为流线上的距离; G 为小信号增益; I 为小信号辐射强度; M 为平均气体分子质量; N 为混合气体分子密度, n 为中性粒子数密度; n_0 、 n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 为各能级粒子数密度; 各 f 值为激光各能级粒子数占 $(n_1 + n_2)$ 的归一化百分比; B_{12} 和 B_{21} 为受激吸收和受激辐射系数^[3]。

求解式 (2) ~ (8), 可以得出流线上的增益分布和流道与腔体交界处的增益, 为计算激光腔内的增益分布提供边界条件。

6.2 部分激光腔内的增益计算

激光腔内气体流动是一个轴对称问题, 故采用

了圆柱坐标系 (r, θ, Z) 。由激光腔内气体三维流动的质量平衡方程式和动量平衡方程式可得到:

$$\begin{aligned} \frac{U_\theta^2}{r} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \\ U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_\theta}{\partial Z} + \frac{U_r U_\theta}{r} &= \\ \mu \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{\mu}{r^2} U_\theta - U_\theta, & \\ \frac{\partial U_z}{\partial Z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (U_r r) &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

式中, U_r 、 U_θ 和 U_z 为径向、切向和轴向分速度; μ 为气体粘度。

计算可得到三维流场中的每一个节点上的速度 $U_{r(i,j,k)}$ 、 $U_{\theta(i,j,k)}$ 、 $U_{z(i,j,k)}$, 再用差值判断法求出流场中通过所有节点的流线族, 从而求得所有微元从流道与激光腔交界处流到腔内可能经过的每一节点的时间。激光腔内的小信号增益随时间的衰变可由下面的方程组给出:

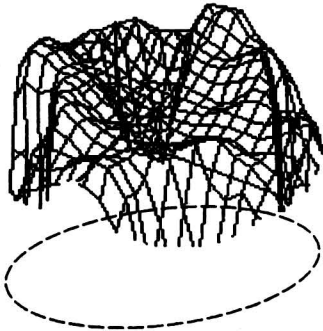
$$\begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} &= n_e n_4 k_{43}^e - n_e n_3 k_{34}^e + n_2 n_4 k_{23} - n_0 n_3 k_{32} \\ \frac{dn_2}{dt} &= n_e n_0 k_{02}^e - n_2 n k_{21n} - n_2 n_4 k_{23} + \\ & n_0 n_3 k_{32} - \frac{GI}{h\gamma} \\ \frac{dn_1}{dt} &= (f_{010} + f_{100} + f_{020}) n_e n_0 k_{01}^e + n_2 n k_{21n} + \\ & f_{010} (n_0 n k_{01n} - n_1 n k_{10n}) + \frac{GI}{h\gamma} \\ \frac{dG}{dt} &= h\gamma (f_{001} B_{21} \frac{dn_2}{dt} - f_{100} B_{12} \frac{dn_1}{dt}). \end{aligned} \quad (10)$$

由此得到增益在激光腔内每一个节点上的数值。然后在整个腔内对 Z 轴积分, 可求得增益在激光腔内的空间分布及其与激光工作参数的关系。

6.3 激光腔内的小信号增益分布

利用式 (2) ~ (10) 计算出的腔内增益分布示于图 3。可以看出激光腔内的小信号增益虽然是轴对称的, 但不是完全的圆周均匀分布, 这样会影响整个光束的质量。经过分析, 造成这一问题的主要原因是不同腔单元上的相应通道处于相同的方位上, 各个腔单元上增益分布的不均匀性不能得到互补。为解决这一问题, 提出了错位气体流入结构, 将每两个相邻的腔单元绕光腔轴错开一定的方位角, 则不同腔单元上的增益不均匀性可以得到互补, 总体体现为激光腔内小信号增益分布的圆周均

匀性提高。图4是在 15° 旋转角时计算得到的腔内增益分布，可见增益分布是圆周均匀的。这种增益分布结合适当的谐振腔，可以获得基模激光束。



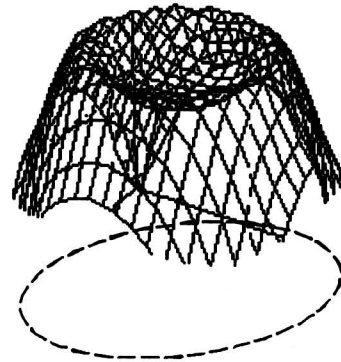
$T = 350 \text{ K}$, $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$, 气压 = 10 kPa,
 $V = 1\ 000 \text{ V}$, 气流速度 = 30 m/s

图3 激光腔内增益分布

Fig.3 Gain distribution in the resonator

7 小结

多通道放电吹入和腔内旋流，有利于腔内的均匀放电；金属腔壁有利于腔内对流冷却，降低对气流速度的要求，从而缩小风机和激光器的体积。相邻的腔单元相对转动适当角度，可以提高腔内增益分布的圆周均匀性，总的结果是可以获得光束质量好、体积小的激光器。



$T = 350 \text{ K}$, $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$, 气压 = 10 kPa,
 $V = 1\ 000 \text{ V}$, 气流速度 = 30 m/s

图4 改进后的激光腔内增益分布

Fig.4 Gain distribution in
the improved resonator

参考文献

- [1] Abramovich G N. 实用气体动力学 [M]. 莫斯科: 技术理论文献国家出版社, 1951
- [2] Akiba T, Nagai H, Hishii M. Gain characteristics of an atmospheric sealed CW CO_2 Laser [J]. J Quant Electr, 1979, QE15 (3): 162~170
- [3] McDaniel E W, Manson S T, Gallagher J W, et al. [R]. Technical Report H-78-1, 1978, 4: 1409~1504

The Round-metal-resonator CO_2 Laser with Spiral Flow

Li Zaiguang, Gong Wei

(State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of
Science and Technology (HUST), Wuhan 430074, China)

[Abstract] The transverse flow, coaxial flow and diffusion cooling are the current types of high power CO_2 laser for industrial applications. A new CO_2 laser is being developed. Its round resonator consists of a number of equally-spaced and coaxially-mounted metal cavity units. Each unit has several channels for gas flow and discharge. The discharge ignited at the interface of the flow channel and the cavity is blown into the cavity, where the particles are excited and gain forms. The electrode structure, metal wall action on the active medium cooling, and the gain distribution have been studied. It is shown that the multi-channel blown-in discharge, intercavity spiral flow and adjacent unit rotating certain angle facilitate the circular uniformity of gain distribution. As a result, a new CO_2 laser with high beam quality and compactness can be obtained.

[Key words] CO_2 laser; round-metal-resonator; spiral flow; beam quality