

万瓦连续 CO₂ 激光器的放电稳定性和某些工作特性的研究

李家镛 王汉生 邬鹤清 陈福初 杨 扬 李 锋 程祖海 姚 伟 李再光
(华中理工大学激光研究所, 430074)

摘要: 本文论述了一台万瓦连续 CO₂ 激光器的放电稳定性和某些工作特性。
关键词: 放电稳定性, 工作特性

Study on discharge stability and some operational characteristics of 10kW level CW CO₂ lasers

Li Jiarong, Wang Hansheng, Wu Heqing, Chen Fuchu, Yang Yang, Li Feng, Chen Zhuhai, Yao Wei, Li Zaiguang
(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Abstract: In this paper, discharge stability and some operational characteristics of the 10 kW CW CO₂ laser are described.

Key words: discharge stability, operational characteristics

一、引 言

要使 CO₂ 激光器的激光输出功率达到 10 kW 以上, 首先必须确定合理的电极结构和放电方式, 以达到实现大体积、均匀而稳定的辉光放电。到目前为止, 不外乎如下几种放电方式: 1) 电子束维持放电; 2) 脉冲维持放电; 3) 无声放电预电离放电。上述放电方式都要具备相应的电极结构, 确保注入足够的电功率。而比功率即单位放电体积注入的电功率是衡量放电方式, 放电结构优劣的重要指标之一。同时比功率还与放电参量、工作气压、气体流速及流动状态等均有很大关系。本文报道的万瓦连续 CO₂ 激光器采用了本身具有预电离作用的多排针对平板的放电结构和直流自持放电的方式。在放电长度为 220 cm、极间距离为 4 cm、沿气流方向为 3 cm 的放电体积内, 获得 80 kW 电功率的注入能力。比功率达到 30 W/cm³ 以上, 接近目前射频激励的注入水平。

输出窗口是激光器获取激光的重要光学元件之一。目前国外采用晶体输出窗口的万瓦级激光器, 其输出窗口多采用 ZnSe 或 KCl。由于对 GaAs 输出窗口在破坏机理、镀膜技术、冷

却技术和光学畸变等方面的研究取得进展,所以在国内首次运用国产 GaAs 晶体窗口获得万瓦以上的激光输出。电光转换效率达 17.2%。

二、电极结构

合理的放电结构是保证放电稳定性的重要条件之一。为获得大体积、均匀而稳定的辉光放电,我们采用多排针对平板的电极结构。如图 1 所示。

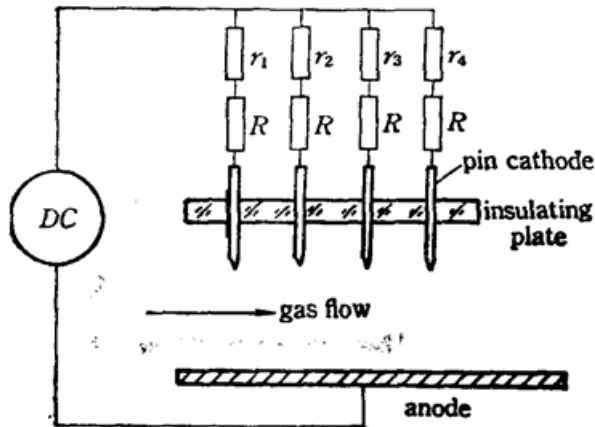


Fig. 1 Sectional view of electrode configuration

Toshimitsu Akiba 等人采用单排针对平板的放电结构,进行了 0.5 kW 至 1.5 kW 的高气压全封闭连续 CO₂ 激光器的研究,并认为采用多排针对平板的放电要获得稳定放电是很困难的。其理由在于前排针对后排针的放电产生影响,因而就形成增加放电针排数与放电稳定性之间的矛盾。但是通过试验研究,我们认为对于多排针对平板放电,各排的放电电流务必有一个合理的电流分布。对于这一点,我们是通过调节每一排的镇流电阻来实现的。

当各排针的电流分布确定之后,各排针之间的电压分布即电位梯度也就相应一定了。电位梯度是确定针排之间距离的重要依据。同时为了消除针排与针排之间的影响,我们采取了相邻针排之间的针依次交替排列。我们采用图 1 所示的结构,其总放电长度为 220 cm,共设 4 排针。每排针数为 200 棵。排间距离为 1 cm。800 棵针装配在绝缘强度很高的电极板上,以确保工作的可靠性。在每棵针上都串接一镇流电阻 R ,为调节电流(位)分布,各排分别串接排镇流电阻 r_1, r_2, r_3, r_4 ,使其电流(位)分布在一定的范围内。

三、放电稳定性

通过试验研究,我们认为实现多排针对平板的稳定放电,获得较高的比功率,必须具备两

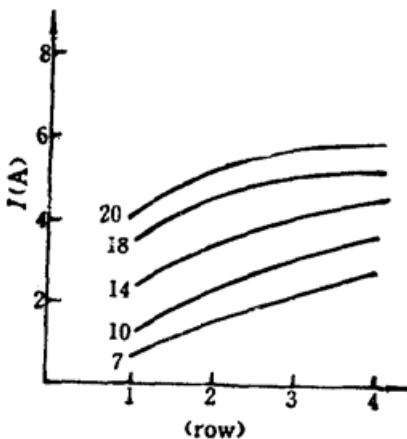


Fig. 2 Current distribution

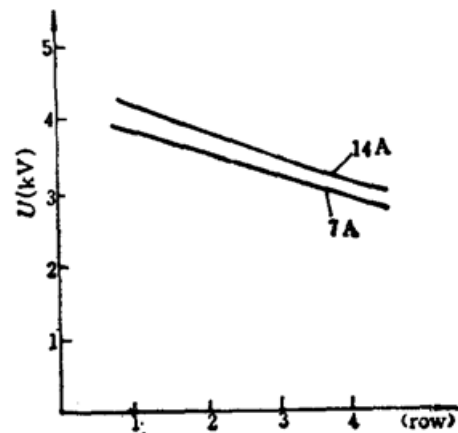


Fig. 3 Potential distribution

个主要条件: 1) 合理的电流(位)分布; 2) 工作气体一定的流速及阴极区域一定的气流状态。

图 2 表示万瓦连续 CO₂ 激光器, 在工作气压为 90 Torr, 气比为 CO₂: N₂: He 为 1:8:20 时, 调整排电阻 r 所确定的电流分布。从图 2 中可看出后排的放电电流相继比前排的放电电流大。由此可见前排针对后排针存在有预电离作用, 并且随着排数的增加而越来越强。图 3 所示为总放电电流为 7 A, 14 A 时, 各针排的电位分布。从图中曲线可看出, 阴极对阳极的电位随针排数的增加呈线性降低。其电位梯度 $|\Delta U/\Delta X| = 800/3 = 266 \text{ V/cm}$ 。这是由于前排针对后排针的预电离作用以及工作气体温度升高, 使其 E/n 值下降所形成的结果。当工作气压为 90 Torr, 气比为 CO₂: N₂: He = 1:8:20 时, 极间起辉电压为 3.4 kV, 放电场强为 $3.4 \times 10^3/4 = 850 \text{ V/cm}$ 。针排间电位梯度与放电场强相比, 可得知针排间电位梯度约为放电场强的 1/3, 因而在放电过程中不致于因排与排之间的电气绝缘强度不够而使放电电流发生转移引起局部针电流过大导致弧光放电。

我们在激光器 220 cm 长的放电区内, 用两台高速轴流风机, 向放电通道提供 90 m/s 的工作气流, 流速不均匀度控制在 3% 以内。为了改善针阴极区工作气体的流动状态, 我们在放电区的入口段加设了导流器, 使得在阴极区形成强烈的湍流而有利于阴极的散热。

从图 4 可以看到, 由于在放电区入口段加设了导流器, 阴极附近所形成的湍流强化了阴极的冷却条件, 从而有效地阻止了热游离的进行。使得在相同的注入电流的情况下, 放电电压增高。这样就比没加导流器时的注入电功率提高了约 25% 左右。

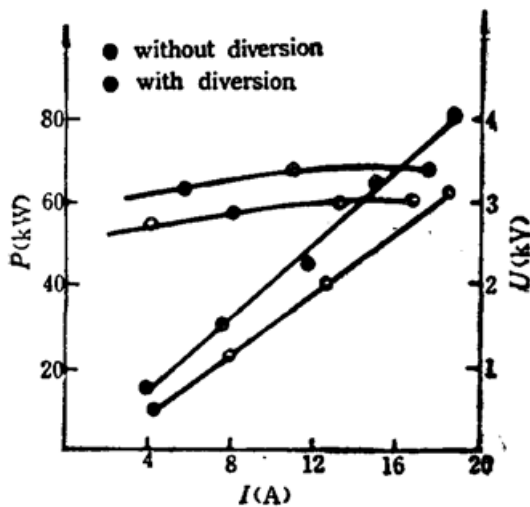


Fig. 4 Effect of gas swift flow on the input power

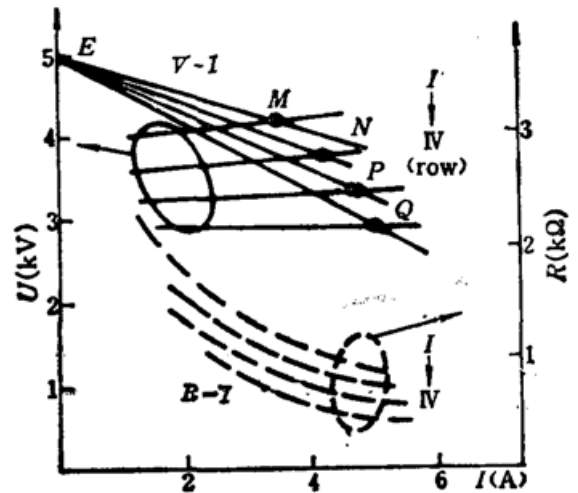


Fig. 5 $V-I$, $R-I$ discharge characteristic

图 5 描述了万瓦 CO₂ 激光器在工作气压为 90 Torr, 气比为 CO₂: N₂: He = 1:8:20 时, 放电的 $U-I$ 、 $R-I$ 的特性曲线。从这两组曲线可以看到 $U-I$ 曲线(图中实线表示部份)基本上为一直线, 随着针排的增加, $U-I$ 曲线的斜率 dI/dU 越来越大。从 $R-I$ 曲线(图中虚线表示部份)可看出, 随着放电电流的增加, 气体阻抗几乎按指数规律减少。直线 EM , EN , EP , EQ 是在总放电电流为 19 A 时各排针的负载线。它们的斜率是各不相同的, 但它们分别与相应针排的 $U-I$ 曲线的夹角基本上是相等的, 即各排针对电压或电流的调节率几乎是相等的。这就为获得大体积、均匀而稳定的辉光放电创造了有利条件。在放电体积为 2640 cm^3 的情况下, 注入电功率为 80 kW。比功率达 30 W/cm^3 。

四、光腔系统与工作特性

光腔系统由有关的光学元件和光桥组成。全反镜和输出镜安装在具有一定刚性和热稳定性的“Π”型光桥两端，构成凹凹稳定腔。全反镜的曲率半径为 12 m。输出镜的曲率半径为 15 m，并分别配有以光桥为基准的调节机构，运转时一次调准即可。

输出镜是光腔系统的关键元件。我们采用的是 GaAs 晶体材料，经光学加工和真空镀膜而成。有效通光口径为 45 mm。根据小信号增益及饱和参量，当工作气压为 90 Torr，气比为 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:8:20$ ，激光输出功率为 10 kW 时，输出镜的最佳透射率为 45%。这时输出镜位于腔内的增反膜承受的总光强达 20 kW 以上，功率密度达 1260 W/cm^2 。大量的试验表明，输出镜吸收过热是引起镜片炸裂的主要原因，而过热又主要来源于增反膜的吸收，并且随膜层的厚度增加而加剧。为此，我们采用非 1/4 波长膜系镀膜技术，使得在相同透过率的情况下，膜层的厚度仅为 1/4 波长膜系的 1/3，从而使增反膜的热吸收大为减少。

改善输出镜在运行时的工作条件也是提高输出镜破坏阈值的重要途径。输出镜在工作过程中，它的外沿部份散热条件好，而中间部份散热条件差，形成一定的温度梯度。因此加强对输出窗片两面，特别是腔内表面的冷却是非常重要的。减少输出镜中心到边缘的温度梯度，对避免由此而引起的热应力过大导致镜片炸裂以及改善光束聚焦特性都是有益的。但是在高功率激光输出的情况下，在输出镜上存在一定的温度梯度和热透镜效应是不可避免的。根据输出镜材料的折射率和吸收系数，应用热传导方程可得知在 10 kW 激光功率输出时，输出镜的曲率半径为 15 m，这时可消除因热透镜效应引起输出光束的聚焦现象。图 6 为激光输出功率 10 kW 时，距离输出镜 3 m 处的光斑图像。光斑的直径在 43 mm 至 47 mm 之间。热透镜效应得到较好的补偿。



Fig. 6 Facula at output power of 10 kW

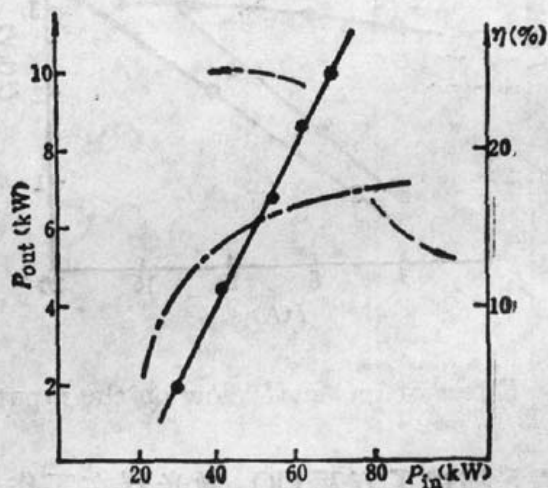


Fig. 7 Laser power and efficiency versus input power

图 7 是在工作气压为 90 Torr，气体混合比为 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:7:20$ 时采用上述光腔系统的工作特性曲线。可以看出，输出的激光功率随注入的电功率呈线性增加。而光电转换效率随注入电功率呈非线性增加，开始一段增加较快，以后逐渐趋近饱和。激光器全封闭连续运行 6 小时，平均激光输出功率 10.6 kW；平均电光转换效率达 16.9%；最大输出激光功率可达 13 kW。

五、结 论

1) 采用多针对平板的放电结构,在无需外加预电离的情况下实现了大体积、均匀稳定的辉光放电。有效放电体积为 2640 cm³,可注入电功率为 80 kW。比功率达 30 W/cm³。

2) 放电区工作气流的均匀性以及阴极区形成一定的湍流状态对保证放电的均匀性和稳定性,提高电功率的注入能力是有利的。

3) 非 1/4 波长镀膜膜系在国产 GaAs 材料的输出镜上的应用使得相同透过率的条件下,膜层的热吸收大大降低。在有效通光口径为 45 mm 时,获得 1 万瓦以上的激光输出。

4) 在输出高功率激光时,由于晶体输出镜膜层和基材的热吸收产生了径向温度梯度,导致热透镜效应使激光束在传输方向上发生畸变。采用凹面输出镜后,上述畸变可得到补偿。

参 考 文 献

- 1 D. B. Rensch, *Appl. Opt.*, **13**, 2546(1974)
- 2 T. Akiba, M. Hishil, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-15**, 162~170(1984)
- 3 N. Tabata, H. Naqai, *Inst. Phys. conf. Ser No72*, pp87~91, 1984
- 4 Haruhiko Nagal *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-18**, 416~421(1982)