

高功率横流 CO₂ 激光器大体积放电研究

魏在福 程兆谷 查鸿逵 王润文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 详细讨论了脉冲预电离高功率横流 CO₂ 激光器的工作特性, 研究了一套新型的电极结构, 对其放电、注入功率、输出功率等特性进行了讨论. 实验结果表明, 脉冲预电离可以提高高功率横流 CO₂ 激光器的注入和输出功率, 并有效地改善了放电的稳定性和均匀性.

关键词 脉冲预电离, 高功率横流 CO₂ 激光器, 气体放电.

1 引 言

高功率 CO₂ 激光器电激励技术的关键是如何获得高气压下、大体积内均匀稳定的连续辉光放电, 有效地防止弧光放电. 参量 E/N 值对放电稳定性及泵浦效率有直接的关系, Nighan^[1] 对自持放电研究表明, 为了获得稳定或准稳定的辉光放电, 要求电离与附着所引起的总的电子损耗平衡, 满足此条件的 E/N 值为 $2\sim 3\times 10^{-18} \text{ V}\cdot\text{cm}^2$, 自持放电是无法维持此 E/N 值的. 1970年, Laflamme^[2] 为了获得大体积的均匀气体放电, 在 TEA 激光器中首先采用了脉冲预电离技术. 这种预电离为阳极与阴极的主放电创造了初始条件, 使激光器在较小的 E/N 值下运转, 极大地改善了放电的稳定性和均匀性. 70年代还研究了其它预电离技术, 如紫外光^[3]、电子束^[4~5]、射频放电^[6]及直流辅助放电^[7]等预电离技术.

本文采用了一套新颖的电极结构把脉冲预电离技术应用到高功率 CO₂ 激光器中, 有效地改善了高气压大体积内放电的稳定性和均匀性, 提高了激光器的注入功率和输出功率. 简单可靠, 工作性能稳定, 且造价低等优点, 特别适合我国的实际情况.

2 电极结构

放电盒的电极结构如图 1 所示, 其中激光输出方向、放电方向与气流方向相互垂直. 电极采用针板结构, 双通道放电, 阳极为板条结构, 是由 55 块分离的铜条组成, 阴极是由 4 排不锈钢针组成, 两排之间的距离为 10 mm, 每排 55 根针, 针间距为 20 mm, 所有针都密封在阴极基板上, 针的一端在放电区并垂直阳极板, 另一端浸在 K₂CO₃ 溶液中, 通过一段介质溶液后, 借助过渡引线与交流电源的相连, 在阴极上游有一排脉冲预电离放电针, 预电离产生的等离子体由气流带入主放电区.

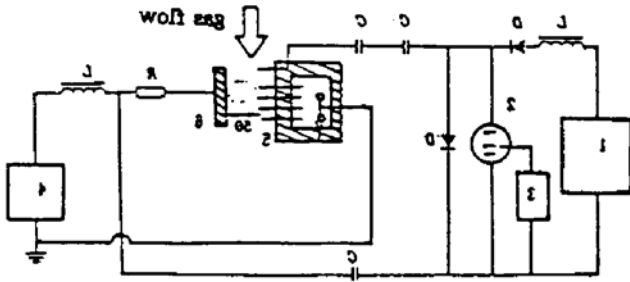


Fig. 1 Schematic diagram of electrodes structure (1-pulser DC supply; 2-thyratron; 3-trigger; 4-sustainer DC supply; 5-cathode; 6-anode)

K_2CO_3 溶液是循环使用的, 其作用为: 1) 充当阴极针的放电限流电阻; 2) 冷却阴极针; 3) 能在一定程度上起到抑制弧光放电作用. 对 K_2CO_3 溶液的电阻特性研究表明, 溶液电阻与介质长度成正比, 与溶液浓度成反比, 且在放电过程中其溶液电特性稳定. 因此, 通过调节介质长度或改变溶液浓度, 就可方便地控制各排针的限流电阻的大小, 使其最佳化, 使得针电流均匀分布. 最佳溶液浓度依赖于针的尺寸, 针的排列密度, 电介质长度, 针伸到溶液中的长度及工作的

组分和气压. 溶液浓度过大, 电导率太大, 使溶液电阻过小, 导致针电流过大, 很可能会把针烧坏; 溶液浓度过大, 会导致在溶液电阻上产生不必要的电能损耗, 影响激光器整体效率.

以上讨论的多针电极, 结构简单, 它省掉了复杂的且易损坏的限流电阻. 同时, 当放电区产生局部弧光时, 该处电流迅速增加, 其附近溶液被加热, 会立刻产生气泡, 使该处电阻迅速变得很大, 从而抑制电流的继续增大, 熄灭弧光放电, 重新恢复原电流分布均匀的状态.

3 放电讨论

在一定的电流密度下, 为维持放电所需的 E/N 值和由此决定的电子温度, 取决于电子产生和损耗过程^[1]. 若采用预电离可独立控制的电离源, 就可调整所施加的电场值, 即 E/N 值, 使电子温度维持在某一数值上, 而与电子的产生过程和损耗过程无关^[9], 使低能电子碰撞直接引起的电离与辅助电离源提供的电离相比较是微不足道的. 所加高压短脉冲在阴极和阳极间产生均匀预放电, 其脉冲预放电 E/N 值为 $1 \sim 2 \times 10^{-15} V \cdot cm^2$, 脉冲宽度为 $\tau_p \leq 0.1 \mu s$, 脉冲重复频率必须大于等离子体衰减频率: $f, > \beta_0 n_e$ 其中, β_0 是等离子体复合系数, n_e 是电子密度. 对主放电最佳 E/N 值 $(2 \sim 3) \times 10^{-16} V \cdot cm^2$, 等离子体复合系数为 $\beta_0 \sim 10^{-7}$ ^[9].

3.1 脉冲预电离重复频率对输出功率的影响

图 2 是激光输出功率与脉冲重复频率的关系. 从图看出, 频率从 3 kHz 变到 10 kHz, 激光输出功率基本没有变化, 但当 $f, < 3 kHz$ 和 $f, > 10 kHz$ 时, 激光功率下降. 由(1)式可知, 对本实验电子密度 $n_e = 10^{10} \sim 10^{11} cm^{-3}$, 重复频率应在 1 kHz ~ 10 kHz 间, 最佳值为 3 kHz. 当重复频率不在此范围时, E/N 值不在电佳位置, 导致泵浦效率降低, 因此, 输出功率下降.

3.2 脉冲预电离对主放电电压的影响

图 3 给出了激光器注入功率、放电电压与脉冲电压的变化关系. 由图可见, 注入功率对脉冲电压的变化不敏感, 但放电电压随脉冲电压的增大而减小. 考虑到注入电功率密度 $\langle jE \rangle$ 与电场强度 E 的关系: $\langle jE \rangle = en_e \mu E$, 式中 e 、 n_e 、 μ 分别为电子的电量、密度和迁移率, 在 E/N 值变化不大的情况下, μ 变化很小^[10], 由图 3 知 $\langle jE \rangle$ 变化不大, 预电离脉冲电压升高相当于增大预电离注入功率, 预电离增强, 电子密度 n_e 增大, 则 E 将下降, 即主放电电压下降.

3.3 预冲预电离对小信号增益的影响

通过改变脉冲电压来调节脉冲注入功率, 图 4 给出了小信号增益与脉冲功率的关系. 增加脉冲注入功率, 提高了脉冲放电对主放电的预电离能力, 即增加了电子密度 n_e , 由电流密

度与电子密度的关系 $j = en_e\mu$ 知，随电子密度的增大主放电电流增大，而小信号增益与放电电流成正比，因此，增加脉冲注入功率可在一定程度上增大小信号增益，这一现象为实验所证实。但是，随脉冲预电离作用的加强，主放电电压下降，电流过大，引起工作气体温度升高，造成下能级粒子数增加，上能级粒子数减小，小信号增益会随之下降，出现热阻塞现象。

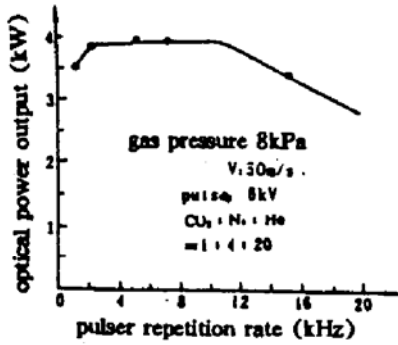


Fig. 2 Dependence of laser power on pulser repetition rate

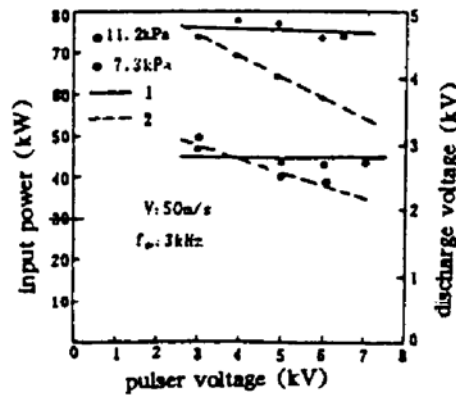


Fig. 3 Dependence of input power and discharge voltage on pulser voltage (1. input power; 2. discharge voltage)

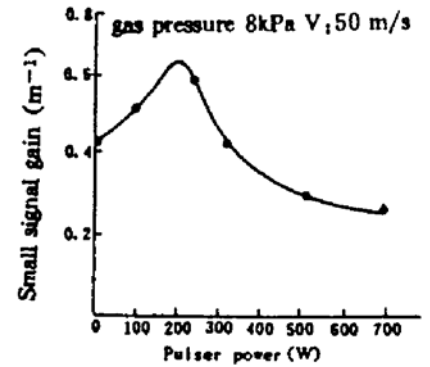


Fig. 4 Dependence of small signal gain on the pulse power

3.4 激光器的注入电功率

激光器的直流放电特性与工作气压，混合比、流速、气体温度、电极结构及放电过程中的物理过程和化学过程有关。图 5 所示为两种组分 CO₂ : N₂ : He = 1 : 7 : 13 和 1 : 8 : 20 在不同的气压下、脉冲重复频率为 3 kHz、脉冲电压为 6 kV、流速为 50 m/s 其激光器注入电功率随放电电流变化关系。考虑到在正常辉光放电情况下，放电电压随电流的增大变化不大，因此，注入电功率 $P_E \propto I$ ，呈线性关系。由图中看到，当放电电流为 22 A 时，总气压 10.66 kPa，激光器的注入电功率可达 85 kW。图 6 给出了激光器注入功率与工作所压的关系，由图可见，其注入功率与工作气压呈线性关系，因为注入功率与气压有关系^[11]。 $P_E \propto \dot{m}(M/RT)AVP$ ，式中 A 为放电区截面积； M 为分子量； R 为普适气体常数； T 为气体温度； V 为流速； P 是气压； \dot{m} 是质量流。从上式看出，注入功率与气压的一次方成正比。

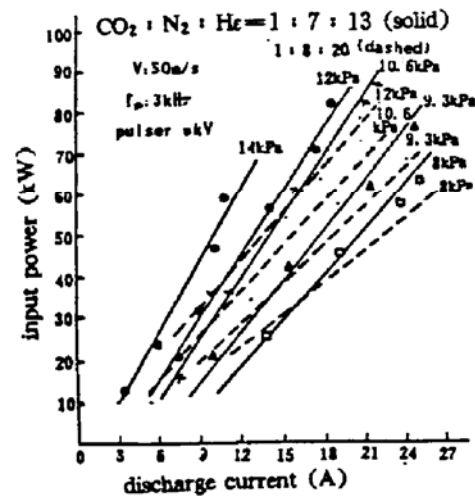


Fig. 5 Input power vs discharge current

4 激光输出

在原 5 kW 管板式横流 CO₂ 激光器的基础上，电极改用针板结构并采用了脉冲预电离技术，获得了高气压下大体积内的均匀辉光放电。最大注入电功率由原来的 40 kW 提高 85

kW. 采用稳定腔, 其激光输出功率达 9.1 kW. 如图 7 所示.

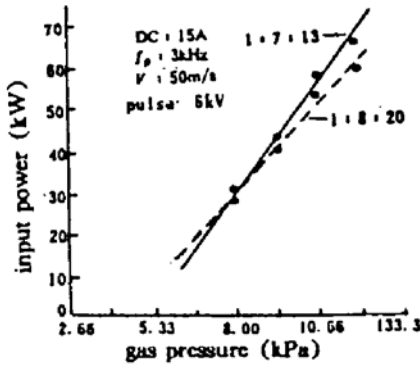


Fig. 6 Input power vs gas pressure

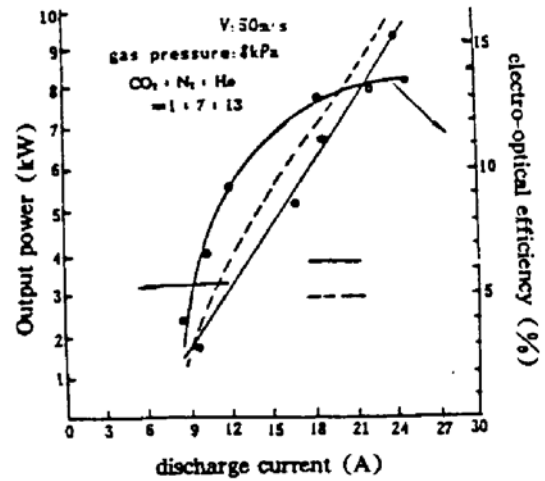


Fig. 7 Output power and electro-optical efficiency vs discharge current

5 结 论

研究表明, 由于脉冲预电离提高了放电稳定性, 改善了高压大体积直流放电 CO_2 激光器的性能, 极大地提高了大功率横流 CO_2 激光器的注入电功率和激光输出功率, 此实验的 E/N 值为 $3 \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$. 另外, 脉冲预电离多针电极结构, 比较适用于较高气压下工作, 有利于激光器的长寿命运转及小型化.

参 考 文 献

- [1] W. L. Nighan, W. J. Wiegand, Influence of negative-ion processes on steady-state properties and striations in molecular gas discharges. *Phys. Rev (A)*, 1974, **A10**(3): 922~945
- [2] A. K. Laflamme *et al.*, Double discharge excitation for atmospheric pressure CO_2 laser. *Rev. Scient. Instrum.*, 1970, **41**(11): 1578~1581
- [3] H. Segum *et al.*, Photoinitiated and photosustained laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(9): 414~415
- [4] R. R. Garnsworthy *et al.*, Atmospheric-pressure pulsed CO_2 laser utilizing preionization by high-energy electrons. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, **19**(12): 506~508
- [5] C. A. Fenstermacher, Electron-beam-controlled electrical discharge as a method of pumping large volumes of CO_2 laser media at high pressure. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**(2): 56~60
- [6] D. B. Nichols *et al.*, Radio-frequency preionization in a supersonic transverse electrical discharge laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1972, **QE-8**: 718~719
- [7] 王哲恩, 2 千瓦横向流动闭环循环 CO_2 激光器. *激光*, 1980, **7**(7): 1~4
- [8] O. K. Wood, High-pressure pulsed molecular lasers. *Proc. IEEE*, 1974, **62**(3): 355~397
- [9] V. G. Naumov *et al.*, Investigation of a combined discharge used to pump fast-flow lasers. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1977, **7**(11): 1386~1390
- [10] B. E. Cherrington, *Gaseous Electronics and Gas Lasers*, Oxford, Pergmon. 1979: 15
- [11] P. K. Chen, *CO_2 Laser*, Laser, New York, Marcel Dekker, 1971

Investigation of Large Volume Discharge in High Power Transverse-Flow CO₂ Laser

Wei Zaifu Cheng Zhaogu Cha Hongkui Wang Runwen

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 8 July 1993; revised 16 August 1993)

Abstract Operational characteristics of a high power pulse preionized transverse-flow CO₂ laser is discussed in detail. A new electrode configuration has been designed and the characteristics of discharge, input power and output power are studied. The results show that the pulse preionization can significantly increase the input power and the output power of the lasers, and is proved to be a effective method for improving discharge stabilities and homogeneities of a high power CO₂ laser.

Key words pulse preionization, high power transverse-flow CO₂ laser, gas discharge.