

2 千瓦横向流动闭合循环 CO₂ 激光器

王哲恩 苏宝榕 胡绍衣 陈可心 吴东来

奚全新 崔锦四 虞芷江 程兆谷

(中国科学院上海光机所)

提 要

本文报导了千瓦级横向流动闭合循环 CO₂ 激光器的组成,着重讨论了无弧光放电电极结构及放电特性。采用多针触发使较大放电电流时的辉光放电稳定性明显提高;主电源直流输出特性及限流电阻选择对放电稳定性及功率输出影响很大。

放电区气流速度 40 米/秒,工作气压 46 毫米汞柱,激活区长度 86 厘米,获得 2 千瓦连续多模输出,电光效率达 15%。

2KW transverse-flow closed-cycle CO₂ laser

Wang Zheen Su Baorong Hu Shaoyi Chen Kexin Wu Donglai

Xi Quanxin Cui Jinsi Yu Zhijiang Cheng Zhaogu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

The combination of a closed-cycle, transverse-flow 2KW CW CO₂ laser is described with emphasis on the arcless electrode construction and glow discharge characteristics. By means of a multi-pin trigger, the glow discharge stability is appreciably increased at more intense input current. The direct current output characteristics of the main supply and the selection of the ballast resistor greatly affect the glow discharge stability and the output power.

When the gas flow velocity in the discharge region is 40 m/s, the gas mixture pressure is 46 mmHg, the length of active region is 86 cm, a CW multimode output power of more than 2 KW and an electro-optic efficiency of about 15% are achieved.

一、器件组成和性能

横流 CO₂ 激光器外形如图 1。它由放电盒、鼓风机系统、热交换器及回流管道四个部分组成。放电盒呈矩形,其喉部(喉高 40 毫米)

为放电区和腔区,上游为收缩段,下游为扩压段。轴流式鼓风机置于真空系统内,由 400 周中频电机驱动。热交换器具有传热效率高、结构紧凑、轻巧牢固等优点。冷却能力约 10000 千卡/小时,冷却水流量 1500 公斤/小

收稿日期: 1979 年 10 月 12 日。

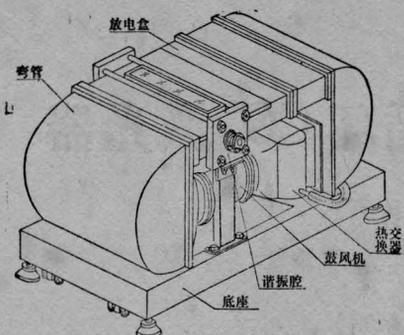


图1 横流 CO₂ 激光器外形

时。回流管道主要为两侧的半圆形弯管，将放电盒、热交换器、鼓风机连接成回流式风洞（外形尺寸1.25米×2.25米×1.25米）。采用“O”形橡皮圈密封，真空度可达 10^{-1} 毫米汞柱。激光器容积约1米³，体积流量1.3米³/秒，工作气压46毫米汞柱，气体比份CO₂:N₂:He为1:7:14.5，质量流率 \dot{m} 为43克/秒。采用毕托管测量流速。

共振腔采用单程腔，腔长1.25米，窗口为镀膜GaAs平板，透过率约20%；反射镜为 $\phi 70$ 石英基底镀金镜，曲率半径2.2米。

直流电源最大功率50千瓦，当输入电流12安培左右，可获得2千瓦多模输出，出口光斑如图2所示。

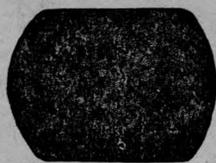


图2 2千瓦时的出口光斑

二、电极结构

电极结构如图3所示^[1]。阴极处于气流上游，靠近放电盒喉部上方，阳极置于阴极下游，嵌入放电盒下壁与下壁成一平面。阴极铜管的后沿对准阳极条的前沿。在阴极上游均布一组触发针。具体参数如下：

管状阴极 $\phi 10$ 水冷抛光铜管

条状阳极 45只铜条，每只宽15毫米，

长40毫米，铜条之间电绝缘，间隔4毫米。

触发电极 $\phi 1$ 铜丝，置于阴极上游偏下5~6毫米，沿阴极均布

限流电阻 每只条状阳极分别串接适当限流电阻 $R_{分}$ ，并串接公共电阻 $R_{总}$

主电流 $I_{主}$ （2千瓦输出时）12安培

工作电压（气压46毫米汞柱）1200伏

触发电流（总和）100毫安

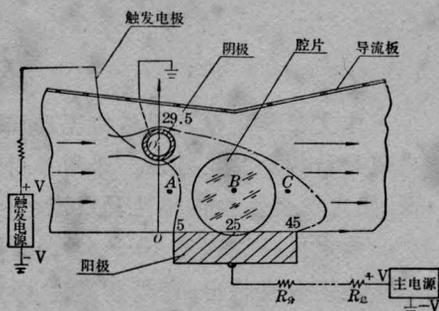


图3 电极结构

实验表明，管状阴极的直径对于弧光的形成， E/P 值大小，从而对功率输出有较大影响。由于导体附近（阴极位降区）电场强度强烈地依赖于半径 r ^[2]， r 愈小，导体附近场强愈高，对维持稳定放电和减少气阻是有利的，但同时要考虑有一定的阴极发射面积以保证电功率注入。阳极条尺寸应与谐振腔匹配。填料间隔选择综合了气体扩散效应和发热效应^[3]。

阴、阳极间距应仔细选定，太低对功率输出不利，太高对放电稳定性有害。我们的实验结果是二者间距29.5毫米为佳（见图3）。

三、放电与输出特性

1. 直流电源输出波形的影响

如果直流电源输出波形中含有较大的交流成分，这就意味着除直流激励外，还存在一定分量不断改变压降大小的交流激励，对于放电稳定性和电光效率都是有影响的，并在激光输出上明显反映出来。例如主电源采用

表 1 $R_{总}$ 对放电稳定性和输出功率的影响
($I_{主}=9$ 安培, $I_{触}=110$ 毫安, 工作气压为 46 毫米汞柱)

| $R_{总}$ (欧姆) | 0 | 95 | 130 | 180 | 240 | 260 | 300 |
|--------------|-----------|----------|----------|--------|-------|-------|-------|
| P_L (瓦) | 30 | 1460 | 1590 | 1700 | 1760 | 1760 | 1736 |
| 放电稳定性 | 放电极不稳, 无弧 | 放电不稳, 有弧 | 放电稍稳, 有弧 | 较稳, 无弧 | 稳, 无弧 | 稳, 无弧 | 稳, 无弧 |

半波整流和全波整流两种情况, 同样输入 5 安培电流时, 前者输出功率为 600 瓦, 后者则为 800 瓦。

消除直流电源的交流分量, 提高电源的稳定性和增大电源功率输出, 对于提高激光功率有重要的意义。

2. 限流电阻对于放电、输出功率和效率的影响

要使每个阳极能同时起辉, 须加一定阻值 (600 欧姆) 的分电阻, 整个主电源回路还串接了公共限流电阻 $R_{总}$ 。实验表明, $R_{总}$ 的大小对放电稳定性和激光输出影响较大, 这种影响, 随着电流增大愈加明显。为了使大电流情况下的放电稳定, $R_{总}$ 应不小于 250 欧姆 (见表 1)。

3. 触发电流的影响

触发电极置于阴极上游。工作气压为 40 毫米汞柱时, 不加触发, 主电源的击穿电压为 2.4 千伏, 加微量触发, 击穿电压降至 1.1 千伏 (近似为维持电压)。当气压增至 46 毫米汞柱时, 不加触发难于起辉。

我们采用多针触发, 由外加触发直流电源激励, 触发电流一般在 100 毫安左右, 从而使较大主放电电流 (10 安培以上) 情况下的放电稳定性大为提高。

有趣的是, 在主电源输出直流波形较好时, 触发电流大小对激光功率影响不明显; 在主电源输出直流波形较差时, 影响十分显著 (见图 5)。我们考虑, 主要是前者主电源输出波型较好, 后者脉动较大, 造成放电不稳定, 但较大的触发形成的电子流补偿了这个影响。

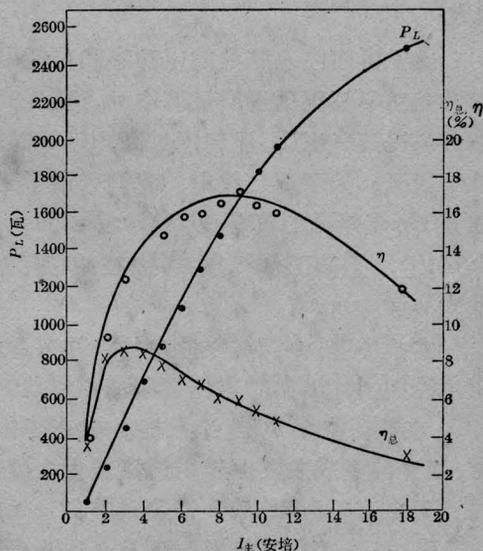


图 4 当 $I_{触}=100$ 毫安时, 输出功率 P_L 、光效率 η 及总效率 $\eta_{总}$ 随主电流 $I_{主}$ 的变化

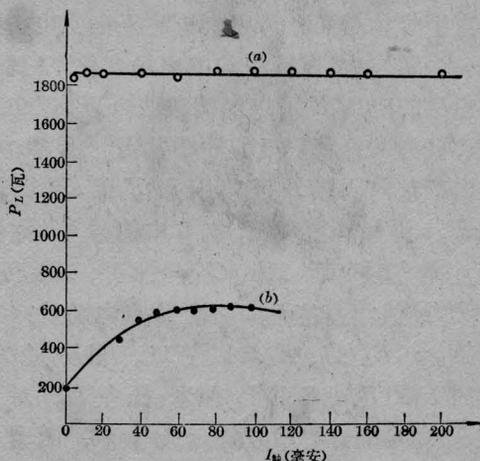


图 5 触发电流 $I_{触}$ 的大小对激光输出功率 P_L 的影响

- (a) 主电源输出波型较好, 激活长度 86 厘米
 $I_{主}=9.5$ 安培, $P=46$ 托;
- (b) 主电源输出波型差, 激活长度 74 厘米
 $I_{主}=5$ 安培, $P=35$ 托

表 2 激光功率 P_L 、放电稳定性与气压 P 的关系

($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:7:14.5$; $I_{\text{触}}=100$ 毫安; $R_{\text{总}}=400$ 欧姆; $R_{\text{分}}=600$ 欧姆; $I_{\pm}=10.5$ 安培)

| | | | | | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 气压 P (毫米汞柱) | 47.7 | 47 | 46 | 44 | 42 | 40 | 35 | 30 | 20 |
| P_L (瓦) | 2090 | 2073 | 2040 | 2023 | 1854 | 1686 | 1484 | 1230 | 674 |
| 有无弧光 | 易起弧 | 无弧 | 无弧 | 无弧 | 无弧 | 无弧 | 无弧 | 有弧 | 有弧 |

4. 工作气压与放电稳定性、输出功率的关系

由于可能注入腔内的电功率和可能取出的激光功率都正比于质量流率 m ，要提高功率必须提高气压 P ，但气压过高，难于起辉，易于起弧。为了改进放电，我们采用了适当加大 He 气组分的气分比 ($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:7:14.5$)，并使工作气压维持在 46 毫米汞柱。

实验表明，在无弧光放电的条件下，输入主电流相同，输出功率随气压增加而线性增加。在气压降至 30 毫米汞柱、20 毫米汞柱时，弧光的生成主要由于质量流量大大降低，而注入电流仍为 10.5 安培造成的。

5. 电场不均匀性引起的局部增益变化，腔区位置及窗口透过的选择

由于导体表面是等位面，各点场强 E 都垂直于导体表面；考虑到等离子区的电荷密度 ρ 为零，忽略风速引起的电场变化^[2]，辉光放电区的电场 E 可以用镜象法^[4] 近似，电流源可视为从管状阴极的轴心发出。显然，正负电荷都向阴极 D 区和阳极 F 区 (见图 3) 积聚。近似计算表明，图 3 中的 A (坐标 5, 15)、 B (坐标 25, 15)、 C (坐标 45, 15) 三点的 E/P 值相差甚大，如设 A 点电场为 E_A ，则 $E_B \approx 3E_A/11$ ， $E_C \approx 1E_A/11$ 。很易求出 A 点的 E/P 值为 8.7 伏/厘米·托左右，对于 N_2 和 CO_2 的选择激发接近最佳值，而 B 点 (大约为谐振腔轴心位置) 及下游边缘的 C 点 E/P 值大为降低，电流密度 n_0 也相应下降，从而使增益下降。另一方面， CO_2 分子上能级的弛豫时间为 1 毫秒左右^[5]，放电区气流速度为 4×10^3 厘米/秒，因而部分未参与受

激发射的上能级分子可随气流向其下游漂移 4 厘米，使辉光放电区的下游直至下游的边缘之外都有增益分布，但是由于分子热扩散效应可达到处于辉光区上游的腔区，对激光输出产生贡献。尽管由此引起增益非均匀分布，但由于增益随光强增加而减少 (饱和效应)，而且由于谐振腔 (如半共焦腔) 的反演^[6] 作用，所以输出光束仍旧比较均匀 (见图 2)。

我们采用了单程谐振腔输出激光功率。实验表明，谐振腔轴线的高低位置应置于管状阴极的轴线与底面连线 $O'O$ (见图 3) 的中点或稍偏下接近阳极，谐振腔轴的水平位置应置于阳极条的中心位置或偏上游 3 毫米左右为最好。前者输出光斑水平尺寸较长。图 4 所得结果是在腔区偏上游 3 毫米得到的，出口光斑如图 2 所示。

横流 CO_2 激光器尽管可获得较高的功率输出，但与扩散型纵向放电 CO_2 激光器相比，增益系数并不高，而只是饱和参量特别大^[7]，尤其采用单程腔时，窗口的透过率不宜过高，在我们的实验中，透过率为 20% 左右较好。

参 考 文 献

- [1] Theodors S. Fahlen; *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**(1975), 848.
- [2] П. И. Беломестнов и др.; «Газовые лазеры», Новосибирск, «Наука», 1977.
- [3] A. E. Hill; *AIAA Paper*, No. 71-65.
- [4] 曹昌祺; «电动力学», 1962 年版, p87.
- [5] Russell Targ et al.; *Appl. Phys. Lett.*, **9**(1965), 302.
- [6] 朱如曾, 封开印编译, «激光物理», 1975 年版, p57.
- [7] 秋业稔光 (ほく); «レーザー研究», 1976, **4**, No. 3, 242~248.