

千瓦级快轴流 CO₂ 激光器的射频系统

杨小康 王兆申 王 坚

(中科院等离子体物理所, 合肥, 230031)

摘要: 在千瓦级快轴流 CO₂ 激光器中, 我们用单个射频源通过 50Ω 传输线和 π 型网络给 8 段光管馈电, 在这样的安排下将 15kW 连续波射频功率有效并均匀地耦合到 8 段光管的等离子体中。这种技术的关键是阻抗匹配。

关键词: 射频激励 快轴流 CO₂ 激光器

RF system of a 1kW level fast axial flow CO₂ laser

Yang Xiaokang, Wang Zhaoshen, Wang Jian

(Institute of Plasma Physics, Academia Science)

Abstract: In our RF-excited 1kW level fast axial flow CO₂ laser, 8 laser discharge tubes are driven by a single RF power source through a 50Ω transmission line and a π-type matching networks. With this arrangement total 15kW continuous wave RF power has been effectively and uniformly coupled to discharge plasma within 8 tubes. The key task of this technique is RF impedance matching.

Key words: RF-excited fast axial flow CO₂ laser

一、引 言

气体均匀、稳定地进行辉光放电是激光输出的前提, 提高气体放电的注入功率密度和工作气压, 是进一步发展工业用高功率 CO₂ 激光器的关键。传统的直流激励 CO₂ 激光器, 由于其放电特性决定了它必然存在以下三方面的问题: 1. 尽管采用快速流动使气体处于湍流状态, 放电性能有极大改善, 但当注入功率密度超过 $12\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时, 放电不稳定; 2. 直流放电激光器不能方便地实现连续-脉冲方式的转换, 特别是脉冲占空比的改变; 3. 直流放电中不能省去镇流电阻, 能量损耗大, 整机效率低。

近年来发展起来的 RF 激励 CO₂ 激光器由于在以上几方面大大优于直流激励技术^[1], 自 80 年代中期实现商品化以来, 越来越受到世人瞩目。大功率 RF 激励快轴流 CO₂ 激光器的

• 本项目由大恒公司资助。

RF 激励是采用分段的光管和电极,其馈电方式关系到激励的均匀性、RF 匹配调试的难易以及 RF 传输的效率,是一个十分关键的问题。国外新近发展起来的这类激光器,各段配备各自的激励源,使调整激励十分方便,但 RF 系统十分复杂^[2]。我们采用单源并行的馈电方式,获得了 8 段光管的均匀 RF 激励。本文介绍了我们研制成功的千瓦级 RF 激励快轴流 CO₂ 激光器的 RF 系统,射频源输出功率 0~15kW 可调,能以脉冲/连续波方式工作,激光器最大输出功率 1100W,模式为 TE₁₀ 模,气流速度约 200m/s。并给出了激励实验结果。

二、RF 系 统

激光器的 RF 系统由并行馈线、阻抗调配器、发射机、传输/监测等四部分组成。

1. 并行馈线

电极馈电系统如图 1 所示,为单源并行馈电方式,采用了全对称结构,使得对于馈入点 A 而言,8 对电极上的电压对称分布,以保证各放电管激励的一致性。此外,由于容性负载固有的对放电不稳定性的抑制作用,即使在放电参数不合适出现局部放电不稳定的情况下,系统全局仍是稳定的。这一结构与国外单源单管结构相比,不但成本低,调整方便,还避免了放电管之间交叉耦合导致的光功率波动^[3]。

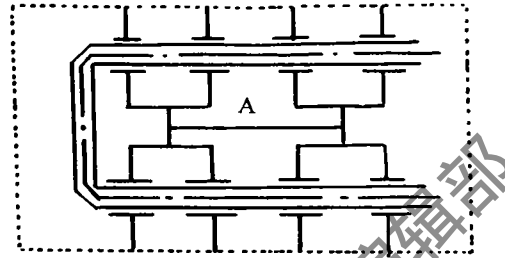


Fig. 1 Structure of parallel electrode system

2. 阻抗调配器

采用图 2 所示 π 型 LC 网络结构来实现 RF 系统的阻抗匹配,其中 C_1, C_2 为可调电容。为了减小匹配网络损耗,传输线阻抗变换段要尽可能短。根据共轭匹配原理选择 π 网络参数,使激光头的 RF 输入阻抗进入此网络的可调阻抗范围。本系统 π 网络参数选择为: $C_{1max} = 1500\text{pF}$, $C_{2max} = 500\text{pF}$ 连续可调, $L = 2\mu\text{H}$ 。

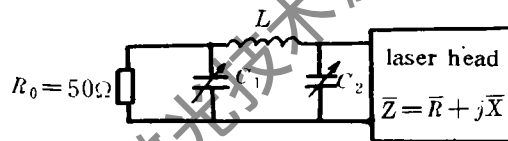


Fig. 2 Structure of π -type network

3. RF 发射机

RF 发射机采用主振放大工作方式,图 3 给出了整机框图。RF 发射机的工作频率为 13.56MHz,能以脉冲/连续方式工作,最大输出功率 15kW。

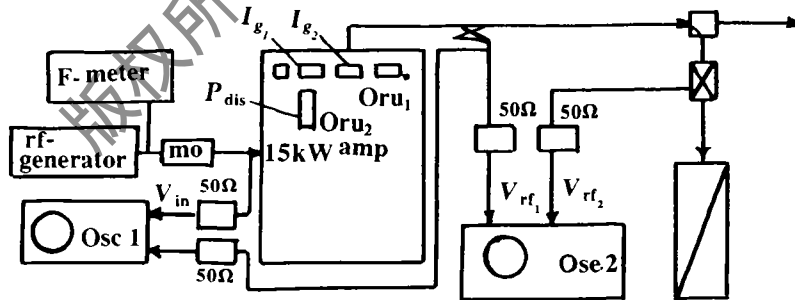


Fig. 3 Schematic diagram of RF generator

4. RF 传输/监测系统

由 50Ω 同轴线组成传输系统,用同轴定向耦合监测入射、反射波,RF 电压探针监测电极高频电压。

三、RF 激励实验

1. 均匀辉光放电实验

RF 电极的形状和相对位置影响 RF 场的场强分布,从而影响放电的均匀性。本系统的电极为圆弧面的电极,如图 4 所示,其中, D_R 为放电管外径, D_G 为放电管厚度, B_E 为电极管度, R_E 为电极曲率半径, A_E 为电极与放电管间的距离。忽略等离子体电导率,电极间的电场可以通过求解泊松方程得到,图 5 为放电管中无等离子体时电场分布的四分之一部分图。从图中可知,放电管中的电场分布是很不均匀的。此外,由于气体被加热及气流与放电管壁的摩擦力,使得放电管中的气体密度沿气流方向减小,所以,为了保证沿电场方向及光轴方向上辉光放电的均匀性,电极的宽度、曲率半径要合理设计,电极间的距离要适当调整,以优化每段放电管中的 E/N 分布(E 为电场强度, N 为气体密度),增大等离子体的电导率和电子的扩散过程,从而减小径向电场分布的不均匀性,使放电等离子体均匀地充满放电管中。

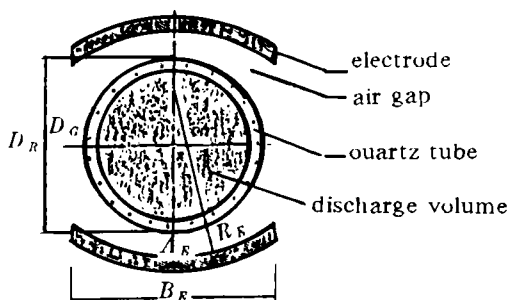


Fig. 4 Structure of electrode

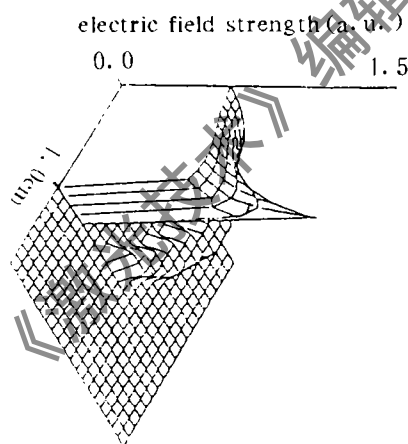


Fig. 5 Electric field strength in the discharge tube without plasma

实验结果表明,放电的均匀性除与电极和电极馈电系统有关外,还与充气压强、气体成分比、RF 注入功率及气流速度等激光器运行参数有关。如实验中发现,增大 He 的比例可极大地改善放电的均匀性和稳定性,但激光功率将有所下降。因此,实验参数要适当选择。本激光器运行的最佳条件为:

气体成分比 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=5:15:97.6$; 静气压 100mbar; 补气速率约 100L/h; 进气温度 $< 30^\circ\text{C}$; 放电管尺寸长 25cm, 内径 20mm。

2. 阻抗调配实验

负载阻抗调配的目的是要消除不匹配负载而造成的 RF 功率反射,使激光头获得最大有效功率。由于高功率 RF 激励下激光头的输入阻抗是未知的,此外调配过程中的严重失配会导致发射机过载而损失,所以如何在高功率下确定 π 网络参数并确保系统安全是高功率调配的核心问题。

由于激光头负载在 RF 激励前后等效阻抗值相差较大,且是放电等离子体参数的函数,所以阻抗调配实验中我们采用了逐步逼近的方法,分二步进行:

版权所有 © 《激光技术》编辑部