

优化封离型 CO₂ 激光工作气体的动力学机理研究^{*}

程 成

(浙江工业大学应用物理系 杭州 310032)

(2002 年 8 月 13 日收到 2003 年 3 月 5 日收到修改稿)

详细讨论了封离型 CO₂ 激光器中 CO₂, N₂ 和 He 三混合气体含量被优化组合后的激光动力学机理. 气体优化可以提高激光输出功率的主要机理是通过适当增加 N₂ 含量, 使 N₂ 激发态与 CO₂ 激光上能级的碰撞频率增加, 提高了激光能级粒子数密度和相对布居数. 同时, 适当减少 CO₂ 含量, 使总的电子动量输运碰撞频率减小, 放电电流增大, 导致增加激光上转动能级的弛豫速率和减小能级寿命, 从而提高了谐振腔内的激光饱和光强.

关键词: CO₂ 激光, 气体动力学, 强化机理

PACC: 4255, 4255D

1. 引 言

CO₂ 激光器是一种重要的气体激光器. 近年来, CO₂ 激光器已经发展出许多类型, 有封离型、快轴流型、横向激励型、波导阵列型等^[1]. 不论是哪种类型, 它的激光工作物质都含有 CO₂, N₂, He 等气体. 输出激光功率以及光斑模式等与气体的种类及其含量密切相关.

在 CO₂ 激光的研究中, 人们建立了许多动力学模型, 例如: CO₂ 激光的有效二维模型^[2]、三动力学方程^[3]、六温度数学模型^[4]等, 详细研究了 CO₂ 激光动力学性质(如文献[5]). 人们已经搞清楚 CO₂ 激光主要的动力学机理(例如: 激光振动-转动能级及其激励和湮没机制、N₂ 和 CO 分子的碰撞共振转移), 各能级的激励和弛豫过程的碰撞截面或速率系数也都已经获得. 但是, 在激光器的实际研制中, 例如对于充入激光器几种不同工作气体(CO₂, N₂, He)的含量和比例多少为最佳, 通常仍由实验来估计. 由于实验的局限性, 得到的并不一定是最佳气体组合. 文献[6, 7]提出了气体激光器(铜蒸气激光 CVL 和 CO₂ 激光)设计的一种新的方法. 对于 CO₂ 激光器, 根据激光动力学过程, 建立激光工作物质粒子数速率方程, 应用全局优化的遗传算法, 以输出激光功

率为目标函数, 通过计算机数值模拟, 可同时优化确定 CO₂ 激光器三混合气体的最佳充气量和比例, 并通过实验进行了验证. 优化后, 计算的激光输出功率可提高 96%, 实测提高约 60%^[7]. 本文在此基础上, 根据数值计算结果, 通过比较优化前后的激光能级粒子数密度、激光能级相对布居数、小信号增益、激光饱和光强、气体温度和电子碰撞动量输运频率等参量, 较为详细地讨论了气体优化对激光动力学机理的影响, 为今后设计同类型的激光器提供参考.

2. CO₂ 激光动力学过程简述

2.1. 动力学过程

图 1 为 CO₂ 激光部分能级示意图. 激光跃迁为 00⁰1→10⁰0(10.6 μm) 和 00⁰1→02⁰0(9.6 μm). 图 2 为 CO₂ 激光跃迁振动-转动能级示意图. 在一定温度下, 由于转动能级的竞争效应, 首先获得振荡并得到持续增长的是具有最大增益的振动-转动跃迁, 其余转动能级将补充已经获得振荡的转动谱线能级. 因此, 可只考虑 00⁰1→10⁰0(10.6 μm) 的一条谱线振荡, 例如在温度为 400 K 时, 转动能级量子数 J' = 19→J = 20 的 P(20) 跃迁(图 2 中粗线, 下面以 P(20) 为例). 略去一些次要因素, 考虑在激光管内共有 13

^{*} 浙江省自然科学基金(批准号: 602098)资助的课题.

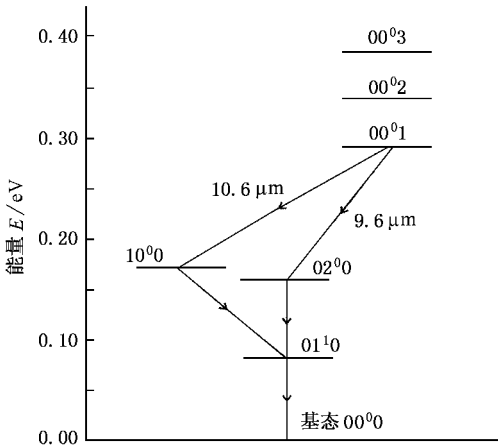


图 1 CO₂ 激光部分能级示意图

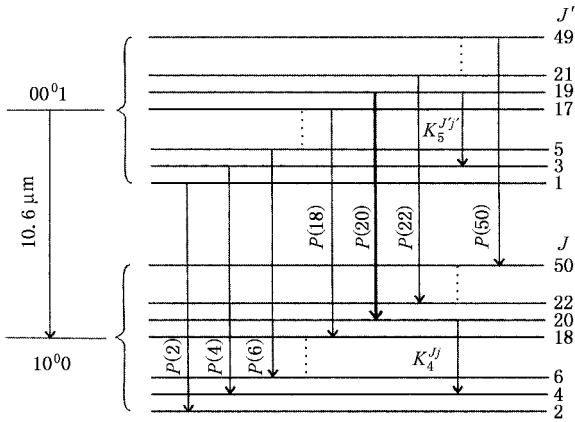


图 2 CO₂ 激光跃迁振动-转动能级示意图

种粒子或能级: 7 个 CO₂ 能级: 00⁰ 0, 01¹ 0, 02⁰ 0, 10⁰ 0, 00⁰ 1, 00⁰ 2, 00⁰ 3; 2 个 N₂ 能级: N₂(ν = 0), N₂^{*}(ν = 1, 2, 3, ...); 2 个 CO 能级: CO(ν = 0), CO^{*}(ν = 1); He; 电子 e. 与粒子数密度变化有关的主要激光动力学过程如下:

(0) 分子的电子碰撞离解-复合

$$M + e \leftrightarrow M_1 + M_2 + e - \epsilon_1,$$

其中 M = CO₂, N₂, CO, He (以下过程符号的含义相同), M₁, M₂ 为离解产物, ε 为电子能量得失.

(1) 电子碰撞激发-去激发

$$CO_2(00^0 0) + e \leftrightarrow CO_2(01^1 0, 00^0 1, 00^0 2, 00^0 3) + e - \epsilon_2,$$

$$M + e \leftrightarrow M^* + e - \epsilon'_2,$$

其中分子基态 M = N₂(ν = 0), CO(ν = 0), * 表示激发态(ν = 1, 2, 3, ...). 由于 He 的激发能很高, 电子碰撞 He 生成 He^{*} 的作用可以忽略.

(2) 共振转移激励

CO₂(00⁰ 0) + M^{*} ↔ CO₂(00⁰ 1) + M - E₃,
 CO₂(10⁰ 0, 02⁰ 0) + M ↔ CO₂(10⁰ 0, 02⁰ 0) + M + E'₃,
 其中 M^{*} 为激发态 N₂^{*}(ν = 1, 2, 3, ...), CO^{*}(ν = 1), E 为对应过程的重粒子能量损失. 第二个过程为费米共振交换, M 为基态 N₂(ν = 0), CO(ν = 0) 和 He, 上角标表示费米混合态.

(3) 激光上能级 00⁰ 1 粒子碰撞弛豫

$$CO_2(00^0 1) + M \rightarrow CO_2(00^0 0, 10^0 0, 02^0 0) + M + E_4.$$

(4) 激光下能级 10⁰ 0 粒子碰撞弛豫

$$CO_2(10^0 0, 02^0 0) + M \rightarrow CO_2(01^1 0) + M - E_5,$$

$$CO_2(10^0 0, 02^0 0) + M \rightarrow CO_2(01^1 0) + M + E_5.$$

(5) CO₂(01¹ 0) 能级粒子碰撞弛豫

$$CO_2(01^1 0) + M \rightarrow CO_2(00^0 0) + M + E_6.$$

(6) 管壁消激励

$$CO_2(01^1 0, 00^0 1) + \text{管壁} \rightarrow CO_2(00^0 0).$$

(7) 受激辐射-吸收

$$CO_2(00^0 1) + h\nu \leftrightarrow CO_2(10^0 0) + h\nu + h\nu.$$

(8) 自发辐射

$$CO_2(00^0 1) \rightarrow CO_2(00^0 0, 10^0 0, 02^0 0) + h\nu',$$

$$CO_2(00^0 2) \rightarrow CO_2(00^0 1) + h\nu''.$$

2.2. 激光振动-转动能级跃迁

考虑多能级系统. 取 P 支跃迁上下能级群组总转动能级数 m = 50. 根据上述激光动力学过程, 上激光转动能级 (J') 和下激光转动能级 (J) 及其上下能级群组的粒子数速率方程为

$$\frac{dn_5}{dt} = n_e(n_1 r_{15} - n_5 k_{15}) + n_1(n_9 r_{2,1} + n_{11} r_{2,2}) - n_5 r_3 - n_5 r_{6,5} W D_n - \left[n_5(A_{54} + A_{53} + A_{51}) + n_6 A_{65} \right] + \left(\sum_{j \neq J}^{j'=J} n_{15}^j k_5^{j'J} - \sum_{j \neq J'}^{j=J} n_5 k_5^{JJ'} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dn_{15}}{dt} = - \left(\sum_{j \neq J'}^{j=J} n_{15}^j k_5^{j'J} - \sum_{j \neq J}^{j=J'} n_5 k_5^{JJ'} \right), \quad (2)$$

$$\frac{dn_4}{dt} = (n_3 k_F - n_4 r_F) + n_5 r_3 - n_4 r_4 + W D_n + (n_5 A_{54} - n_4 A_{42}) + \left(\sum_{j \neq J}^j n_{14}^j k_4^{jJ} - \sum_{j \neq J}^j n_4 k_4^{Jj} \right), \quad (3)$$

$$\frac{dn_{14}}{dt} = - \left(\sum_{j \neq J}^j n_{14}^j k_4^{jJ} - \sum_{j \neq J}^j n_4 k_4^{Jj} \right), \quad (4)$$

式中,角标 4,5 分别表示激光下、上转动能级,角标 14,15 分别表示激光下、上转动能级所在的振动能级群组, n_e 为电子密度, $r_{i,s}$ 和 $k_{i,s}$ 为 s 粒子在前述的第 i 个动力学过程的速率系数及逆过程速率系数, r_F 和 k_F 为费米能级交换速率系数及逆过程速率系数, W 为受激辐射频率,反转粒子数 $D_n \equiv n_5 - (g_5/g_4)n_4$ (g_5, g_4 分别为激光上、下能级统计权重), A_{ij} 为 $i \rightarrow j$ 态自发跃迁概率, n_{15}^j, n_{14}^j 是激光上、下转动能级群组 j' 和 j 能级数密度, $k_5^{j'j}, k_4^{j'j}$ 为上转动能级群组内 $j'(=1,3,5,\dots,m-1) \rightarrow j'(=19)$ 和下转动能级群组内 $j(=2,4,6,\dots,m) \rightarrow j(=20)$ 的弛豫速率系数, $k_5^{jj'}, k_4^{jj'}$ 为反向速率系数. 由于激光跃迁仅发生在转动能级 $J' \rightarrow J$ 之间(对应角标 $5 \rightarrow 4$),亦即其他转动能级(对应角标 15,14)只在本能级群组内迅速发生跃迁或弛豫(转动能级的弛豫速率远大于其他速率,约大 2—3 个数量级以上),因此(2)(4)式只含转动能级群组内的作用项. 粒子下角标标号 $1 = \text{CO}_2(00^00), 2 = \text{CO}_2(01^10), 3 = \text{CO}_2(02^00), 4 = \text{CO}_2(10^00), 5 = \text{CO}_2(00^01), 6 = \text{CO}_2(00^02), 7 = \text{CO}_2(00^03), 8 = \text{N}_2(\nu=0), 9 = \text{N}_2^*(\nu=1,2,3,\dots), 10 = \text{CO}(\nu=0), 11 = \text{CO}^*(\nu=1)$.

以方程(1)为例,对各项物理含义说明如下:第一项为前述过程(1)电子碰撞激发-去激发对上激光转动能级 00^01 ($J' = 19$) 粒子数的贡献,第二项为过程(2)中与激发态 $\text{N}_2^*, \text{CO}^*$ 的共振转移激励,第三项为激光上能级的重粒子碰撞弛豫,第四项为过程(6)的管壁消激励,第五项为受激辐射的贡献,第六项为自发辐射,最后一项为 $J' = 19$ 转动能级与能级群内其他 j' 转动能级的粒子数交换. 上下转动能级群组的粒子数布居各自满足玻尔兹曼分布. 各弛豫和激发速率系数、受激辐射截面、自发辐射概率等原子数据,可见文献[8].

在共振腔中,激光输出功率可归纳为^[7]

$$P_{\text{laser}}(P_{\text{CO}_2}, P_{\text{N}_2}, P_{\text{He}}) = \pi R^2 f \eta T \beta g_0(P_{\text{CO}_2}, P_{\text{N}_2}, P_{\text{He}}) \times I_s(P_{\text{CO}_2}, P_{\text{N}_2}, P_{\text{He}}), \quad (5)$$

式中 R 为激光管半径, f 为归一化因子(可由实测激光功率来确定), η 为放电管利用率, T 为谐振腔出射镜透射率, β 为在出射镜上的归一化光强, P 为气体压强, I_s 为激光饱和光强. 这里 R, η, T 均不随气压变化,随气体压强变化的 β, I_s 的计算可见文献[7,8].

遗传算法的特点是全局优化,它可以同时确定需要优化的几个参数,因而可以避免“局部最优”. (5)式中,由三气体压强的不同组合,可得到不同的激光功率. 我们在文献[7]中,应用遗传算法,以输出激光功率为目标函数,把需要优化的气压参数作为遗传算法中的基因,基因随机产生并组成数百条染色体. 对每一条染色体由(5)式计算其对应的目标函数值(即激光功率),并依据目标函数值的大小进行优劣排队,保留目标函数值大的,淘汰目标函数值小的. 用“二元竞争”法选择母本,形成新一代的子染色体. 基因经历突变,重复循环 20—30 代,最终使计算的各目标函数值趋于同一个最大值,可确定最佳染色体的基因组合,亦即最优的三个气体压强参数 $P_{\text{CO}_2}, P_{\text{N}_2}$ 和 P_{He} .

优化是针对 1.2 m 长激光管、放电电压恒为 15 kV、谐振腔为平-凹腔的封离型激光器进行的. 在计算过程中仅对三气体参量进行优化,谐振腔参数采用先前已经优化得到的数据^[9]. 优化后,模拟和实测的激光横模仍为基模.

3. 激光优化机理分析

表 1、表 2 给出了优化前后的激光器参量以及激光动力学参量.

表 1 优化前后的激光器参量

	凹面反射镜曲率 半径 R/m	出射镜反 射率 R_2	放电管直径 d/cm	CO_2 压强 $P_{\text{CO}_2}/\text{Pa}$	N_2 压强 P_{N_2}/Pa	He 压强 P_{He}/Pa	放电电流 I_d/mA	激光功率 $P_{\text{laser}}/\text{W}$	效率 $\eta/\%$
优化前	3—5	0.51	1.0	399.96	399.96	1999.80	30.2	~ 55	~ 12
优化后	10	0.711	1.10	153.32	981.24	1777.16	43.7	108	16.5

注:优化前为实验及计算值,优化后为计算值.

表 2 优化前后计算的激光动力学参量

	激光上能级 粒子数 n_5/cm^{-3}	激光下能级 粒子数 n_4/cm^{-3}	反转粒 子数 D_n/cm^{-3}	相对粒 子数 $n_5/\sum n_{\text{CO}_2}$	相对粒 子数 $n_4/\sum n_{\text{CO}_2}$	电子 温度 T_e/eV	电子 密度 n_e/cm^{-3}	小信号 增益 g_0/cm^{-1}	饱和 光强 $I_s/\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	激光上能 级寿命 τ_u/s	平均气体 温度 T_g/K
优化前	4.47×10^{14}	4.55×10^{14}	1.27×10^{13}	0.71%	0.72%	0.876	2.66×10^{10}	0.011	58.1	1.33×10^{-5}	554
优化后	9.55×10^{14}	9.83×10^{14}	1.17×10^{13}	3.42%	3.52%	0.873	2.60×10^{10}	0.010	78.9	0.99×10^{-5}	651

由表 1 可知, 优化后 CO₂ 压强 P_{CO_2} 减少了一半多, N₂ 压强 P_{N_2} 增加为原先的两倍多, He 压强 P_{He} 变化不大. 效率从 12% 左右提高到 16.5%, 放电电流 I_d 从 30.2 mA 增加到 43.7 mA. 由表 2 可知, 优化后激光上下能级粒子数密度均增大了一倍多(上能级 n_5 从 $4.47 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $9.55 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 下能级 n_4 从 $4.55 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $9.83 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) 相对粒子数布居分别从 0.71% 和 0.72% 增加到 3.42% 和 3.52%. 反转粒子数 D_n 或者小信号增益 $g_0 (= \sigma_e D_n, \sigma_e$ 为受激辐射截面) 则略有下降, 这与一开始提出是由于反转粒子数(或增益)增大导致激光功率提高的想法不同. 注意到电子密度 n_e 和电子温度 T_e (取决于放电电压)几乎没有什么变化. 值得注意的是, 激光饱和光强 I_s 明显地从 58.1 W/cm^2 增加到 78.9 W/cm^2 . 下面详细分析优化导致激光功率增大的原因.

3.1. N₂ 对激光能级粒子数布居的作用

由方程(1)可知, 决定激光上能级粒子数密度 $n_5(00^0 1)$ 的变化有七项. 根据我们的计算, 在优化过程中, 第二项(激发态 N₂^{*}, CO^{*} 的共振转移激励)起主要作用, 它从 $2.55 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 增大到 $4.20 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 其它项数量级的变化比它小约一个量级. 这正如人们原先所知的那样, 由于激发态 N₂^{*} 具有与 CO₂(00⁰1) 很接近的能级(只相差 $\pm 18 \text{ cm}^{-1}$) 以及相当大的碰撞交换速率(速率系数为 $142.52 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} [10]$), 优化后气压 P_{N_2} 或 N₂ 粒子数增大了一倍多, 通过更多的碰撞交换, 使激光上能级 $n_5(00^0 1)$ 的粒子数明显增加. 另一方面, n_5 的减少主要通过受激辐射项(方程(1)第五项), 它的作用比弛豫过程(3)大一倍以上, 这是激光效率 η 提高的一个重要原因.

对于下能级粒子数 $n_4(10^0 0)$ 数据分析表明, 起主要作用的是第一项(费米能级碰撞交换)和第三项(过程(4)激光下能级 10⁰0 碰撞弛豫). 优化后, 费米

能级碰撞交换速率从 $3.23 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 增大到 $9.87 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 即优化使 $n_3(02^0 0) \rightarrow n_4(10^0 0)$ 的净交换速率增加了, 这是不利的. 同时, 激光下能级与其他粒子的碰撞弛豫速率从 $6.57 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 增大到 $1.43 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 它使 n_4 减小. 它们相互竞争, 最终使 n_4 的消激励速率减小, 这是气体优化使 n_4 积累增多的不利因素之一.

为了进一步分析 N₂ 的作用, 在保持优化压强 $P_{\text{CO}_2} = 153.32 \text{ Pa}$, $P_{\text{He}} = 1777.16 \text{ Pa}$ 的条件下, 我们计算了激光上、下能级粒子数密度 n_5, n_4 , 反转粒子数

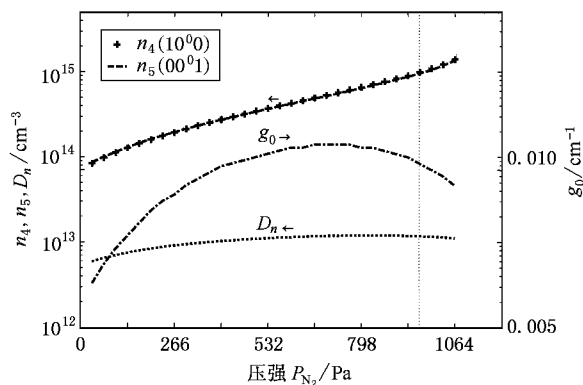


图 3 激光上下能级粒子数密度 n_5, n_4 , 反转粒子数密度 D_n 和小信号增益 g_0 随压强 P_{N_2} 的变化

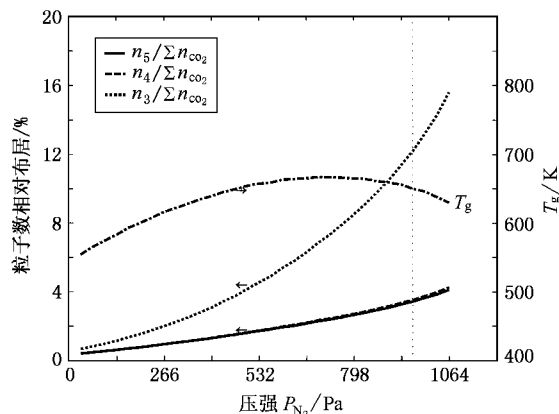


图 4 激光能级粒子数相对布居以及气体温度随压强 P_{N_2} 的变化

密度 D_n 和小信号增益 g_0 随压强 P_{N_2} 的变化(图3). 由图3、图4可见,随着压强 P_{N_2} 的增大,在维持放电电压不变的情况下,气体温度逐步下降.同时,随着压强 P_{N_2} 的增大,由于 $(01^1 0) \rightarrow (00^0 0)$ 的碰撞弛豫速率很大 $(4.875 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}[10])$;“掏空”了能级 $(01^1 0)$,结果使激光下能级 $(10^0 0)$ 的弛豫加快,从而使激光上、下能级粒子数相对布居上升.但是,随着压强 P_{N_2} 的进一步增大, $n_3(02^0 0)$ 相对布居数的增加远快于 $n_4(10^0 0)$ 和 $n_5(00^0 1)$ (见图4),即粒子数将在 $n_3(02^0 0)$ 能级大量地被积累起来.通过 $n_3 \leftrightarrow n_4$ 之间的碰撞交换,使 n_4 亦被积累,反而削弱了粒子数反转,这是压强 P_{N_2} 不能太高的主要原因,即 N_2 压强存在一个最佳值.显然,最佳 N_2 压强与 CO_2 压强以及激光的工作条件有关.

优化使激光上、下能级粒子数密度两者均增大,其直接外因是平均气体温度增高, T_g 从 554 K 增加到 651 K(表2).计算数据表明,优化之前,激光振动发生在上、下转动能级 $J' = 21 \rightarrow J = 22$.优化之后,随着温度的提高,激光振动发生在 $J' = 23 \rightarrow J = 24$.即在该 J', J 处,粒子数密度布居最大.上、下转动能级粒子数布居仍满足玻尔兹曼分布.

3.2. 激光饱和光强

从(5)式可知,激光输出功率正比于激光饱和光强 I_s .图5给出了激光饱和光强 I_s 、放电电流 I_d 和激光功率 P_{laser} 随压强 P_{N_2} 变化(其他两种气体压强保持为优化压强),图6是它们随 P_{CO_2} 的变化.由图5、图6可见,饱和光强 I_s 随压强 P_{N_2} 或 P_{CO_2} 呈线

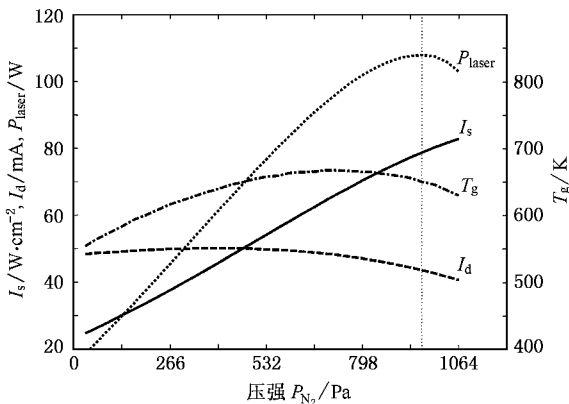


图5 激光饱和光强 I_s 、放电电流 I_d 和激光功率 P_{laser} 随压强 P_{N_2} 的变化

性增大.饱和光强定义为 $I_s = h\nu [\sigma_e (\tau_u + \tau_l)]$ 其中 $h\nu$ 为激光光子能量, σ_u, σ_l 分别为激光上、下能级寿命.受激辐射截面 σ_e 为谱线线型的函数,在不同气压下它的变化很小).根据数据分析,我们用以

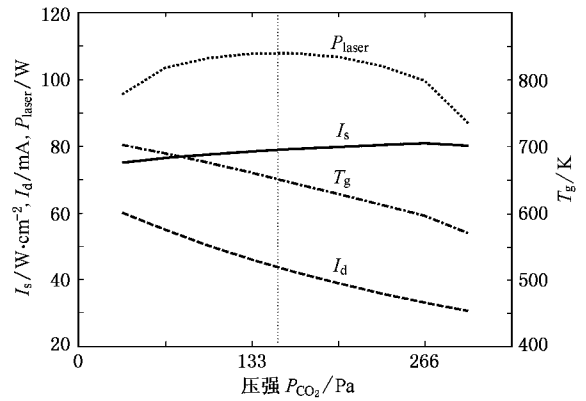


图6 激光饱和光强 I_s 、放电电流 I_d 和激光功率 P_{laser} 随压强 P_{CO_2} 的变化

下式子表示饱和光强增大的原因:

$$I_s \uparrow \leftarrow \tau_u \downarrow \leftarrow \sum n'_{15} (k_{1,5} n_e + r_3 + r_{6,5} + \sum_{i < 5} A_{5 \rightarrow i}) \uparrow \leftarrow n'_{15} \uparrow, r_3 \uparrow \leftarrow T_g \uparrow \leftarrow I_d \uparrow,$$

式中 n'_{15} 为激光上转动能级 j' 的数密度, r, k 为与下角标对应的激光动力学过程的速率系数、逆过程速率系数,其中 $r_3 = \sum_i P_i r_{3,i}$ (P_i 为第 i 种分子气体压强, $r_{3,i}$ 为对应的速率系数), A 为自发辐射概率.对 n'_{15} 的求和项为能级的弛豫速率(单位为 $\text{cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$),能级寿命为 $\tau_u = n_5 / \sum n'_{15} (k_{1,5} n_e + r_3 + r_{6,5} + \sum_{i < 5} A_{5 \rightarrow i})$.由上式可见,导致饱和光强 I_s 增大的最终原因是放电电流增加.那么,在放电电压恒定的情况下,是什么原因使放电电流增加呢?表3列出了优化前后与放电电流有关的数据比较.

表3 优化前后与放电电流有关的数据比较

		CO_2	N_2	CO	He	总计
动量运输碰撞速率系数						
$r_{\text{mol}} / 10^{-8} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}[11]$		9.68	0.959	~1	1.01	
分子数密度						
$n_{\text{mol}} / 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	优化后	0.276	2.331	0.094	4.292	
	优化前	0.814	0.966	0.153	4.830	
动量运输碰撞频率						
$\nu'_{e, \text{mol}} = n_{\text{mol}} r_{\text{mol}} / 10^9 \text{ s}^{-1}$	优化后	2.675	2.236	0.094	4.335	9.340
	优化前	7.879	0.926	0.153	4.878	13.836
电导率						
$\sigma / \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	优化后					0.0783
	优化前					0.0541

分析表 3 中的数据,有如下过程:

$$I_d \uparrow \Leftarrow \sigma \uparrow \Leftarrow \nu'_e \downarrow \Leftarrow \sum (n_{\text{mol}} r_{\text{mol}}) \downarrow \Leftarrow n_{\text{CO}_2} \downarrow,$$

式中 $I_d = \int_0^R \sigma E_1 2\pi r dr$, 其中 R 为放电管半径, 电导率 $\sigma = e^2 n_e / m_e \nu'_e$, E_1 为放电电场, n_e 为电子密度, m_e 为电子质量, 电子动量输运碰撞频率 $\nu'_e \equiv \sum n_{\text{mol}} r_{\text{mol}}$ (n_{mol} 为分子数密度, r_{mol} 为对应分子的动量输运碰撞速率系数). 当保持放电电压不变时, 表 3 中优化后动量输运碰撞频率减小为原来的 2/3, 相应的电导率 σ 增大为原来的 1.45 倍(但电子密度 n_e 没有增加). 由于 CO₂ 的动量输运碰撞速率系数 r_{mol} 比其他气体高 1 个数量级, 因此 CO₂ 含量略微减小, 这将导致其动量输运碰撞频率明显降低(如从 $7.879 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 降低到优化后的 $2.675 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$). 其他气体压强的增加或减少, 对碰撞频率的影响不大. 可以说, CO₂ 含量降低使动量输运碰撞频率降低, 是优化

导致电导率 σ 以及放电电流 I_d 增加, 从而抬高气体温度的最主要的因素. 当然, CO₂ 含量降低过多, 将导致激光工作物质粒子数太少, 激光能量密度不够, 其消极作用不言而喻.

4. 结 论

对典型的以 CO₂, N₂ 和 He 混合气体为工作介质的封离型 CO₂ 激光器, 在放电电压不变的情况下, 优化气体组分可以提高激光输出功率的主要机理是: 通过适当增加 N₂, 使激发态 N₂ 与激光上能级的碰撞交换速率增加, 提高激光能级粒子数密度和相对布居数. 同时, 适当减少 CO₂ 的含量, 使总的电子动量输运碰撞频率降低, 放电电流增大, 导致增加激光上转动能级的弛豫速率和减少了能级寿命, 从而提高了谐振腔内的激光饱和光强.

- [1] Markillie G A J, Baker H J, Betterton J G *et al* 1999 *IEEE J. Quant. Electron.* **35** 1134
- [2] Ciofini M, Politi A, Meucci R 1993 *Phys. Rev. A* **48** 605
- [3] Stanghini M, Basso M, Genesio R *et al* 1996 *IEEE J. Quant. Electron.* **32** 1126
- [4] Ghani B A, Hammadi H 2001 *Opt. Laser Technol.* **33** 243
- [5] Horbelt W, Timmer J *et al* 2001 *Phys. Rev. E* **64** 16222
- [6] Cheng C, He S L 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 713 (in Chinese) 程

成、何赛灵 2000 物理学报 **49** 713

- [7] Cheng C 2002 *Acta Photo. Sin.* **31** 748 (in Chinese) 程 成 2002 光子学报 **31** 748
- [8] Cheng C 2003 *Appl. Phys.: Lasers and Optics* **76** 27
- [9] Cheng C, Ma Y W, He S L 2001 *Opt. Laser Technol.* **33** 601
- [10] Witteman W J 1987 *The CO₂ Lasers* (Berlin: Springer) pp1—126
- [11] Roth J R 1995 *Industrial Plasma Engineering* (Vol. 1): Principles (IOP Publishing Ltd.) p97

Study on mechanisms for enhancement kinetics of lasing gases in an optimized sealed-off CO₂ laser^{*}

Cheng Cheng

(*Department of Applied Physics , Zhejiang University of Technology , Hangzhou 310032 , China*)

(Received 13 August 2002 ; revised manuscript received 5 March 2003)

Abstract

The kinetics of gases (CO₂ , N₂ and He) in an optimized sealed-off CO₂ laser are discussed in details . A comparison of numerical results shows that the population of the laser levels is increased by optimizing the lasing gases , with the increase of an excited N₂ impacting to the upper laser level . Also , decreasing the electron momentum transition frequency and increasing discharge current result in the increase of the relaxation of the upper rotational laser levels and the decrease of the level lifetime , thus the lasing saturation intensity in a resonator is increased finally .

Keywords : CO₂ laser , gas kinetics , enhanced mechanisms

PACC : 4255 , 4255D

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province , China(Grant No.602098).