

高功率横流连续 CO₂ 激光器特性参数模拟

夏金安 程兆谷 雒江涛 张赵林 许国良

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 利用 CO₂ 激光器的简化速率方程模型,对高功率横流连续 CO₂ 激光器特性参数进行了全面的分析和探讨,建立了光腔小信号增益系数、饱和光强参数、激光输出功率和激光耦合输出窗口最佳透射率计算公式,其计算值与实验结果吻合,为激光器的设计和运行提供了快捷、简便的计算依据。

关键词 横流连续 CO₂ 激光器,小信号增益,饱和光强,激光输出功率,耦合窗透射率

1 引言

CO₂ 激光器已发展到相当成熟的阶段,广泛应用于工业各个领域,尤其是高功率 CO₂ 激光器已应用于激光切割、焊接、热处理和金属表面合金化等材料加工领域,发挥着愈来愈重要的作用,而激光器特性参数在这些加工中起决定作用。

激光器的特性参数包括光腔小信号增益系数、饱和光强、激光输出功率、光束发散角和激光耦合输出窗口透射率等,有关高功率 CO₂ 激光器特性参数的计算和预测已有不少报道,如文献[1~3]对光腔小信号增益系数、饱和光强参数作了计算,其结果与实验值较为接近,但要求建立详尽、精确的粒子数反转和能量转换动力模型。文献[4,5]则在前人工作的基础上,假设激光下能级 CO₂(00⁰1)粒子数为零,考虑激光器谐振腔内气流速度对 N₂ 和 CO₂ 分子激发态振动能级和能量转换的影响,同时考虑 CO₂ 分子在放电过程中电离对激光输出的影响,建立了激光简化方程模型,推导出光腔小信号增益系数和饱和光强参数的计算公式,其计算结果与实验值的误差很小。本文则在此基础上开展了更为深入的工作。首先分析了高功率 CO₂ 激光器的光腔损耗,随后探讨了激光输出功率和最佳耦合输出系数,并与实验结果进行了对比。

2 理论模型

2.1 光腔小信号增益系数和饱和光强参数简化计算模型

CO₂ 激光泵浦过程中由于激光下能级 CO₂(10⁰0)粒子的衰变速率比积累速率大得多,因而可假定此能级粒子数被抽空,则 N₂ 分子激发态粒子数和 CO₂(00⁰1)粒子数变化速率方程简化为^[4]

$$dN_2^*/dt = R - k(N_2^* \cdot N_c - N_c^* \cdot N_2) - N_2^*/t_0 \quad (1)$$

$$dN_c^*/dt = k(N_s^* \cdot N_c - N_c^* \cdot N_s) - I\sigma p(j)N_c^*/h\nu - N_c^*/t_c - N_c^*/t_v \quad (2)$$

I 为激光器谐振腔内光强, k 为 $\text{CO}_2(00^01)$ 和 $\text{N}_2(v=1)$ 粒子共振能级能量转换速率, 其中 N_c, N_s 分别为 CO_2 和 N_2 分子基态粒子数密度; N_c^* 为 $\text{CO}_2(00^01)$ 能级粒子数密度; N_s^* 为 N_2 激发态粒子数密度; $p(j)$ 为 $\text{CO}_2(00^01)$ j 转动能级分布函数; R 为 N_2 激发态振动能级粒子激发速率; t_c 为 $\text{CO}_2(00^01)$ 能级粒子碰撞弛豫时间常数; t_v 为气体流经增益区的特征时间; σ 为受激发射截面。

在稳定状态下得饱和增益系数为^[4]

$$g = \sigma \cdot p(j) \cdot N_c^* = \sigma \cdot R \cdot p(j) \cdot N_c / [N_s/t_v + (N_c + 1/k \cdot t_v)/t] \cdot \{1 + I \cdot \sigma \cdot p(j) \cdot (N_c + 1/k \cdot t_v)/h\nu [N_s/t_v + (N_c + 1/k \cdot t_v)/t]\} \quad (3)$$

式中 $1/t = 1/t_c + 1/t_v$, 由此得小信号增益系数和饱和光强参数 I_s 为

$$g_0 = \sigma \cdot R \cdot p(j) \cdot N_c / [N_s/t_v + (N_c + 1/k \cdot t_v)/t] \quad (4)$$

$$I_s = h\nu [N_s/t_v + (N_c + 1/k \cdot t_v)/t] / [\sigma \cdot p(j) \cdot (N_c + 1/k \cdot t_v)] \quad (5)$$

上述各式中 $R = n_e \cdot k_e \cdot N_s$, n_e 为电子密度; k_e 为 $\text{N}_2(v=1)$ 粒子激发速率。

在最佳运行条件下, R 可按式计算^[4]

$$R = f \cdot P_{in} / 4.66 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

式中 f 为输入电功率耦合到 N_2 激发态振动能级系数, 它的最大取值在 0.4~0.8 范围内^[6], P_{in} 为输入电功率。

2.2 光腔损耗

光腔损耗是激光器的重要参数, 它包含光腔的几何偏折损耗、衍射损耗和腔镜的吸收以及透射系数损耗。高功率横流 CO_2 激光器通常采用稳腔结构, 此种结构的光腔几何偏折损耗可假设为零。光腔衍射损耗取决于激光束的模式和腔的非涅耳数。非涅耳数愈大, 光腔衍射损耗系数愈小。一般情况下高功率横流 CO_2 激光器输出光束为低阶模。当非涅耳数大于 5 时, 光腔衍射损耗系数极小, 同腔镜的吸收、透射系数相比可以忽略不计。因此, 高功率横流 CO_2 激光器光腔损耗主要是腔镜的吸收和耦合输出窗口的透射损耗, 即

$$\text{Loss} = T + \alpha \quad (7)$$

式中 Loss 为光腔损耗, T 为输出窗口透射系数, α 为反射镜吸收系数。

2.3 激光器输出功率和最佳耦合输出窗口透射系数

激光器输出功率与光腔内光强、光束有效截面面积和耦合输出窗口透射系数有关, 考虑上述光腔损耗系数, 高功率横流 CO_2 激光器的输出功率为 P 为^[7]

$$P = \frac{1}{2} A T I_s \left(\frac{2g_0 l}{\alpha + T} - 1 \right) \quad (8)$$

其中 A 为光束有效横截面积, l 为增益区长度。最佳耦合输出透射系数为

$$T_{opt} = \sqrt{2g_0 l \alpha} - \alpha \quad (9)$$

2.4 腔模特征

如上所述, 高功率横流 CO_2 激光器通常采用稳腔结构, 而任何一个球面腔等价于一个共焦腔, 当腔的非涅耳数大于 1 时, 输出激光可近似用拉盖尔-高斯光束描述^[6]。镜片上光斑半径近似为表 1 中的值。其中 w_{ms1}, w_{ms2} 为腔镜上 TEM_{ms} 高阶横模光斑半径; w_{s1}, w_{s2} 分别为腔镜上基模光斑半径, 且^[7]

$$w_{s1} = \sqrt{L\lambda/\pi} \left[\frac{g_2}{g_1(1 - g_1g_2)} \right]^{1/4} \tag{10}$$

$$w_{s2} = \sqrt{L\lambda/\pi} \left[\frac{g_1}{g_2(1 - g_1g_2)} \right]^{1/4} \tag{11}$$

$$g_1 = 1 - L/r_1 \quad g_2 = 1 - L/r_2$$

L, r_1, r_2 分别为腔长和腔镜的曲率半径。

表 1 光斑半径

Table 1 Optical spot radii

Mode	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₂₀	TEM ₀₁	TEM ₁₁	TEM ₂₁	TEM ₀₂
$W_{ms1,2}$	$w_{s1,2}$	$1.50w_{s1,2}$	$1.77w_{s1,2}$	$1.92w_{s1,2}$	$2.21w_{s1,2}$	$2.38w_{s1,2}$	$2.43w_{s1,2}$

3 讨 论

文献[4]利用公式(4)对文献[1]的实验结果进行了计算,计算时假设 CO₂ 分子在放电过程中的电离度为 50%,其计算值与实验结果误差极小。本文利用公式(4)~(8)将计算值与实验值^[8]对比如表 2 和图 1 所示。其实验条件为:谐振腔为平凹腔,腔长 $L = 5.2$ m,激活介质长度 $l = 4$ m,全反镜曲率半径为 10 m,输出窗口为 ZnSe 平面镜。计算时假定 CO₂ 分子的电离度为 40%,取激光输出光斑半径为 $2.43w_s$ (w_s 为输出窗口表面上基模光斑半径),并取值 $\sigma \cdot p(j) = 5.776 \times 10^{-19}/p$ (Pa)cm²; $f = 0.6$; $t_c = 7.5 \times 10^{-5}/p$ (Pa)s; $t_v = 2.86 \times 10^{-4}$ s。其中 p 为激光器充气压力。

由表 2 可以看出,小信号增益系数的计算结果与实验值十分接近。不过增益区不同位置的小信号增益系数是不同的,可通过对方程式(6)中的 f 取不同的值进行修正。表 2 对应于该激光器最大增益区的小信号增益系数。图 1 表示在不同输入电功率和不同输出窗口透射系数下,充气压力为 4 kPa 时,激光器输出功率实验测量值和计算值的比较情况。由图可以看出,计算值与实验值变化趋势基本吻合,而且各最大功率值对应的

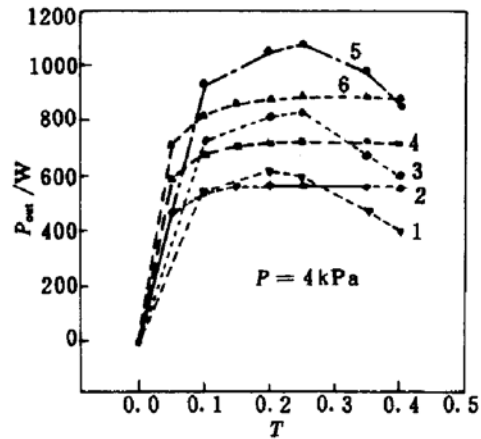


图 1 激光输出功率实验测量值和计算值比较

Fig. 1 The measured and the calculated values of output laser power

- 1: $P_{in} = 8$ kW measured; 2: $P_{in} = 8$ kW calculated;
- 3: $P_{in} = 10$ kW measured; 4: $P_{in} = 10$ kW calculated;
- 5: $P_{in} = 12$ kW measured; 6: $P_{in} = 12$ kW calculated

表 2 小信号增益系数实验值与计算值比较

Table 2 The experimental and the calculated values of small signal gain

Gas mixture CO ₂ :N ₂ :He	Pressure p / kPa	Input electrical power /kW	Small signal gain (measured)/%cm ⁻¹	Small signal gain (calculated)/%cm ⁻¹
1:2:7	4.0	10	0.51	0.505
1:2:7	4.67	10	0.45	0.402
1:2:7	5.33	10	0.36	0.359
1:2:7	4.0	8	0.44	0.404
1:2:7	4.0	12	0.58	0.606

位置基本相同,即对应的最佳输出耦合窗口透射系数计算值与实验值基本相同。由公式(9)得图中对应最佳透射系数在输入电功率为 8 kW, 10 kW, 12 kW 时分别为 23.4%, 26.4%, 29.1%。输出功率计算值偏低,这是因为输出功率与气体放电不均匀和光斑尺寸定义较小所致。总之,这些结果表明,本文速率方程模型简化是合理的,所得公式是正确的。

4 结 论

在工程设计和运行过程中,高功率 CO₂ 激光器的速率方程可由(1)和(2)式予以表述,其小信号增益系数、饱和光强参数、激光输出功率、最佳耦合输出透射系数可由公式(4)~(9)进行计算,而激光输出光斑半径可由表 1 求得。计算时,应考虑 CO₂ 分子在放电过程中电离对各参数的影响,并予以修正。此外,激光器中因气体放电不均匀,以致激发区各处增益系数不同,可对方程式(6)中的 f 取不同的值进行计算。激发态粒子数密度高的区域增益系数大,相应的 f 值就大,反之就小。计算光腔损耗时光腔衍射损耗可以忽略不计,因为在高功率 CO₂ 激光器中多采用稳定谐振腔结构,其衍射损耗系数极小,可以忽略不计,因而激光器输出功率和光腔耦合输出窗最佳透射系数主要取决于腔镜吸收系数。

参 考 文 献

- 1 M. J. Yoder, H. H. Lengner, J. H. Jacob *et al.*. Theoretical and experimental performance of a high-power cw electron-beam-sustained electric laser. *J. Appl. Phys.*, 1978, 49(6):3171~3180
- 2 E. Armandillo, A. S. Kaye. Modelling of transverse-flow cw CO₂ lasers; theory and experiment. *J. Phys. D*, 1980, 13(1):321~338
- 3 M. Kuzumoto, S. Ogawa, M. Tanaka *et al.*. Fast axial flow CO₂ laser excited by silent discharge. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, 26(6):1130~1134
- 4 A. K. Nath, A. K. Biswas. Optical gain and saturation intensity in a transverse-flow cw CO₂ laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, 33(8):1278~1281
- 5 A. K. Nath, M. Kumar. Scaling of laser power with N₂ partial pressure in a convective-cooled cw CO₂ laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, 29(4):1199~1204
- 6 O. Svelto. Principles of Laser (3rd ed). New York: Plenum Press, 1989. 52
- 7 Zhou Bingkun. Laser Principle. Beijing: National Defence Press, 1987. 188 (in Chinese)
- 8 G. Rabczuk, P. Kukilello, G. Sliwinski. Gain saturation intensity in a transverse-flow cw CO₂ laser. *Opt. and Laser Technol.*, 1995, 27(2):131~135

Modeling of Characteristic Parameters in a Transverse-flow CW CO₂ Laser

Xia Jin'an Cheng Zhaogu Luo Jiangtao Zhang Zhaolin Xu Guoliang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The characteristic parameters of a transverse-flow cw CO₂ laser are discussed and analyzed by the use of simplified rate equations for the population densities of N₂ vibrationally excited level and the CO₂ (00⁰1) level. The equations for the small-signal gain, the saturation intensity, the laser output power, and the optimal output-coupling coefficient of a resonator are presented. The calculated values are fairly close to the experimentally measured values.

Key words transverse-flow cw CO₂ laser, small-signal gain, saturation intensity, laser output power, optimal output-coupling coefficient of resonator