

射频激励 CO₂ 激光器的阻抗匹配及调制的实验研究

陈声鸿 毛玉周 张 刚 赵燕平

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

提要 论述了射频(RF)激励气体放电所必须的在 RF 源与激光头放电气体之间的阻抗匹配器的工作原理及其实验,并依据研制成功的千瓦级 RF 激励快轴流 CO₂ 激光器的实际参数,论证了气体放电阻抗的计算、动态阻抗调配及 RF 泵浦调制的激光实验。

关键词 射频激励,阻抗匹配,调制

1 引 言

射频(RF)激励的气体激光器近年来所获得的迅速发展显示了 RF 激励技术正日益受到重视,说明它是一种既能消除直流激励放电所具有的各种缺陷又能实现激光器良好运行状态的放电激励方法。在现今大功率 CO₂ 激光器的发展中,RF 激励已逐步取代了传统的直流激励技术,成为大功率 CO₂ 激光器当今发展的主流。随着 RF 激励的波导 CO₂ 激光器及 RF 激励“面积放大”型扩散冷却 CO₂ 激光器的研究和开发,RF 激励技术也在中小功率 CO₂ 激光器上得到日益广泛的应用。

射频激励气体放电通过介质的电容耦合作用将 RF 电能馈入到等离子体中去,从根本上消除了直流气体放电的电极溅射对激光器内部光学元件的污染以及直流放电时常有的高压电晕、放电稳定性差等诸多缺陷。射频系统可以实现在较大范围内的调制(0~几十千赫兹),这种优异的调制性能是改善激光加工性能所期望的,这是射频激励的又一重要优点。

我们在研制成功的千瓦级射频激励快轴流 CO₂ 激光器实验样机上进行了阻抗调配及光脉冲调制的实验,本文总结了这方面的计算和实验结果。

2 RF 源与激光器放电气体之间的阻抗匹配

2.1 阻抗匹配的原理

为了将 RF 能量有效地馈入到激光气体中去,必须避免负载(激光器放电气体)对 RF 载波的反射作用,这种反射是由于负载阻抗与传输线的特征阻抗不匹配而产生的反射愈小,RF 能量传输的效率愈高,被反射的 RF 能量将传送回 RF 源使传输线损耗增加;由于传输效率的降低,将引起激光功率的下降,严重时放电停止,激光器不能正常工作。为了使 RF 源与激光放

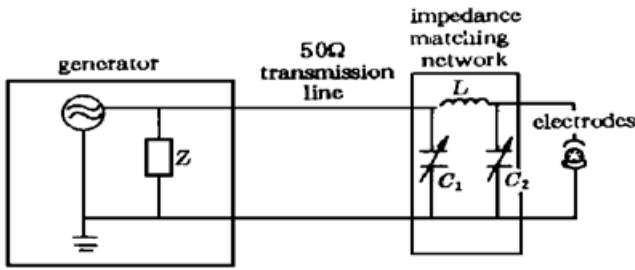


图 1 RF 源与激光器放电管的阻抗匹配

Fig.1 Impedance matching between the RF generator and laser electrodes

电气体的阻抗相匹配,在 1KW RF 激励块轴流 CO₂ 激光器实验样机上采用了如图 1 所示的阻抗匹配网络系统。具有 50 Ω 内阻的 RF 电源通过特征阻抗为 50 Ω 的同轴 RF 电缆与激光头相连,在同轴电缆末端设计了一 π 形匹配网络以实现 RF 源与负载阻抗之间的匹配变换。

图 1 中的 C₁, C₂ 和 L 是匹配网络的调配元件, C_L 是放电电极间的电容, R_d 是放电气体的等效电阻。

如果进一步考虑气体放电时所存在的边界

鞘层的电容 C_B 及电极的分布电容 C_w, 则放电时的电路模型可按图 2 来表示。

L_s 为电极与连接导线的分布电感。除 L_s, C_L 外, R_d 和 C_w, C_B 均与激光器工作参数有关, 即与气体成份的配比、气压、气体流速、电极形状及放电管参数有关。这说明在实现 RF 激励阻抗匹配时必须保证上述参数的恒定, 否则将直接影响整个系统的阻抗匹配。

从 RF 传输理论来看, 负载阻抗匹配实质是在消除不匹配负载对 RF 载波的反射, 方法是在传输线与负载之间引入无功元件, 人为地产生相位相反的反射波, 使之与原来不匹配负载阻抗所产生的反射波互相抵消而达到匹配, 从而在传输过程中获得最大功率传输, 负载获得最大有效功率。

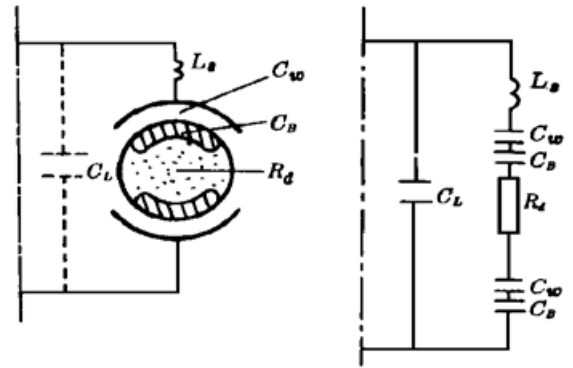


图 2 气体放电的电路模型

Fig.2 Electrical equivalent model of RF discharge

2.2 RF 放电等离子阻抗的计算

实现 RF 激励的气体放电时的阻抗匹配的设计, 需要对放电系统的等离子体阻抗进行必要的估算, 以便正确地选择匹配网络中有关电感及电容的参数范围, 使阻抗调配试验更容易实现。

根据等离子体物理学^[2,3], 一个电离了的等离子体在 RF 电场作用下可以存在稳定的电流密度即

$$i(t) = \frac{N_e e^2 E}{m \sqrt{\nu^2 + \omega^2}} \cos(\omega t - \phi) \tag{1}$$

式中, N_e 为电子密度(粒子/m³); e 为电子电荷(1.6 × 10⁻¹⁸ C); m 为电子质量(9.11 × 10⁻³¹ kg); E 为电场强度(V/m); ν 为气体分子的碰撞频率(1/s); ω 为 RF 电场的角频率(对于 RF 频率 f = 13.56 MHz, ω = 2πf = 0.86 × 10⁸); φ 为相位角(tan φ = ω/ν)。

对处于 RF 激励条件下的 CO₂ 激光器来说, 电极间的放电的等效电阻可近似地表示为

$$R_d = \frac{m \nu d}{N_e e^2} \tag{2}$$

$$x = \frac{m \omega d}{N_e e^2 A} \tag{3}$$

A 为电极面积(m^2); d 为极间距离(m)。

根据有关文献^[3,4]的实验研究, 对一个 $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} = 1 \cdot 1 \cdot 8$ 的激光混合气体, 其维持自持放电的阈值条件是 $E/N = 3.5 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ 。在此 E/N 值时的电子漂移速度 v_d 约为 $7 \times 10^6 \text{ cm/s}$, 而碰撞频率 $\nu = 1.2 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ (气压为 $9.31 \times 10^3 \text{ Pa}$)。由式(3)可以看出, $R_d \gg x$ (在 RF 频率达 100 MHz 范围内亦如此), 即可以认为 RF 放电属纯电阻状态。

为了估算放电系统中匹配网络的参数, 需要首先对放电气体的等离子体阻抗进行计算^[5]。利用式(2)可将电极间的电流表示为

$$I_{\text{rms}} = \frac{N_e A e^2 E_{\text{rms}}}{m \nu} \quad \nu \gg \omega \quad (4)$$

设放电气体击穿时所馈入的 RF 功率为 P , 利用 $P = IV$ 及 $E = V/d$, 则式(4)可改写为

$$N_e = \frac{p m \nu d}{V A e^2} \quad (5)$$

式中, p 为激光头单个放电管气体击穿时 RF 馈入功率(W); V 为气体击穿时 RF 电极上的电压有效值(V)。

按气体击穿时 $E/N = 3.5 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ 及激光器的下列参数: 气压为 $9.31 \times 10^3 \text{ Pa}$, 温度 $T = 400 \text{ K}$, 电极间距 $d = 2.5 \text{ cm}$, 计算出气体击穿时电极上的电压 $V = E \cdot d = 5.9 \times 10^2 \times 2.5 = 1475 \text{ (V)}$ 。

根据现场对 RF 馈入激光头的功率的测量, 在气体击穿时单个放电管平均吸入的功率

$$P \approx 250 \text{ W}$$

将以上参数代入式(5) (2), 得到

$$R_d = 8702 \ \Omega$$

考虑到 8 根电极平行并联, 则在气体击穿时相应的 8 根放电管总电阻为

$$R_D = \frac{R_d}{8} = 1087 \ \Omega$$

实验表明, 当 RF 馈入功率增加时, 激光气体等离子体阻抗值将随吸收的电功率的增大而成非线性减小趋势。Griffith^[6]以实验证实了这一情况。

2.3 匹配网络参数估算

RF 阻抗匹配网络可以有多种形式, 我们采用了 π 型匹配网络, 其优点是它具有较宽的阻抗变换范围, 方便了匹配的实验操作, 同时它可以提供更高的阈值气压, 从而更适合在较高气压下实现激光气体放电。

阻抗匹配网络的计算可近似地按放电气体的等离子体具有纯电阻特性的假设来进行。由图 1 可知从网络输入端有

$$Y_s = G_s + jB_s = j\omega C_1 + 1/[j\omega L + 1/(j\omega C_2 + 1/R_D)] \quad (6)$$

由此可得导纳 Y_s 的实部和虚部分别为

$$G_s = \{[(1 - \omega^2 L C_2)^2 + (\omega L R_D)^2] R_D\}^{-1} \quad (7)$$

$$\text{及} \quad B_s = \omega C_1 + \frac{\omega L_2(1 - \omega^2 L C_2) - (\omega L/R_D^2)}{(1 - \omega^2 L C_2)^2 + (\omega L/R_D)^2} \quad (8)$$

在阻抗匹配时 $G_s = 1/R_0$ 及 $B_s = 0$, 由此得出

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L} \left[1 - \sqrt{\frac{R_0}{R_D} - \frac{\omega^2 L^2}{R_D^2}} \right] \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{(\omega^3 L C_2^2 + \omega L / R_D^2 - \omega C^2)}{\omega[(1 - \omega^2 L C_2)^2 + \omega^2 L^2 / R_D^2]} \quad (10)$$

R_0 为传输线的特征阻抗, 这里 $R_0 = 50 \Omega$ 。

式中 C_2 有解的条件是适当选择 L , 使

$$L < \sqrt{R_0 R_D / \omega^3} \quad (11)$$

在适当选取 $L = 2 \mu\text{H}$ 后, 按选定的混合气体配比 $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} = 1 \cdot 4 \cdot 8$ 及气压 $p = 9.31 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的条件将计算得出的 R_D, L 等值代入式(9), (10) 后得出了实现阻抗匹配时的网络参数

$$C_1 = 233 \text{ pF}, \quad C_2 = 77 \text{ pF}$$

以上计算为激光器的阻抗匹配提供了理论依据。由于放电气体的阻抗特性受诸多因素的影响, 在进行实际阻抗匹配的调匹试验时网络元件 C_1 和 C_2 均设计成变化范围较宽的真空陶瓷电容 $C_{1\text{max}} = 1500 \text{ pF}$, $C_{2\text{max}} = 1000 \text{ pF}$, 以便在调配时可进行较宽范围内的参数扫描, 以捕捉最佳阻抗匹配的实际参数。

2.4 阻抗匹配的实验

图 3 所示的阻抗匹配的实验装置是用于对气体放电阻抗匹配的监测及放电电压的测定。RF 源输出功率由标准 50Ω 负载上所耗损的功率(由水标计的流量及温度计算出标准负载所耗功率)来测定。同轴定向耦合器监测入射及反射波, 据此可计算入射、反射功率, 并指示调匹状态。RF 电压探针监测电极 RF 电压。

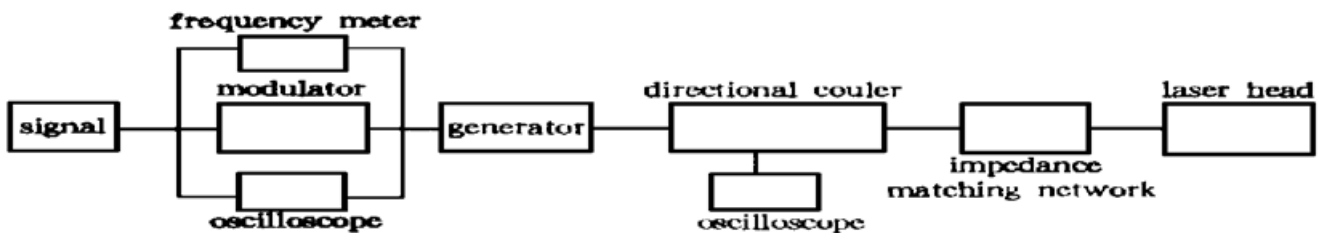


图 3 阻抗匹配的实验装置

Fig. 3 Experimental set-up for impedane matching

调匹试验一般采用先施加调制状态的电压, 调节可变电容 C_1 和 C_2 , 根据示波器反射波达最小值时来确定阻抗匹配达到最佳状态。气体的配比、气压及气体的流速等参数均对气体放电的阻抗有直接影响。

3 调制下的气体放电

射频激励 CO_2 激光器的重要优点之一是比较容易在激励源频率即载波频率不变的条件下实现激光的高效调制及脉宽的连续调节。我们进行了 $50 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$ 的连续调制实验, 图 4 是实验装置的方框图。

调制器由能产生矩形方波的脉宽调制器来控制电调衰减器的开断状态, 使 RF 源的输出电压也呈现如图 5 所示的波形, 从而实现了对放电气体的脉冲形激励。

从反射波电压图形上可以观察到气体在约 300 ns 的时间内实现了击穿放电。在未击穿放电之前, 气体的电阻无穷大, 网络处于不匹配状态, 产生大的反射波, 随着气体击穿放电, 气体

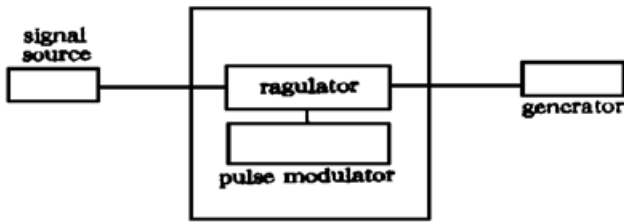


图 4 RF 调制实验的方框

Fig. 4 Sketch blocks of RF modulating

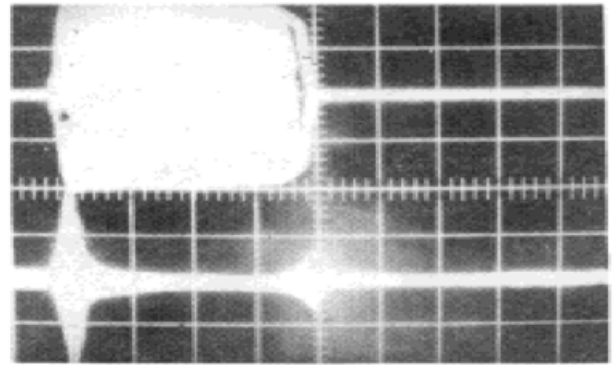


图 5 典型的输出及反射回来的 RF 调制电压波形

Fig. 5 The typical transmitted and back-reflected RF modulated voltage waveforms

等离子体显现出常数电阻的特征, 这时实现了网络阻抗匹配的变换, 反射波减小为接近于零。由于反射波在每个输入脉冲中所占比重很小, 且在整个以后的过程中没有明显变化, 因而调制激励条件下所实现的阻抗匹配在转为非调制激励方式时仍然有效。由于 RF 调制状态下的 CO₂ 气体放电的平均吸收功率小, 在调制状态下进行阻抗匹配的调试可避免大 RF 反射波返回 RF 电源时造成对 RF 源的危害, 因此通常进行阻抗匹配调制都是先在调制状态时进行的, 当试验证明匹配状态良好, 然后再对非调制状态下的激励进行精细的调匹试验。

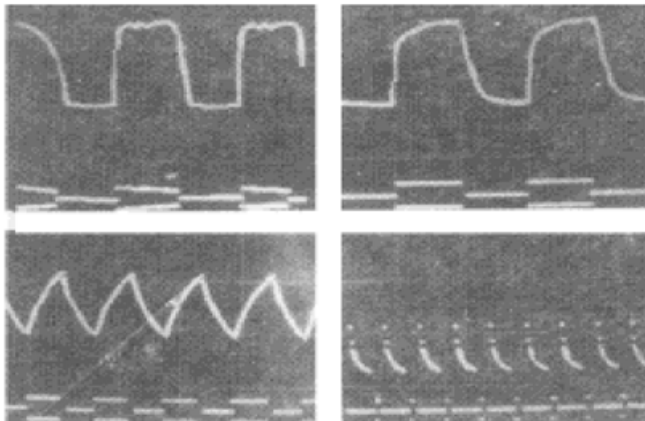


图 6 不同调制频率时的光脉冲特性

Fig. 6 The laser pulses for different modulating frequencies



图 7 调制时的激光光斑

(在高速移动的相纸上打出的光斑, 调制频率 2 kHz)

Fig. 7 The laser burnt spots on a moving paper when a modulation frequency of 2 kHz is used

图 6 为在不同调制频率下 RF 激励的 CO₂ 激光器的光脉冲特征^[6]。我们在调制频率为 2 kHz 的情况下在快速移动的相纸上打出了脉冲光斑, 如图 7 所示。

参 考 文 献

- 1 Bruno Waiter. Impedance matching of RF-excited CO₂-lasers. *SPIE*, High power CO₂ laser systems and applications, 1988, **1020** : 57~ 67
- 2 Francis, G.. Ionization phenomena in gases. New York : Academic Press, Inc. , 1960, 81~ 172

- 3 Ramo, Whinnery, van Duzer. Field and wave in communication electronics. New York : Wiley, 1967, 338~ 341
- 4 Lowke, Phelps, Irwin. Predicted electron transport coefficients and operating characteristic of CO₂ ·N₂ · He laser mixtures. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44** : 4664~ 4671
- 5 G. A. Griffith. Transverse of plasma discharge characterization for CO₂ waveguide lasers. *SPIE*, 1980, **227** : 6~ 11
- 6 R. Wollermann Windgasse, F. Ackermann, J. Weick *et al.*. High power lasers and their industrial applications. Sitzung High-power-lasers, Innsbruck, April 1986, 49

The Experimental Investigation on Impedance Matching and Modulation of RF-excited CO₂ Laser

Chen Shenghong Mao Yuzhou Zhang Gan Zhao Yanping

(*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

Abstract The principle and experiment of an impedance matching network between the RF source and the laser head, which is necessary for RF discharge, is described. According to the parameters of a built-up 1 kW RF exciting axial flow CO₂ laser, the results of calculation of RF gas discharge impedance and the on-moving matching are presented.

Key words radio frequency (RF) excitation, impedance matching, modulation