

# 平板宽波导激光器直流放电特性研究\*

徐启阳 宋一新 王新兵 谢明杰 王金华 李再光

(华中理工大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**提要** 研究了平板宽波导激光器的直流放电特性和放电区内的气体温度分布。实验和理论分析表明,在给定放电区内最大气体温升的情况下,放电区内所允许的最大注入功率与放电面积成正比,即在直流电激励下平板宽波导激光器具有功率“面积放大”功能。从而为中、大功率 CO<sub>2</sub> 激光器小型化研究提供了新的途径。

**关键词** 平板宽波导激光器,直流放电

## 1 引言

“面积放大”型扩散冷却 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[1~3]</sup>,在结构、体积、功率及光束质量上所具有的优越性,正逐渐成为中、大功率 CO<sub>2</sub> 激光器发展的重要方向。目前,“面积放大”型 CO<sub>2</sub> 激光器主要采用射频(RF)来激励。为了克服 RF 源存在辐射伤害、调节范围小、匹配网络互换性差以及价格昂贵等缺点,用直流放电激励平板宽波导激光器是一个新的重要途径。

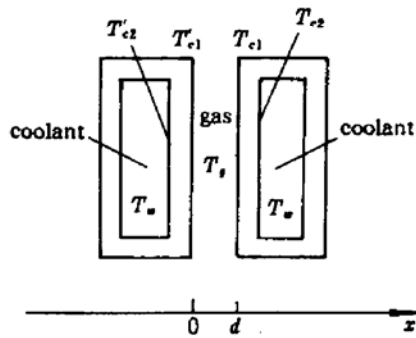


Fig. 1 Diagram of discharge temperature

## 2 放电区内的气体温度分布

在“面积放大”型 CO<sub>2</sub> 激光器中,由不流动放电气体扩散和导热所散发出来的热量,传输到两个相距很近的金属电极上,然后被电极内流动的冷却液所带走。在其传热过程中,包括工作气体和金属板的传热以及液体的强迫流动传热。

考虑如图 1 所示的放电结构,其中  $T_w$  为冷却水的温度,  $T_{c_2}$ 、 $T_{c_1}$  为电极与放电气体接触面的

温度。 $T_g(x)$  为放电区内工作气体的温度分布,  $d$  为放电间隙,  $\Delta d$  为电极板厚度。

在放电过程中,工作气体产生大量废热,因此对放电区内气体温度分布的求解,为一个含内热源的稳态热问题。据文献[4]、[5]论述,此类复杂的多维因素,可简化为一维近似。在一维近似条件下,有泊松方程成立

\* 国家教委科研基金资助项目。

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q^*}{K_g} = 0 \quad (1)$$

式中  $K_g$  为工作气体的导热系数,  $q^*$  为内热产生的功率密度。在均匀放电中,  $q^*$  为一常数<sup>[4,5]</sup>, 它与注入功率  $P_{in}$  有如下关系

$$P_{in} = A \cdot d \cdot q^* \quad (2)$$

式中  $A$  为放电电极面积。假设放电气体两边界上温度已知, 则(1)式的边界条件是, 当  $x=0$  时,  $T=T_1$ , 当  $x=d$  时,  $T=T_2$ 。对(1)式积分两次, 并将上述边界条件代入, 即可得到放电气体的温度分布

$$T_g(x) = \left( T_1 + \frac{T_2 - T_1}{d} \cdot x \right) + \frac{q^* \cdot d^2}{2K_g} \cdot \left[ \frac{x}{d} - \left( \frac{x}{d} \right)^2 \right]$$

因为与放电气体相接触的两电极上的导热率远大于气体本身的导热系数, 因此在不考虑接触热阻的条件下, 放电气体两边界面处的温度分别和与之相邻的电极面上的温度相等, 即有  $T_1 = T'_{c_1} = T_{c_1} = T_2$  成立。将这一关系代入上式, 可将  $T_g(x)$  写为

$$T_g(x) = T_{c_1} + \frac{q^* \cdot d^2}{2K_g} \cdot \left[ \frac{x}{d} - \left( \frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (3)$$

由(3)式可见, 由于内热功率密度  $q^*$  的影响, 放电区内气体温度沿  $x$  方向呈抛物线分布。 $T_g(x)$  在  $x=d/2$  (即放电中心) 达到最大, 其值

$$T_{g\max} = T_{c_2} + \frac{q^* \cdot d^2}{8K_g} = T_{c_2} + \Delta T_g \quad (4)$$

由于冷却液从电极上所带走的热量应与放电区内的气体发热的功率  $P_{heat}$  相等, 故

$$P_{heat} = 2Q = 2A \cdot h \cdot (T_{c_2} - T_w)$$

$$T_{c_2} = T_w + \Delta T_1 = T_w + \frac{P_{heat}}{2Ah} \quad (5)$$

$$\Delta T_1 = \frac{P_{heat}}{2A \cdot h} \quad (6)$$

当系统中注入功率为  $P_{in}$  时, 电极板温度

$$T_{c_1} = T_{c_2} + \Delta T_2 = T_{c_2} + \frac{P_{in} \cdot \Delta d}{2K_c \cdot A} \cdot T_{c_2} \quad (7)$$

$$\Delta T_2 = \frac{P_{in} \cdot \Delta d}{2K_c \cdot A} \cdot T_{c_2} \quad (8)$$

将(5)~(8)式以及(2)式代入(4)式, 可得

$$T_{g\max} = T_w + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_g = T_w + \frac{P_{in}}{2Ah} + \frac{P_{in} \cdot \Delta d}{2K_c A} + \frac{P_{in} d}{8K_g A} \quad (9)$$

式中  $h$  为液体传热系数,  $K_c$  和  $K_g$  分别为电极和放电气体传热系数, 且  $P_{in} = P_{heat}$ 。由(9)式可知

$$\Delta T_{\max} = \Delta T_{g\max} - T_w = \frac{P_{in\max}}{A} \cdot \left( \frac{1}{2h} + \frac{\Delta d}{2K_c} + \frac{d}{8K_g} \right)$$

所以

$$P_{in\max} = \frac{\Delta T_{\max}}{\frac{1}{2h} + \frac{\Delta d}{2K_c} + \frac{d}{8K_g}} \cdot A \quad (10)$$

由(10)式可知, 在给定放电区内最大允许温升情况下,  $P_{in\max}$  与放电面积  $A$  成正比, 即具有注入功率“面积放大”功能, 同时  $P_{in\max}$  随着放电间隙的增加而下降, 因此, 减小放电间隙有助于提

高注入功率密度。

### 3 实验结果

我们研制了一台平板宽波导激光器直流放电系统,电极结构如图 2 所示,电极通水冷却,其尺寸为宽 30mm,长 200mm。在一定气压比的  $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$  混合气体中,获得了均匀稳定的直流辉光放电。表 1 和图 3~6 分别列出了实验结果。

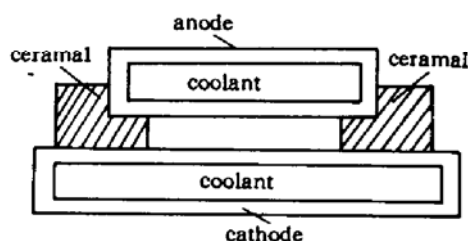


Fig. 2 Diagram of the electrode configuration

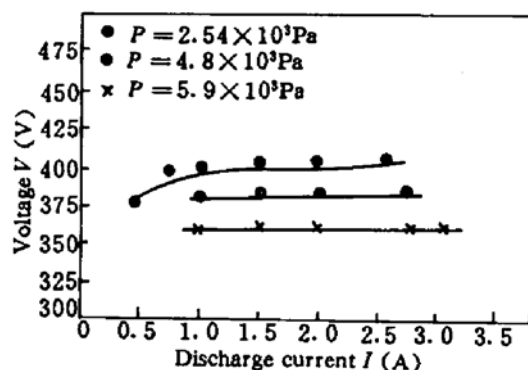


Fig. 3  $V$ - $I$  characteristics with different pressures

$\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:2:4, d=3\text{ mm}$

Table 1 Dependence of power density on discharge area

Discharge parameters	Results						
Discharge area $A$ ( $\text{cm}^2$ )*	25	30	39	45	54	60	60
Discharge current $I$ (A)	0.82	1	1.5	2	2.55	3	3.3
Input power $P_{in}$ (W)	311.6	380	570	760	969	1140	1254
Discharge volume $V$ ( $\text{cm}^3$ )	7.5	9	11.7	13.5	16.2	18	18
Power density $q^*$ ( $\text{W}/\text{cm}^3$ )	41.5	42	48.7	56.3	59.8	63.3	69.7

\* : Discharge area=length of the discharge $\times$ width of the electrode (3 cm)

( $P_{total}=4.7\times 10^3\text{ Pa}$ ,  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:3$ , discharge gap=3 mm, break down voltage  $V_0=700\text{ V}$ , sustained voltage  $V=380\text{ V}$ , load impedance  $R_L=100\ \Omega$ )

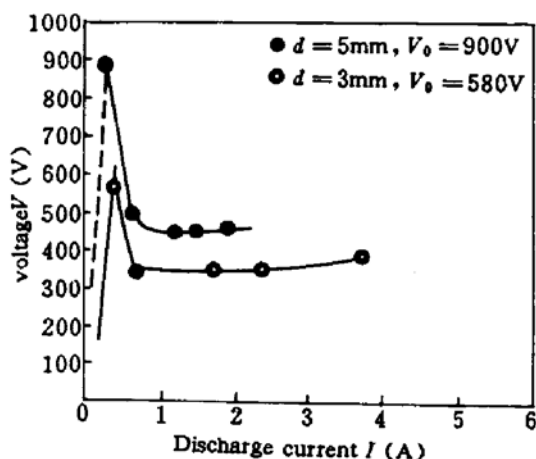


Fig. 4  $V$ - $I$  characteristics with different discharge gaps

$\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:4, P=3.2\times 10^3\text{ Pa}$

图 3 表明当放电气体气压上升时,气体粒子间的碰撞加剧,气体电离上升,使得放电所需要的维持电压下降。图 4 表明随着放电间距  $d$  的增加,着火电压  $V_0$  和维持电压  $V$  都上升,同时放电所达到的最大电流显著减少,这说明  $d$  的增加使放电变得困难。另外,随  $d$  的增加,放电气体的热输运速率下降,气体中的热效应增强,这样也使放电变得更困难和不稳定。因此在实际设计中,在条件允许的情况下,应选择小的放电间隙。图 5 表明随着放电面积的增加,放电注入功率密度也

增加。以上实验结果与(10)式理论分析基本上吻合。

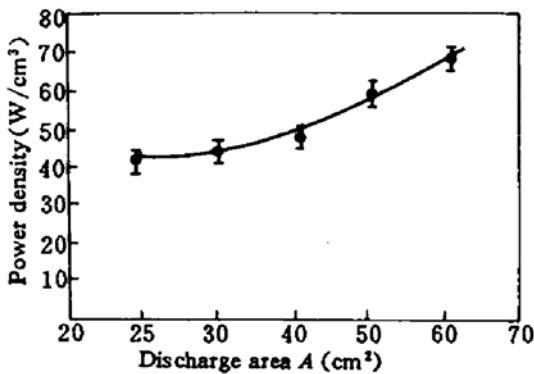


Fig. 5 Dependence of power density on scaling area

$\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:3$ ,  $d = 3 \text{ mm}$ ,  $P = 3.2 \times 10^3 \text{ Pa}$

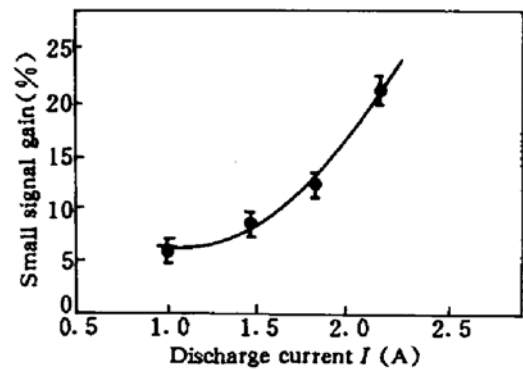


Fig. 6 Dependence of small signal gain on discharge current

$\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:4$ ,  $d = 3 \text{ mm}$ ,  $P = 3.2 \times 10^3 \text{ Pa}$

图 6 为实验中所测得放电气体介质小信号增益随放电电流变化的曲线。实验中采用一封离式玻璃管  $\text{CO}_2$  激光器,其输出在  $P_0 = 8 \text{ W}$  情况下很稳定。在放电装置第一道真空窗口处安装了一个透过率为 4.5% 的 GaAs 平镜片,8 W 的探测光经过该窗口后进入放电通道内的光束功率只有 320 mW 左右,完全满足了小信号增益测量的要求。第二个真空窗口采用了 95% 的 ZnSe 平镜。 $\text{CO}_2$  激光器输出光斑直径约为 2 mm,光束可通过间隙为 3 mm 放电通道。从图 6 可见,随着放电电流  $I$  的上升,小信号增益几乎呈线性增加,当  $I$  达到 2.1 A 时,介质中所测得的增益已达 20.1%,此时所对应放电区的长度为 20 cm。这就是说,在该放电条件下,我们从介质中获得的增益系数约为  $1\% \text{ cm}^{-1}$ ,这个结果与文献[6]在射频宽波导激光器中所测出的增益系数相当。

由表 1 可知,在标定的实验条件下,平板宽波导直流放电注入功率已达  $69.7 \text{ W/cm}^3$ ,这已超过目前快流  $\text{CO}_2$  激光器的水平。

## 4 结 论

平板宽波导  $\text{CO}_2$  激光器直流放电,在放电间隙小于 5 mm 下,可获得较大面积、高增益、稳定均匀的辉光放电。在给定放电区内最大气体温升情况下,放电区内允许的最大注入功率密度与放电面积成正比,其放电功率密度可高于快流器件,说明在直流放电激励下,平板宽波导激光器也具有“面积放大”功能,且具有大的潜力可以提高激光输出功率,从而为中、大功率  $\text{CO}_2$  激光器小型化研究提供了新的途径。

## 参 考 文 献

- 1 J. G. Xin, D. R. Hall. Compact, Multipass, Single Transverse Mode  $\text{CO}_2$  Laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 51 (7):469
- 2 K. M. Abramski, A. D. Colley, H. J. Baker *et al.*. Power Scalling of Large-Area Transverse Radio Frequency Discharge  $\text{CO}_2$  Lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 54(19):1833
- 3 D. R. Hall, H. J. Baker. Area sealing loots  $\text{CO}_2$ -laser performance. *Laser Focus World*, 1989, (10):77

- 4 M. P. Vaisfel'd, Yu. E. Pol'skil. Thermal Regime in a Coaxial Low-pressure CO<sub>2</sub> laser. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1981, 11(10):1360
- 5 李育德. 同轴放电 CO<sub>2</sub> 激光器的热状态. 中国激光, 1993, 20(3):224
- 6 R. C. Sharp. Measurements of Transverse-gain profiles in RF-excited CO<sub>2</sub> Gain Carities. *J. Appl. Phys.*, 1987, 61(11):5184

## A Study of the Properties of Glow Discharge in a Wide-planar-waveguide Laser Excited by DC

Xu Qiyang Song Yixin Wang Xinbing Xei Minje Wang Jinhua Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wahan 430074)

**Abstract** The properties and temperature distribution of gas discharge in a wide planar-waveguide laser excited by DC are presented. The results of a theoretic analysis and experiments show that the allowed maximum input electric power is propotional to the discharge area for a giving maximum gas temperature increase in the discharge region, and the "area scalling" law is valid in the wide planar-waveguide CO<sub>2</sub> laser excited by DC.

**Key words** wide-planar-waveguide laser, DC discharge