

# 横流 CO<sub>2</sub> 激光器中输出功率突变机理的研究

陈培峰 丘军林 龚志伟 唐宗化 陈义红 陈 涛

(华中理工大学激光研究所, 武汉 430074)

**提要** 通过实验和理论分析,发现非激活区气体中存在两个工作点,当功率超过某阈值时,工作点将发生跳变,从而引起 CO<sub>2</sub> 激光器功率突变。

**关键词** CO<sub>2</sub> 激光器,功率突变

## 1 引 言

横流 CO<sub>2</sub> 激光器在工业生产中已获得了愈来愈广泛的应用。激光器在生产线上的应用对激光器的稳定工作提出了愈来愈高的要求。但是在横流 CO<sub>2</sub> 激光器中当输出功率达到一定值后,有时会发生突变。当注入功率不变时,激光输出功率往往会突然下跌 10~20%。通过反复实验观察,我们发现这一突变过程具有以下共同特征: 1) 过程是突变的,整个过程在 1~2 min 内完成; 2) 突变过程发生之后,激光器稳定在新的工作点工作; 3) 突变过程发生之后,激光器两端谐振腔的波纹管迅速发烫,温升很明显; 4) 这一现象具有普遍性、规律性; 5) 排除了由于谐振腔突然变形的可能性。

根据上面这些实验现象,我们认为这种突发现象在横流 CO<sub>2</sub> 激光器中是固有性质之一。并且这一现象与谐振腔两端死区内的气体吸收有关。Haruhiko Nagai<sup>[1]</sup> 等人在研制高功率 CO<sub>2</sub> 激光器时也观察到了这一现象,但是未能给出合理的理论解释。本文希望能够从理论上解释这一突变现象。

## 2 理论模型及分析

在多次实验观察过程中,我们逐渐排除了由于激光谐振腔突然变形失调、放电状态突然发生变化等各种因素,最终发现是由于谐振腔两端死区内的气体吸收系数发生突变而引起输出功率的突变,并且同时观察到相当的气体温升。为了进一步确定,我们对谐振腔两端加以强迫冷却,迫使突变后的温度回复到初始状态,发现功率也同时回复到初始状态。由此认为正是由于死区气体的温升引起的吸收系数突变,从而引起

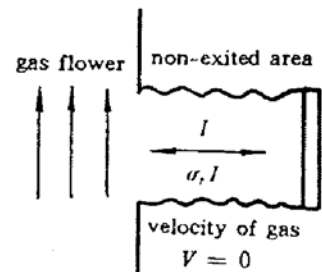


Fig. 1 The construction of the non-exited area

功率突变。因此,要分析这种输出功率突变现象,我们只需讨论死区内的气体状态变化。

与本文讨论现象有关的气体参量是吸收系数  $\sigma$  和气体温度  $T$ ,当然还应包括光强  $I$ (如图 1 所示)。现在首先求出这三个参量之间的关系。

关于气体温度的变化速率,可简单地写为

$$\frac{dT}{dt} = I \cdot \sigma - \frac{T - T_0}{t_c} \quad (1)$$

其中  $I$  为腔内光强, $\sigma$  为死区内的气体吸收系数, $t_c$  为描述死区内气体热传导的特征时间。

关于光强的变化方程,我们有

$$\frac{dI}{dt} = \left( \frac{g_0}{1 + I/I_s} - \sigma_c - \sigma \right) I \quad (2a)$$

其中  $g_0$  为小信号增益系数, $I_s$  为饱和光强, $\sigma_c$  为除死区内气体吸收外的其他损耗。为了分析方便,上式可近似为

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \left[ \frac{g_0}{1 + I_0/I_s} \left( 1 - \frac{I - I_0}{I_0 + I_s} \right) - \sigma_c - \sigma \right] I \\ I_0 &= \left( \frac{g_0}{\sigma_c + \sigma} - 1 \right) I_s \end{aligned} \quad (2b)$$

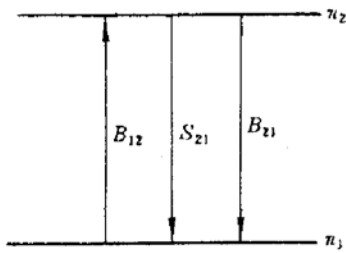


Fig. 2 Energy-level diagram of an idealized two-level system

相对来说比较困难的是推导  $\sigma$  的变化速率方程,假定气体对激光的吸收可用二能级系统来描述(如图 2 所示),则有

$$\sigma = \frac{h\nu}{NC} [B_{12}n_1 - B_{21}n_2]$$

为简单起见,令  $B_{12} = B_{21}$ ,则可求得

$$\frac{d\sigma}{dt} = + S_{21} \cdot A' - B \cdot \sigma$$

其中  $A' = (2h\nu/c) \cdot B_{12}$ ,  $B = 2B_{12}$  均为常数,而  $S_{21}$  随

温度升高而增大,则得

$$\frac{d\sigma}{dt} = A[1 + \alpha(T - T_0)] - B \cdot \sigma \quad (3)$$

其中取一级近似,令  $S_{21} = S_{21}^0 + \alpha'(T - T_0)$ ,则有  $A = S_{21}^0 A'$ ,  $\alpha = A' \cdot \alpha'$ 。

通过简单的推导,我们获得了关于三个参量的变化速率方程,在稳态工作情况下,上述三式均等于 0,则得稳态工作点方程:

$$T = T_0 + t_c \cdot I \cdot \sigma \quad (4)$$

$$I = I_s \left( \frac{g_0}{\sigma_c + \sigma} - 1 \right) \quad (5a)$$

$$\sigma = \frac{A}{B} [1 + \alpha(T - T_0)] = \sigma_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (6)$$

(5a) 式可近似为(当  $\sigma \ll \sigma_c$  时它总是成立的)

$$I = I_s' (1 - c\sigma), \quad I_s' = \left( \frac{g_0}{\sigma_c} - 1 \right) I_s, \quad c = \frac{g_0}{\sigma_c^2} \left( \frac{g_0}{\sigma_c} - 1 \right) \quad (5b)$$

由上述方程组可解得

$$\sigma_{\pm} = \frac{t_c I_s' - \frac{1}{\alpha \sigma_c} \pm \sqrt{\left(t_c I_s' - \frac{1}{\alpha \sigma_c}\right)^2 + 4 t_c I_s' c / \alpha}}{2 t_c I_s' \cdot c} \quad (7)$$

由于  $c = (1/\sigma_c)(1 - \sigma_c/g_0)^{-1} \ll 1/\sigma_0$ , 故

$$\sigma_- \approx 0 \quad (8)$$

$$\sigma_+ \approx \left(2 t_c I_s' - \frac{1}{\alpha \sigma_0}\right) / 2 t_c I_s' \cdot c \quad (9)$$

至此, 我们推出了系统的两个稳态工作点, 那么究竟系统工作于那一个工作点呢?

我们采用李雅普诺夫稳定性分析方法对(1)~(3)式进行稳定性分析, 即求以下矩阵的特征值  $\lambda$ 。

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{t_c} - \lambda & I_{\pm} & \sigma_{\pm} \\ A \cdot \alpha & -B - \lambda & 0 \\ 0 & -I_{\pm} & -\left(2\sigma_c - \frac{\sigma_c^2}{g_0}\right) - \lambda \end{bmatrix} = 0$$

其中  $I_{\pm}$  是与  $\sigma_{\pm}$  相应的稳定解。

详细的分析发现, 当  $I_s(g_0/\sigma_c - 1) > (B/A)(1/t_c)(1/\alpha)$  时,  $\sigma_-$  所对应的稳态解的本征值  $\lambda > 0$ , 即此时  $\sigma_-$  所代表的稳态解已不稳定, 而只有  $\sigma_+$  所代表的稳态解是稳定的, 不稳定阈值条件可表示为

$$I_{th} = I_s \left( \frac{g_0}{\sigma_c} - 1 \right) = \frac{B}{A} \frac{1}{t_c} \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sigma_0} \frac{1}{t_c} \frac{1}{\alpha} \quad (10)$$

当  $I_{th} < I$  时, 系统进入不稳定区, 上述阈值条件的推导比较烦, 这里就不详述了。

### 3 讨 论

3.1 在我们所讨论的系统中, 存在两个稳定的工作点, 当功率较低时, 系统工作于  $\sigma_-$  所对应的稳定工作点, 此时  $\sigma \approx 0$ 。在实验过程中, 我们确定发现在输出功率从 0 增加到 1800 W 过程中, 波纹管的温升只有 2 °C。

3.2 当功率增加到  $I_{th}$  以上时,  $\sigma_-$  所代表的工作点变为不稳定, 系统由  $\sigma_-$  变到  $\sigma_+$  所代表的工作点, 当然这一变化过程很快, 简单的分析表明在 1~2 min 内足以完成这一变化过程。当变化到  $\sigma_+$  所代表的工作点后,  $\sigma$  增大,  $I$  减小,  $T$  升高, 这与实验现象完全吻合。

3.3  $I_{th} = (1/\sigma_0)(1/t_c)(1/\alpha)$ , 其中  $\sigma_0$  为死区的气体特征吸收系数,  $\sigma_0$  越大, 则  $I_{th}$  越低,  $t_c$  代表气体特征导热时间, 气体导热越好, 则  $t_c$  越小,  $I_{th}$  越高,  $\alpha$  表示气体吸收系数受温度影响的敏感程度, 温度  $T$  对  $\sigma$  的影响越大, 则  $\alpha$  越大, 则  $I_{th}$  越低。

由此可见, 要使激光器长期稳定工作于较高的功率水平, 则  $I_{th}$  要尽可能大,  $\sigma_0$  和  $\alpha$  是由气体特性决定的, 不易随便改变, 因此, 只有提高  $t_c$  才是较可行的办法。

减小  $t_c$  有很多办法, 例如强迫冷却波纹管, 减少气体中杂质等等。

3.4 最后, 我们估算一下  $I_{th}$ 。由  $\sigma_0 = \sigma_0' \cdot (1/L \cdot A \cdot C_{pm} \cdot \rho)$  (其中  $\sigma_0'$  为光每通过死区介质一次的损耗, 其典型值为 1%;  $L$  为未激活区长度,  $A$  为光束横截面积,  $C_{pm}$  为气体定压比热,  $\rho$  为气体密度), 根据实际参数可求得  $\sigma_0 = 0.8 \times 10^{-2}$  °C/J,  $t_c$  与气体的导热系数  $\lambda_c$  和波纹管的传热

系数有关,与气体密度  $\rho$ ,比热  $C_p$  和激光束横截面积有关,具体计算较困难,但通过对未激活区气体热平衡时间的测量可估算出  $t_c \approx 1.2s$ ,根据参考文献[2,3],可估算出  $\alpha = 1.2 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,由此可求得  $I_{th} \approx 8.9 \text{ kW}$ ,实际观察到  $I_{th}$  大约为  $9.5 \text{ kW}$ ,由此可见上述理论分析与实际是相吻合的。

### 参 考 文 献

- 1 Haruhiko Nagai *et al.*. High-pressure sealed CW CO<sub>2</sub> Laser with High Efficiency. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, QE-18(3): 416~422
- 2 归振兴等. 闭环横流 CO<sub>2</sub> 激光器中突变吸收损耗机理的研究. *激光技术*, 1992, 16(2): 125~128
- 3 A. M. Robinson, N. Sutton. High temperature absorption in the 10.4  $\mu\text{m}$  band of CO<sub>2</sub>. *Appl. Opt.*, 1979, 18(2): 378~385
- 4 R. L. Taylor 等. CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 激光系统中重要过程的振动弛豫数据综述. 科技专题参考资料——激光,第六集,重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1975. 103

## The Mechanism of Sudden-change of Output Power of TF CO<sub>2</sub> Laser

Chen Peifeng Qiu Junlin Gong Zhiwei Tang Zonghua Chen Yihong Chen Tao

(*Laser Institute of Huangzhong University Science and Technology, Wuhan 430074*)

**Abstract** According to the experimental and theoretical results, it is found that there are two operation points in the non-exited area. When the output power exceeds a threshold, the operation point skips, resulting in a sudden-change of the output power of the CO<sub>2</sub> laser.

**Key words** CO<sub>2</sub> laser, output power