

横流放电 CO₂ 激光器能量转换的特性和机制

吴中祥

(中国科学院力学研究所, 北京)

Energy transformation property and mechanism in a transverse flow discharged CO₂ laser

Wu Zhongxiang

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

提要: 模拟计算分析了横流放电 CO₂ 激光器中介质气压、流速、光腔位置、腔中辐射强度、输出耦合度等因素对介质各能态间能量转换特性的影响。

关键词: 模拟计算, 横流放电, CO₂ 激光

本文对 [1] 文采用的器件、条件 (横流、放电、CO₂ 激光器, 介质组分比: CO₂:N₂:H=5:17:78, 初始温度: 293 K, 放电电流: 2A, E/N : 2.15×10^{-16} V·cm², 光腔: 长 160 cm², 高 ~1.8 cm, 及其它参量) 具体计算了相应的能量转换特性, 并由其变化规律分析了有关的机制。

1. 各能态能量随气压 P 和位置 x 的变化

对于上振动态能量 E_N , E_3 , 得到不同 x 处的 $\ln E_N$, $\ln E_3 \sim P$ 曲线。当 x 在有效电激励区以内, $\ln E_N$, $\ln E_3$ 是直线地增加; 流至有效电激励区边缘附近直线逐渐由上升转折为下降, 而且其中直线部分上升或下降的斜率对所有的 x 都基本不变。 $\ln E$ 随气压呈直线变化的这种规律可具体解释为: 电激励泵浦和碰撞弛豫的作用都是与介质密度成正比的, 而介质密度与气压成正比 (因腔中平动温度变化不大); 在有效电激励区边缘附近, $\ln E$ 逐渐由上升转折为下降则反映出此时的能量转换机制逐渐由以电激励泵浦为主转变为以碰撞弛豫为主的转化过程。

不同 x 处的热能 E_H 和下振动态能 E_{12} 随气压 P 变化的规律是: 它们都是上升的直线, 而且与 x 是在有效电激励区内、外, 或光腔内、外无关, 其绝对值受辐射强度的影响也不大。这表明, 在本文所取的较高气压下, 由上、下振动态向基态以及由上振动态到下振动态的能量转移, 碰撞弛豫起主导作用。这正是较高压器件特性区别于低压器件的基本原因。

2. 光腔出口 x 出, 上振动态总能量 $E_U(x_{出}) = E_3(x_{出}) + E_N(x_{出})$ 随气压 P 和辐射强度 I 的变化 $E_U(x_{出})$ 可看作激光介质流过光腔到达出口处还残留的上振动态能量。在腔中光强 I 或输出耦合度 C 相同的条件下, $E_U(x_{出}) \sim P$ 曲线, $E_U(x_{出})$ 都在 $P \approx 650$ Torr 附近出现峰值; 当耦合度较大或光强较弱时, 在 $P \approx 650$ Torr 前、后, $E_U(x_{出})$ 随 P 上升或下降的变化都是单调时; 当耦合度较小 (如 $C = 2.5\%$) 或光强较大 (如 $I = 10^{12}$) 时, 在 $P > 650$ Torr 后 $E_U(x_{出})$ 随 P 的变化是先下降, 后又在约 $P \approx 900$ Torr 处转为上升。在 $P \approx 650$ Torr 附近 $E_U(x_{出})$ 出现峰值, 与 [1] 文输出功率 W_I 出现峰值的气压相近, 且恰与前面 (1) 中 $x = x_{出} = 0.6$ cm 处的转折点相对应。这表明 $E_U(x_{出})$ 和 W_I 随 P 变化曲线上的峰值是由于能量转换由以电激励泵浦为主转变为以碰撞弛豫为主所致。

在较大光强时, 当 $P \approx 900$ Torr, $E_U(x_{出})$ 由随 P 下降又转折为上升, 以及在 $P \approx 900$ Torr 前后, $E_U(x_{出})$ 随 I 的变化也由随 I 的增大而减少变为增加, 都表明在相应的光强或耦合度下, 介质中残留的上振动态能量是由随气压的增大而减少变为增加, 并已反映出腔中辐射的强弱对能量转换的影响。

3. 腔中辐射强度对介质受电激励再激发的影响。

当腔中辐射强度很小 ($I \approx 0$) 时, 在给定气压下, 电激励提供的可用振动能可由有效电激励区出口 d

处的上振动能 $E_U(d)$ 表达, 振动能转变为光能的效率可表示为:

$$\eta_{IU} = W_I / E_{U0}(d), \quad (1)$$

其最大极限值应是激光介质相应的量子效率 (≈ 0.409)。将最佳输出耦合条件下的 η_{IU} 标志为 η_{IUm} , 我们作 $\eta_{IUm} \sim P$ 曲线, 得到 η_{IUm} 的值大多显著地不合理地大于量子效率, 这表明在 $I \neq 0$ 时, 电激励泵浦向激光介质上振动态提供的总能量是远大于 $I=0$ 时的。因而, 介质在流经光腔的过程中, 上振动态实际获得的总能量还应包括已转变为输出那部分的功率。此外, 在较高气压下, E_U 由碰撞弛豫而产生的下降与辐射强度的关系不大, 因此, 在输出过程中, 电激励不断补充给上振动态的总能量为:

$$W_{UI} = W_I / 0.409 + E_{UI}(x_{\text{出}}) - E_{U0}(x_{\text{出}}) \quad (2)$$

式中 $E_{UI}(x_{\text{出}})$ 、 $E_{U0}(x_{\text{出}})$ 分别是腔中光强为 I 和 0 时光腔出口处介质残留的上振动态能量。此式反映了在输出过程中, 腔中再次激发的能量除与输出功率和量子效率有关外, 还与光强为 I 和 0 时光腔出口处残留的上振动能的差值有关。因而, 在强辐射作用下, 由电激励提供的有效总振动能 W_{UI}^+ , 及其转变为光能的效率 η_{IU}^+ 可分别表达为:

$$W_{UI}^+ = W_{UI} + E_{U0}(d), \quad \eta_{IU}^+ = \frac{W_I}{W_{UI}^+} \quad (3)$$

相应的结果已描于 [1] 文有关各图中, 其中 η_{IU}^+ 在所有情况下都合理地小于量子效率。

计算结果得到, 不同耦合度条件下的 $(E_{U0}(x_{\text{出}}) - E_{UI}(x_{\text{出}})) \sim P$ 曲线, 它们都在 $P \approx 650$ Torr 附近出现峰值, 而在其前、后均单调地上升或下降。

在光强 I 、耦合度 C 和最佳耦合度 C_m 条件下的再次激发能量 W_{UI} , 以及最大的再次激发能量 W_{UI_m} 随气压 P 变化的曲线, 都在 $P \approx 900 \sim 1000$ Torr 附近出现峰值。 $W_{UI} \sim P$ 曲线在 $P \approx 900 \sim 1000$ Torr 附近的下降可解释为: 由于介质中残留的上振动态能量增大而使再次激发能量减少。 W_{UI} 曲线峰值的气压还与 [1] 文中振动能出光效率的峰值所对应的气压基本一致, 这些都表明腔中再激发的能量 W_{UI} 及其随气压和辐射强度的变化是影响器件振动效率的又一机制。

4. 光腔入口位置 x_0 的影响

对不同耦合度 C , 气压 $P=780$ Torr、 200 Torr 等宽度 (≈ 0.5 cm) 的光腔中, W_{UI} 、 $E_U(x_{\text{出}}) \sim x_0$ 曲线上在一定的 x_0 处都出现峰值 ($P=780$ Torr; 峰值在 $x_0 \approx 0.1 \sim 0.2$ cm, $P=200$ Torr; 峰值在 $x_0=0.5 \sim 0.7$ cm)。这可解释为: 在有效电激励区以内, 腔内电激励泵浦是随 x_0 的增大而加强; 在辐射输出过程中的再次激发也加大, 但 x_0 增大也使光腔出口超出有效电激励区的长度加大, 在腔内同时接受电激励泵浦的介质减少; 这又使输出过程中的再次激发减少, 这两个因素随着 x_0 的增大而相互消长, 致使 $W_{UI} \sim x_0$ 曲线出现峰值。 $E_U(x_{\text{出}}) \sim x_0$ 曲线是单调地下降, 反映出介质中残留的上振动态能量随光腔位置而变化的规律。

不同光强 I , 气压 $P=780$ Torr、 200 Torr, E_H 、 $E_{12} \sim x_0$ 曲线都呈折线状, 折点都对应于光腔中心 (780 Torr, 200 Torr) 或光腔出口 (780 Torr) 处于有效电激励区出口处, 表明腔中电激励泵浦和碰撞弛豫的综合效果引起 E_H 和 E_{12} 的增长, 而随着光腔移出有效电激励区的长度的增加又相对地减小。

5. 流速 U 的影响

取 $x_0=0.1$ cm, 气压 $P=780$ Torr、 200 Torr, 作 W_{UI} 、 $E_U(x_{\text{出}}) \sim U$ 曲线, 结果表明, 随着 U 的增大, W_{UI} 都是单调地下降。这可解释为: 随着介质流速的加大, 介质在有效电激励区内停留的时间缩短, 因而介质中残留的上振动态能量 E_U 增加, 而受到辐射跃迁和再次激发的几率都减少, 即 W_{UI} 减少。

在相同条件下的 E_H 、 $E_{12} \sim V$ 曲线, 它们都是随 V 上升的直线。这表明: 碰撞弛豫使由激光上能态和由上、下能态到基态的能量转移是随介质流速 V 的增加而线性地增大。

参 考 文 献

- 1 吴中祥 *et al.*, 中国激光, 15(7), 431(1988)

(收稿日期: 1987年6月12日,

修改稿收到日期: 1988年7月13日)