

无声放电辅助激励 CO₂ 激光器的研究*

凌一鸣 许一波 吴旭峰 徐建军

(东南大学电子工程系 南京 210018)

提要 用具有扁平放电截面的等离子体管设计一种新颖的 CO₂ 激光器,并用纵向辉光放电和横向无声放电同时激励。阐述了这种激光器的设计原理,理论上讨论了激光管内电子浓度的横向分布,实验研究了它的工作特性,并与仅用辉光放电激励的情况进行比较。实验表明,由于横向无声放电的作用使这种激光器的激光功率、工作气压和工作气体中氮的比例有明显的提高,激光效率也有所提高,而且放电电流能兼顾最大激光输出功率和最佳效率。

关键词 CO₂ 激光器,无声放电,气体激光器

1 引言

CO₂ 激光器已广泛应用于工业加工、激光医疗等方面,也是结构设计和激励方式最多的一种气体激光器。从 CO₂ 激光器的动力学过程分析不难理解,其上能级的激励与其激光等离子体中电子能量分布和电子温度关系不大,也就有利于采用各种激励方式和高效的电源。

自 80 年代初以来,无声放电(Silent Discharge)已被用于 CO₂ 激光器的激励。它是一种特殊的气体放电,这种放电的电极表面(至少一个电极)覆盖一层绝缘介质层,故又称介质阻挡放电,用交流激励。1981 年 S. Yagi 和 N. Tabata 首先报道了一种无声放电激励的 CO₂ 激光器^[1]。到 1985 年,又有人研制成功了一种 1 kW 量级的无声放电激励横流 CO₂ 激光器^[2],并研究了这种激光器中氮气的的作用,发现 CO₂-CO-N₂-He 的混合气中 N₂ 的最佳比例约为 60%,这样由于流动氮气的减少,可以大大减低运转成本。1993 年, H. Nagai 等又提出一种新型 20 kW CO₂ 激光器,它用无声放电辅助辉光放电激励(SAGE)^[3],这种激光器可以在较高的气压下工作,因此有利于延长工作寿命。由此可见,无声放电是气体激光器一种新的激励方式。

本文提出了一种 SAGE 的新颖设计,并用于简易封离型矩形放电截面 CO₂ 激光器的激励。

2 设计原理

在早期的封离型 CO₂ 激光器和部分气体流动式 CO₂ 激光器中,放电截面总是圆的或近似方的,这样对热交换并不有利。为此,设计了一种新型的简易 CO₂ 激光器,它的等离子体管由具有矩形截面的玻管制成,如图 1 所示。一对铝散热器贴在扁平等离子体管的两侧,并接到高

* 国家自然科学基金(编号: 69578003)资助项目。

收稿日期: 1998-12-08; 收到修改稿日期: 1999-02-01

频高压电源作横向无声放电激励。这样,绝缘的管壁正好作为无声放电的介质层。与已研制成功的扁平放电截面高功率氦氖激光器不同^[4],这里扁平等离子体管的作用是改进工作气体的冷却效果。

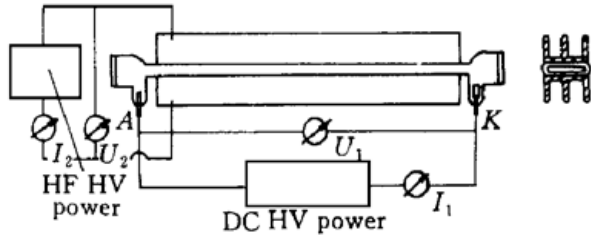


图 1 激光管结构和电源连接示意图

Fig. 1 Layout of CO₂ laser tube and its connection to the supply

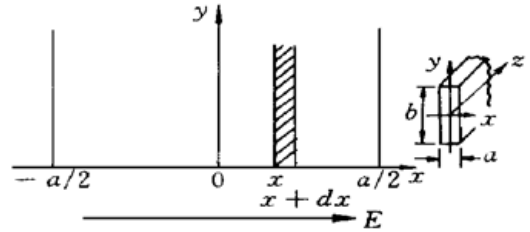


图 2 理论分析示意图

Fig. 2 Drawing for theoretical analysis

扁平等离子体管在横向电场作用下,若矩形截面的长边 b 比其短边 a 长得多,那么 b 的影响可以被忽略。放电空间可认为仅限于一对平行管壁之间,因此可按一维空间进行处理。为方便起见,考虑一段扁平放电管,并假设横向电场 E (外加电场与管内壁电荷电场的合成) 是沿 x 方向(图 2),取 x 和 $x + dx$ 之间一层等离子体,据肖特基双极性扩散理论和漂移率关系,带电粒子在 x 和 $x + dx$ 处扩散和漂移过单位面积的粒子数 N 的速率分别表示为

$$\left[\frac{dN}{dt} \right]_x = - D_a \left[\frac{dn}{dx} \right]_x + n_x K E \tag{1}$$

$$\left[\frac{dN}{dt} \right]_{x+dx} = D_a \left[\frac{dn}{dx} \right]_{x+dx} + n_{x+dx} K E \tag{2}$$

上两式中, n 为带电粒子浓度(离子或电子), D_a 为双极性扩散系数, K 为带电粒子(相应于离子或电子)的漂移率。

在 dx 层内,带电粒子不断由电离碰撞产生。假设 Z_i 为每个电子每秒钟产生的电离碰撞数。在稳态情况下,带电粒子浓度应该保持平衡,即

$$\left[\frac{dN}{dt} \right]_{x+dx} - \left[\frac{dN}{dt} \right]_x = Z_i n dx \tag{3}$$

展开式(1)和(2),忽略高次项,然后把它们代入式(3),则得

$$\frac{dn^2}{dx^2} - \frac{DE}{D_a} \frac{dn}{dx} + \frac{Z_i}{D_a} n = 0 \tag{4}$$

方程式(4)的解为

$$n = n_0 \left[\frac{e^{r_1 x} + e^{r_2 x}}{2} \right] \tag{5}$$

式(5)中 n_0 为 $x = 0$ 处的带电粒子浓度, r_1 和 r_2 为

$$r_{1,2} = \frac{KE \pm \sqrt{(KE)^2 - 4Z_i D_a}}{2D_a} \tag{6}$$

由式(5)和(6)可见

1) 若 $E = 0$, 并假设在管壁处($x = a/2$) 的带电粒子浓度为零,则式(5)表示的电子浓度横向分布为

$$n = n_0 \cos \left[\sqrt{\frac{Z_i}{D_a}} x \right] = n_0 \cos \left[\frac{\pi}{a} x \right] \tag{7}$$

2) 若 $E = E(t) \neq 0$, 又可分为两种情况, (1) $KE \geq 2 \sqrt{Z_i D_a}$, 则式(6) 表示两实数根, 式(5) 表示的电子浓度分布为沿 x 指数规律上升的函数; (2) 若 $KE < 2 \sqrt{Z_i D_a}$, 则式(6) 表示两复数根, 式(5) 表示的电子浓度分布为指数和余弦函数的乘积, 不管是式(1) 还是式(2) 所述的电子浓度分布, 其极大值都偏离中心位置($x = 0$), 因此, 随着横向交变电场的换向, 电子浓度最大处将会在中心位置两侧摆动, 以致更接近管壁。CO₂ 激光器上能级粒子数的激发区总是伴随着电子浓度的稠密区。因此, 下能级的粒子数就可更方便地将它们的能量传递给附近的管壁。当然, 随着气压的增加, 气体导热性能的变差, 管内温度横向分布有明显梯度时, 放电会收缩, 电子浓度分布会产生明显畸变。

3 实验结果及讨论

基于以上分析和图 1 所示的激光管结构, 采用以下的结构参数: 550 mm 放电长度和 4 mm × 16 mm 放电截面, 其管壁厚度约为 1 mm, 光学谐振腔采用 600 mm 腔长的平凹腔, 其凹面镜曲率半径为 2 m。平面镜(锗) 的透射率约为 20%, 阳极用 3 mm 直径的钨杆制成, 阴极用 10 mm 直径和 20 mm 高的镍圆筒制成, 阳极和阴极接直流高压电源, 放电管两侧壁外的散热器接高频高压电源, 频率为 25 kHz, 激光管接到真空、充气系统以便做各种试验。

直流激励情况下的激光输出特性如图 3 (a), (b) 所示, 虽然电源负载电阻已高达 345 kΩ, 但放电在 5~ 8 mA 以下时仍然不稳定。放电电流较大时, 放电区稍微偏向激光管的一边。

在横向高频电场作用下, 即使外加高频电压低到 1000 V, 仍然可明显看到均匀放电充满整个等离子体管。这时直流高压只要略高于阴极和阳极之间的正常工作电压, 就能稳定地建立纵向放电电流。即使电流低到 3~ 4 mA, 稠密的放电区在管轴附近, 并随着电流的增加而变宽, 直到增加到某一数值时, 电流会突然增加, 工作电压突然下降, 并且放电正柱在管内晃动或者偏在管子的一边, 像直流激励的情况差不多。这是由于放电收缩和两侧壁并非严格平行等因素所致, 也确实影响该实验中激光功率的进一步提高, 如果采用扁椭圆放电截面, 这种不稳定现象也许会得到改善。因此, 我们可以认为在低电流范围内这种激光等离子体的激励以无声放

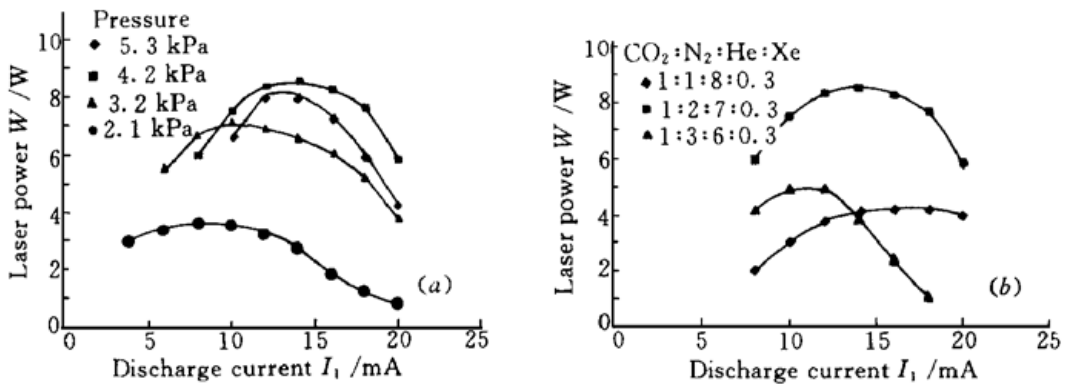


图 3 直流辉光放电激励下激光功率 W 与放电电流 I_1 的关系

(a) 不同气压, 气体配比为 CO₂·N₂·He·Xe = 1·2·7·0.3; (b) 不同气体配比, 气体压力为 4.2 kPa

Fig. 3 Dependence of laser power W on current I_1 in the excitation by DC glow discharge only

(a) at different pressures with the CO₂·N₂·He·Xe gas composition ratio of 1·2·7·0.3;

(b) with different gas composition ratios at the pressure of 4.2 kPa

电为主,而在高电流范围内的激励则以辉光放电为主。

在无声放电和辉光放电同时激励的情况下,激光输出特性如图 4 (a), (b) 所示。所加高频高压大约 1000 V 左右,无声放电电流约 8 mA 左右,实际无声放电电流是这样确定的:在同样的高频电压下,管内充以工作气体时的高频电流减去管内为真空时的高频电流。从上述的实验结果可见,在无声放电和辉光放电同时激励下的最大激光功率约为 15 W。这是在 $P = 5.3$ kPa, $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe} = 1 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.3$ 和 $I_1 = 12$ mA 的情况下得到的,而单独辉光放电激励下的最大激光功率约为 8.5 W,它是在 $P = 4.3$ kPa, $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe} = 1 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 0.3$ 和 $I_1 = 14$ mA 的情况下得到的。

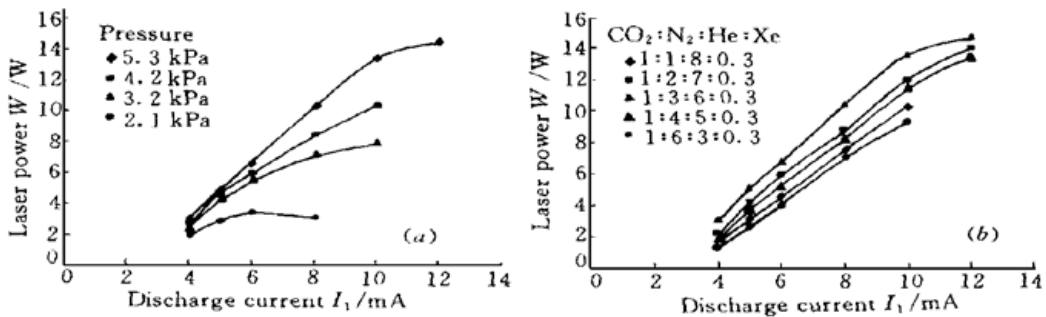


图 4 直流辉光放电与高频无声放电同时激励下激光功率 W 与放电电流 I_1 的关系
(a) 不同气压, 气体配比为 $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe} = 1 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.3$; (b) 不同气体配比, 气体压力为 5.3 kPa

Fig. 4 Dependence of laser power W on current I_1 in the excitation by both DC glow discharge and HF silent discharge

(a) at different pressures with the $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe}$ gas composition ratio of $1 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.3$;
(b) with different gas composition ratios at the pressure of 5.3 kPa

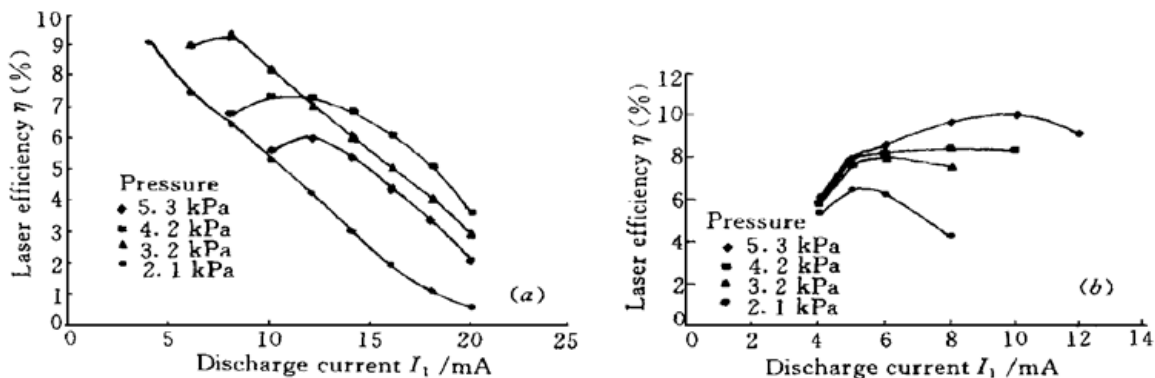


图 5 激光效率 η 与放电电流 I_1 的关系

(a) 直流辉光放电激励和不同气压下, 气体配比为 $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe} = 1 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 0.3$;
(b) 直流辉光放电和高频无声放电同时激励和不同气压下, 气体配比为 $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe} = 1 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.3$

Fig. 5 Dependence of laser efficiency η on current I_1

(a) in the excitation by DC glow discharge only at different pressures with the $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe}$ gas composition ratio of $1 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 0.3$;
(b) in the excitation by both DC glow discharge and HF silent discharge at different pressures with the $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe}$ gas composition ratio of $1 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.3$

可以按下式计算激光效率 η

$$\eta = \frac{W}{U_1 I_1 + U_2 I_2} \quad (8)$$

式(8)中, W 为激光功率, U_1, I_1 和 U_2, I_2 分别为辉光放电和无声放电的电压和电流, 激光效率与放电电流的关系如图 5(a), (b) 所示, 在辉光放电和无声放电同时作用下的最佳效率约为 10%, 它是在 $P = 5.3 \text{ kPa}$, $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe} = 1 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 0.3$ 和 $I_1 = 10 \text{ mA}$ 的情况下得到的, 而辉光放电单独激励时, 激光效率约为 9%, 它是在 $P = 3.2 \text{ kPa}$, $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2 \cdot \text{He} \cdot \text{Xe} = 1 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 0.3$ 和 $I_1 = 8 \text{ mA}$ 的情况下得到的。

由以上的实验结果可见:

(1) 横向无声放电和纵向辉光放电同时激励时激光输出功率与单独用纵向辉光放电激励相比有明显提高, 而且最佳激光效率也有所提高。

(2) 在横向无声放电作用下, 对应于最大激光功率的最佳工作气压和工作气体中氮气的比例有明显提高。激光管纵向放电击穿电压也明显下降。

(3) 在无声放电和辉光放电同时作用下, 对应于最佳激光效率的工作电流往往比对应于最大激光输出功率的放电电流要小。而且当激光管工作在最佳激光效率对应的放电电流以下时, 激光输出功率比较稳定而且不衰减, 这主要是由于气体被加热所致。

致谢 作者感谢马祖光教授和胡雪金教授的指导。

参 考 文 献

- 1 S. Yagi, N. Tabata. Silent Discharge CW CO₂ Laser. IEEE/OSA Conference on Laser and Electro-Opt., Washington, D. C., 1981. WE5
- 2 M. Tanaka, S. Yagi, N. Tabata. High Frequency Silent Discharge and Its Application to CW CO₂ Laser Excitation. Proc. 8th International Conference of Gas Discharge and Their Application, Oxford, UK1985. 551, 554
- 3 H. Nagai, M. Hishii, M. Tanaka *et al.*. CW 20-kW SAGE CO₂ laser for industrial use. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(12): 2898~ 2909
- 4 Y. Ling, M. Qian, P. Lu. Study of a high-powered He-Ne laser having rectangular discharge crosssection. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(8): 4055~ 4058

Investigation of CO₂ Laser Assisted by Silent Discharge

Ling Yiming Xu Yibo Wu Xufeng Xu Jianjun

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210018)

Abstract A new type of CO₂ laser tube has been designed by using a plasma tube having rectangular discharge cross-section and is excited by both the axial glow discharge and the transverse silent discharge. In this paper, the principle of design is described and the transverse distribution of electron concentration in the laser tube is discussed theoretically. Furthermore, its working characteristics are studied experimentally and compared with those excited by the only DC glow discharge. Under the action of transverse silent discharge, the laser power, the gas-filled pressure and the fraction of N₂ in the laser are increased obviously, the laser efficiency is increased, too. Both the laser power and efficiency can be simultaneously optimized by choicing the discharge current.

Key words CO₂ laser, silent discharge, gas laser