

# 同轴放电 CO<sub>2</sub> 激光器的热状态

李育德

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

## Thermal regime in a coaxial CO<sub>2</sub> laser

Li Yude

(Department of Opto-Electronic Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract** A theoretical analysis is made of the characteristics of the thermal regime in a coaxial low-pressure CO<sub>2</sub> laser and the output capability of the laser is compared with that of the conventional tubular lasers.

**Key words** coaxial CO<sub>2</sub> laser, thermal regime

本文视同轴放电室为等离子体,考虑双极扩散引起带电粒子在管壁复合为其消失的主要途径,确定带电粒子的空间分布并确定相应的热源函数、热状态,同时给出有关计算公式和结果。

### 1 带电粒子遵从双极扩散规律,管壁复合损失为主时的热状态

在连续或准连续同轴放电 CO<sub>2</sub> 激光器中,用于稳定放电的横向预电离<sup>[1]</sup>电脉冲宽度一般在 50~100 ns 范围,重复频率可为 4 kHz 或 10 kHz 量级,平均注入功率可为主放电注入功率的 10%,因而处于主放电纵向电场驱动下的带电粒子绝大部分时间无横向电场作用,所以在巨大管壁面上的复合是由双极扩散<sup>[2,3]</sup>过程决定的。文献[1,4]假定电子均匀分布,主要考虑了预电离对于电子均匀分布的作用和处理上的简化,由此确定的热状态<sup>[4]</sup>对于了解这种激光器的理想输出能力有帮助。这里着重考虑带电粒子的双极扩散,进而了解带电粒子非均匀分布对放电室热状态和对激光器输出能力的影响。为此,我们还需作如下假定:1. 假定同轴 CO<sub>2</sub> 激光器中电子能量分布近似符合麦氏分布,相应的依据为:弱电场下的气体中,电子能量分布近似保持麦氏分布<sup>[3]</sup>,普通管状 CO<sub>2</sub> 激光器放电管热源函数<sup>[2]</sup>的近似确定是以此为基础的;2. 假定预电离电场不是太强,平均注入功率远小于纵向主放电注入功率,预电离重复频率不太高,带电粒子绝大部分时间处于无横向电场条件,每次预电离建立的电子能量分布极快地过渡到麦氏分布;3. 带电粒子主要是由电子非弹性碰撞产生,其它途径产生的带电粒子及放电室内带电粒子的复合损失等可以忽略。带电粒子的损失仅发生于管壁的复合;4. 带电粒子平均自由程远小于放电室间隙。在前面叙述的物理条件和假定下,据[5]可推导出在除各预电离瞬

间外的绝大部分时间里同轴放电室内带电粒子密度  $n$  所满足的微分方程和单管情形具有相同的形式：

$$\frac{d^2 n}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dn}{dr} + \frac{Z}{D_a} n = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad (1)$$

式中  $D_a$  是双极扩散系数,  $Z$  是一个电子单位时间电离碰撞数。图 1 是同轴放电 CO<sub>2</sub> 激光器的示意图,  $R_2, R_1$  分别为放电室外、内管半径, 管壁厚度忽略,  $R_2 - R_1 = d$  是放电间隙大小。对(1)式作代换:  $r = R_0 + x$ , 其中  $|x| \leq d/2, R_0 = (R_1 + R_2)/2$ , 再将方程化成标准型, 用条件  $R_0 \gg d/2, R_0 \gg x$ , 可得方程(1)在所属区域的近似解, 经利用边界条件  $n(R_1) = n(R_2) = 0$ , 此解的最终结果如下式

$$n = n_0 \sqrt{R_0/r} \cos(\pi/d)(R_0 - r), \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad (2)$$

式中  $n_0$  为  $n(R_0)$ 。(2)式代表激光器连续或准连续工作状态整个时间内的带电粒子分布。设相应的热源分布函数为

$$Q = Q_{01} \sqrt{R_0/r} \cos(\pi/d)(R_0 - r) \quad (3)$$

式中：

$$Q_{01} = \frac{W_{1SP}(1 - \eta)(R_2^2 - R_1^2)}{2 \sqrt{R_0} \cdot F(R_2 - R_1)} \quad (4)$$

$Q_{01}$  由参照[3] 求出, 其中

$$F(R_2, R_1) = \cos\left(\frac{\pi}{d}R_0\right) \left[ R_2^{\frac{3}{2}} \sum_0(R_2) - R_1^{\frac{3}{2}} \sum_0(R_1) \right] + \sin\left(\frac{\pi}{d}R_0\right) \left[ R_2^{\frac{3}{2}} \sum'_0(R_2) - R_1^{\frac{3}{2}} \sum'_0(R_1) \right]$$

$$\sum_0(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{[(x/d)\pi]^{2n}}{(2n + \frac{3}{2})(2n)!}$$

$$\sum'_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{[(x/d)\pi]^{2n-1}}{(2n + \frac{1}{2})(2n-1)!}$$

$$x = R_2, R_1$$

$W_{1SP} = W_{1L}/\pi(R_2^2 - R_1^2)$  是单位体积平均注入功率,  $W_{1L} = W_1/L$  是单位长度注入功率, 以下的  $W_{2SP}, W_{2L}$  含义相同,  $\eta$  为激光器的转换效率。考虑热传导系数随温度变化<sup>[4]</sup>

$$K(T) = K_0(T/T_0)^a, \quad a \approx 0.7$$

$T_0$  为室温,  $K_0$  为室温时放电介质的热传导系数。令放电室沿径向的温度分布为  $T(r)$ , 则有

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ r \frac{dT^*(r)}{dr} \right] = - \frac{Q}{K_0}, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad (5)$$

式中  $T^*(r) = \frac{[T(r)]^{a+1}}{(a+1)T_0^a}, \quad T_0^* = T^*(R_2) = T^*(R_1) = \frac{T_0}{a+1}$

已设管壁温度为  $T_0$ , 将(3)式代入(5)式, 得其解为

$$T(r) = T_0 \left\{ 1 + \frac{W_{1SP}(1 - \eta)(a+1)(R_2^2 - R_1^2)}{2T_0 K_0 F(R_2, R_1)} \cdot F_1(R_2, R_1, r) \right\}^{\frac{1}{a+1}}, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad (6)$$

式中  $F_1(R_2, R_1, r) = \cos\left(\frac{\pi}{d}R_0\right) \left[ \left( \frac{\ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} \right) \cdot R_2^{\frac{3}{2}} \sum_1(R_2) - \left( \frac{\ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} - 1 \right) \cdot R_1^{\frac{3}{2}} \sum_1(R_1) - r^{\frac{3}{2}} \sum_1(r) \right]$

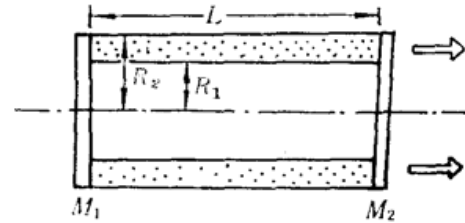


Fig. 1 Schematic diagram of the coaxial CO<sub>2</sub> laser

$$+ \sin\left(\frac{\pi}{d}R_0\right) \left[ \frac{\ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} \cdot R_2^{\frac{3}{2}} \sum_2(R_2) - \left( \frac{\ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} - 1 \right) \cdot R_1^{\frac{3}{2}} \sum_2(R_1) - r^{\frac{3}{2}} \sum_2(r) \right]$$

$$\sum_1(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{[(x/d)\pi]^{2n}}{(2n + \frac{3}{2})^2 (2n)!}$$

$$\sum_2(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{[(x/d)\pi]^{2n-1}}{(2n + \frac{1}{2})^2 (2n-1)!}$$

$x = r, R_1, R_2$

## 2 激光输出能力

同理可求出当热源沿放电室截面均匀分布时的温度分布为

$$T(r) = T_0 \left\{ 1 + \frac{W_{2SP}(1-\eta)(a+1)}{4T_0K_0} \cdot F_2(R_2, R_1, r) \right\}^{\frac{1}{a+1}}, \quad R_1 \leq r \leq R_2 \quad (7)$$

式中 
$$F_2(R_2, R_1, r) = \frac{R_1^2 \ln(R_2/r) + R_2^2 \ln(r/R_1) - r^2 \ln(R_2/R_1)}{\ln(R_2/R_1)}$$

对于普通单管 CO<sub>2</sub> 激光器, 当取

$$Q = Q_0 J_0 \left( 2.405 \frac{r}{R} \right)$$

放电管径向温度分布为

$$T(r) = T_0 \left\{ 1 + \frac{W_{0SP}(1-\eta)(a+1)R^2 J_0 [2.405(r/R)]}{T_0 K_0 (2 \times 2.405) J_1(2.405)} \right\}^{\frac{1}{a+1}}, \quad 0 \leq r \leq R \quad (8)$$

$R$  是放电管半径,  $W_{0SP} = W_{0L}/\pi R^2$ ,  $W_{0L} = W_0/L$  分别是单位体积和单位长度注入功率。令  $P_1, P_2$  为相应两种情况同轴放电激光器的输出功率,  $P_0$  为具有相同放电区长度的单管放电激光器的功率。则有:  $P_1 = \eta \cdot W_{1L}$ ,  $P_2 = \eta \cdot W_{2L}$ ,  $P_0 = \eta \cdot W_{0L}$ 。当  $d/(R_2 + R_1) \ll 1$ , 放电间隙  $R_0$  处有最高的温度。假定对于相同的壁温、配气和相同的激光转换效率  $\eta$ , 两种激光器分别在  $r = R_0$  和  $r = 0$  处有相同的温度限制, 即当(6), (7)式  $T(R_0)$  与(8)式  $T(0)$  相等时, 各单位长度注入功率  $W_{0L}$  均以相同的效率转换为激光, 则双极扩散、管壁复合为主时的输出功率

$$P_1 = \frac{F(R_2, R_1)}{2.405 J_1(2.405) F_1(R_2, R_1, r)_{r=R_0}} \cdot P_0 = n_1 P_0 \quad (9)$$

热源均匀分布时的输出功率为

$$P_2 = \frac{2(R_2^2 - R_1^2)}{2.405 J_1(2.405) F_2(R_2, R_1, r)_{r=R_0}} \cdot P_0 = n_2 P_0 \quad (10)$$

对参数  $R_1, R_2$  的几组取值我们对  $n_1, n_2$  进行了计算, 所得结果列入表 1, 依据[4]B 情形所计算的  $n_3 (P_3 = n_3 P_0)$  也列入表 1 中

Table 1. (length unit : mm)

$R_1$	$R_2$	$R_0$	$d = R_2 - R_1$	$n_1$	$n_2$	$n_3$
7	15	11	8	6.80	8.71	7.04
15	25	20	10	9.98	12.75	10.24
17	25	21	8	13.15	16.77	13.44
16	30	23	14	8.17	10.45	8.41
20	30	25	10	11.27	15.96	12.80
45	55	50	10	24.5	33.2	25.6

### 3 小 结

表 1 的结果表明由本文给出的结果 ( $n_1$ ) 与文献[4]假定的非均匀热源函数(B 情形) 所得结果( $n_3$ ) 相当一致。表 1 中所列数据多数是比较典型的。1 m 左右长的普通单管 CO<sub>2</sub> 激光器输出 40~50 W, 因此想要 1 m 左右的同轴 CO<sub>2</sub> 激光器有上千瓦的输出, 则须有外径达 10 cm 左右的同轴放电室, 如表 1 所给出最后一组数据。实际上, 上千瓦的同轴放电 CO<sub>2</sub> 激光器已经做出<sup>[6]</sup>。

经过计算, 放电间隙内最高温度并不在  $R_0$  处, 而是比  $R_0$  略小的位置, 这一情形是由于  $(R_1 + R_2)/d \gg 1$  的条件未严格满足造成的。从热源函数(3) 式我们可以看到由于因子  $\sqrt{R_0/r}$  而使热源总是略向内偏重, 当  $R_0$  较大而  $d$  又很小时, 此时  $\sqrt{R_0/r}$  变化较小, 情况就会好些。表 1 中各情形最高温度偏离  $R_0$  很小, 而情形为  $R_1 \approx 0.8R_0, (R_1 + R_2)/d \approx 5$  的情况较好或很好。

### 参 考 文 献

- 1 V. Yu. Kolesnikov et al., *Sov. J. Quant. Electr.*, **14**(5), 647(1984)
- 2 赫光生, 雷仕湛, 激光器设计基础, 上海科学技术出版社, 1979, 147, 149
- 3 杨津基, 气体放电, 科学出版社, 1983, 76, 81
- 4 M. P. Varsfel'd, Yu. E. Pol'skir, *Sov. J. Quant. Electr.*, **11**(10), 1360(1981)
- 5 J. D. Cobine, *Gaseous Conductors*, 1958, New York, 238~244
- 6 中国科学院安徽光机所, 光电子技术与信息, 6, 1991, 39

(收稿日期: 1992 年 3 月 19 日)