

文章编号: 1001-3806(2005)02-0199-02

射频 CO₂ 激光器电源激励功率与频率关系的研究

张德玲, 曹锋光, 韩晏生*, 王又青

(华中科技大学 激光技术与工程研究院, 武汉 430074)

摘要: 以气体放电理论为基础, 利用简化模型推导出射频激励 CO₂ 激光器气体放电击穿电压的数学关系式, 指出影响激光气体放电击穿的几个物理参量。并通过实验测定了引起气体击穿时所需的注入功率与频率之间的关系。理论结果与相关试验测试结果符合一致。

关键词: 射频放电; 电压特性; 注入功率; 频率

中图分类号: TN248.2⁺2 **文献标识码:** A

Study on the relationship between the power and the frequency of CO₂ laser excited by RF

ZHANG De-ling, CAO Feng-guang, HAN Yan-sheng, WANG You-qing

(Institute of Laser Technology Engineering, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: The mathematical relationship of breakdown voltage of gas discharge in CO₂ laser excited by RF is derived by using reduced model based on the theory of gas discharge and several physical parameters which influence gas discharge breakdown of laser are pointed out. By means of the experiment, the relationship between the power infused and the frequency which cause the gas discharge breakdown is drawn. Compared the relative experimental test results with theoretical conclusion, both are consistent.

Key words: RF discharge; voltage characteristic; power infused; frequency

引 言

随着高新技术的不断发展, 中小功率射频 CO₂ 激光器在各行业中的应用日益广泛。射频激励技术是 CO₂ 激光器技术的最新发展。它克服了直流放电激励中的高工作电压、电极溅射污染镜片、高压放电使 CO₂ 分子分解以及输出光功率无法进行高速率电控制等缺点。但美中不足的是该功率源的价格昂贵且复杂。为解决这种激光器电源昂贵的问题, 已有人在这方面进行了相关尝试性开发研究^[1]。要设计出与这种激光相配套的激光电源, 其电源输出主要技术参数的指标必须预先知道, 而这些指标应由激光头气体放电的具体条件决定, 故对激光器最佳气体放电的研究具有重要的现实意义。作者以气体放电理论为基础, 利用气体放电的简化模型, 从理论上推导出气体放电发生时所必需的击穿电压、电源频率、放电气压等的依赖关系的数学表达式, 并用实验测定了特定激光器特定气压下引起气体击穿的最小注入功率与电源频率的关系。

作者简介: 张德玲 (1978-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光技术方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: www_han@sohu.com

收稿日期: 2004-02-14; 收到修改稿日期: 2004-06-14

1 理论推导

1.1 气体击穿电压与频率的关系

按照气体放电的有关理论^[2,3], 在推导击穿条件所使用的简化模型中, 作如下假设: (1) 扩散是主要的, 不考虑电子的复合和附着过程; (2) 激光器保持中等气压; (3) 只考虑一维均匀场, 电子扩散系数认为是常数; (4) 为便于推导, 假设极板间电子数密度分布近似为正弦, 即两极板附近电子数为 0, 极板中央电子数最大, 且电子数的密度可表示为 $n_e = n_m \sin[\pi x/d]$, 其中 n_m 为极板中央电子数密度, x 为电子与极板的距离, d 为极间距离。于是电子数密度平衡方程为:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \nu_i n_e + \nabla^2 D_e n_e \quad (1)$$

式中, D_e 为电子的扩散系数, ν_i 是碰撞电离的频率, t 表示时间。考虑到击穿发生在电子的平衡态, 故由 (1) 式可得一维与时间无关的方程:

$$\frac{\nu_i n_e}{D_e} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

引入高频电离系数 $\xi = \frac{\nu_i}{D_e E_b^2}$, 它决定于扩散, 代入 (2) 式, 并将 n_e 代入, 可得到极间距为 d 的均匀电场的击

穿场强为:
$$E_b^2 = [\pi/d] f^2 \xi \quad (3)$$

式中, E_b 为气体击穿时两平行极板间的电场强度。若已知 ξ , 利用 (3) 式可计算出击穿场强 E_b 及相应的击穿电压 U_b 。现从能量平衡的观点来考虑击穿条件。电场提供给放电体中单位体积的平均功率等于电流密度乘以电场强度, 即 $W_{av} = J_e E_b$, 将高频下的电子电流密度 $J_e = n_e e^2 E_b / [m(\nu_m + j\omega)]$ 代入此式, 并整理可得出每个电子在一次碰撞中从电场获得的能量为:

$$W_{av} = \frac{e^2 E_b^2}{m(\nu_m^2 + \omega^2)} W_{av} = J_e E_b \quad (4)$$

式中, m , ν_m , ω , W_{av} 分别为电子的质量、碰撞频率、电场频率及一个周期内电场提供给放电体单位体积的平均功率。而每个电子在电场中与气体分子的一次碰撞所损失的能量为 $m v^2 (2m/M)/2$, 其中 v 为电子的平均速度, M 为气体分子的质量。由于获得与损失的能量必须相等, 故由此可得击穿场强:

$$E_b = \left[\left[\frac{m^3 v^2}{e^2 M} (\nu_m^2 + \omega^2) \right]^{1/2} \right] \quad (5)$$

考虑到碰撞频率 $\nu_m = N v \sigma$, 气压 $p = NKT$ 及电场频率 $\omega = 2\pi f$, 代入 (5) 式得击穿场强对应 E_b 的击穿电压:

$$U_b = \left[\left[\frac{m^3 v^2}{e^2 M} \left(\frac{\sigma^2 v^2}{k^2 T^2} d^2 p^2 + 4\pi^2 d^2 f^2 \right) \right]^{1/2} \right] \quad (6)$$

式中, v , σ , N , k , T 分别为电子的平均速度、碰撞截面、气体分子的密度、玻耳兹曼常数和气体的温度。在气体温度一定的情况下, (6) 式中参量 d , p , f 前面的各个系数均可认为是常量 (为了分析方便, 假设电子的平均速度 v 也是常量), 对一台特定的激光器, 极间距离 d 以及气体 p 的压强都是特定的, 故激光器的击穿电压 U_b 仅仅是电源频率 f 的函数, 即 $U_b = U_b(f)$ 。

1.2 气体击穿电压与注入功率的关系

射频电源的传输和直流电源的传输不同, 为了使电源功率有效的注入放电电极, 在射频电源与放电装置之间需要加一个匹配网络。这里假设射频电源和放电气体的匹配网络是一种共轭匹配, 即射频电源功率能最大效率的传输到气体。另外, 激光器的放电气体可以假设为电阻和电容的一种简单串并联关系, 则放电气体就可以看作是一个阻抗为 Z_1 的负载。当气体击穿时负载得到的功率为:

$$P = \frac{1}{2} \frac{U_b^2}{Z_1} \quad (7)$$

式中, U_b 是气体的击穿电压, P 是输入功率。

1.3 输入功率与输入频率的关系

根据 (6) 式和 (7) 式很容易得出功率与频率的关系为:

$$P = \frac{1}{2} \frac{U_b^2}{Z_1} = \frac{1}{2Z_1} \left[\frac{m^3 v^2}{e^2 M} \left[\frac{\sigma^2 v^2}{k^2 T^2} d^2 p^2 + 4\pi^2 d^2 f^2 \right] \right] \quad (8)$$

由前面的分析, 很容易得出对于一台特定的激光器, 功率 P 仅仅是频率 f 的二次或者高次函数, 故功率 P 存在一个极小值。因现有的实验条件还无法准确测定频率对电子运动速度的影响以及气体放电时的阻抗, 所以这里对 (8) 式仅做定性分析, 不做精确的理论推导。

2 试验验证

测试中, 所用激光器为 Synrad 公司生产的 48-5 型 50W 射频激励 CO_2 激光器, 在不同输入频率下, 功率与频率的关系可用图 1 来表示。

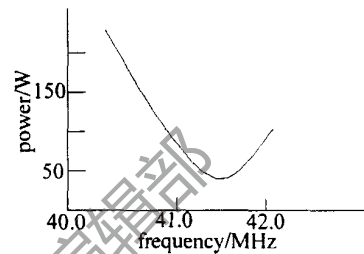


Fig 1 The relation between the power and the frequency

3 讨论

实验表明, 注入功率随射频激励频率的增加有一个最小值。当频率较低时, 随着频率的增加, 电子与气体粒子碰撞次数增加, 电离作用加强, 击穿电场强度降低, 所需的击穿电压降低, 注入功率减小。当频率较高时, 随着频率的增加, 电子运动幅度变小, 电子从电场获得的能量减小, 电离作用反而减弱, 击穿电场强度升高, 击穿电压也升高, 注入功率增加。这与理论分析是相符合的。

由以上分析可知, 射频激励频率的大小对 CO_2 激光器工作电压、工作稳定性和激光输出功率均密切相关, 在放电腔物理尺寸、气体成分、气压一定的情况下, 激励电源必定存在一个最佳工作频率。

4 结论

通过对射频 CO_2 激光器气体放电的理论推导及实验研究, 得出了特定激光器气体放电所需的最小注入功率 (击穿电压) 与电源频率的关系, 这对实际从事射频电源工作者提供了理论参考。

参考文献

- [1] WANG X B, XU Q Y, XIEM J *et al* Slab CO_2 laser excited by switching power [J]. Optics & Laser Technology, 1997, 29 (26): 353 ~ 354.
- [2] OH Y H, CHOIN H, CHOID I A numerical simulation of RF glow discharge containing an electronegative gas composition [J]. J A P, 1990, 67 (7): 3264 ~ 3268.
- [3] 杨津基. 气体放电 [M]. 北京: 科学出版社, 1983. 8