

混合型 TEA CO₂ 激光器工作特性的研究

徐华乐 伊景荣 蔡英时
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文从数值模型出发,分析了混合型 TEA CO₂ 激光器的工作特性。给出了连续低气压增益管在阈值以下工作时,混合型 TEA CO₂ 器件获得单纵模脉冲的几率。其结果与实验符合得较好。

一、引 言

为使 TEA CO₂ 激光器单纵模运转,已发展了多种技术^[1]。如:(1)腔内加入 F-P 标准具;(2)腔内加入气体吸收池;(3)注入锁定式器件;(4)增益介质由高压部分和低压部分组成的混合型器件等。混合型器件的突出优点在于调节要求低和单纵模运转的稳定性高,这就使它有条件和腔外电光开关结合在一起,构成 CO₂ 激光短脉冲发生器。

到目前为止,已有些文章从理论上研究了混合型 CO₂ 激光器的运转特性^[2~3]。本文按[3]中所提出的思路引进混合型器件中 CW CO₂ 管的作用,从数值模型出发,研究了混合型 TEA CO₂ 激光器在各种条件下的运转特性。所得结果和实验符合得较好。

CW CO₂ 管的作用包含两个方面:(1)增益;(2)光强。当 CW CO₂ 管的小信号增益小于阈值增益时,只存在(1)的作用;大于阈值增益时,(1)和(2)的作用同时存在。

二、计算模型

根据 Gilbert^[4]的四能级模型(图1),CO₂ 激光系统的多纵模速率方程为:

$$\frac{dn_a}{dt} = (n_b - n_a) c \sum_{\nu} \sigma(\nu) q(\nu) + \gamma_{ba} n_b - \gamma_{a0} n_a - W_a, \quad (1)$$

$$\frac{dn_b}{dt} = -(n_b - n_a) c \sum_{\nu} \sigma(\nu) q(\nu) - \gamma_{ba} n_b + \gamma_{cb} n_c - \gamma_{b0} n_b + W_b, \quad (2)$$

$$\frac{dn_c}{dt} = -\gamma_{cb} n_c + \gamma_{bc} n_b + W_c, \quad (3)$$

$$\frac{dq(\nu)}{dt} = (n_b - n_a) \frac{l}{L} c \sigma(\nu) q(\nu) - \frac{q(\nu)}{tc} + W_s(\nu) + q(\nu) k(\nu) \exp\left[-\int I dt / E_s\right], \quad (4)$$

其中 n_a, n_b, n_c 分别为 CO₂ 激光下能级、上能级及氮分子第一振动激发态的粒子数密度, $q(\nu)$ 为频率为 ν 的纵模的光子密度, l 为激活介质区长度, L 为腔长, γ 为碰撞跃迁几率, $W_s(\nu)$

为单位时间内自发辐射到每个纵模上的光子数密度^[5], t_c 为光子寿命, 它的定义为:

$$t_c = \frac{2L}{c \ln(1/RT)}, \quad (5)$$

其中 c 为光速, R 为输出镜反射率, T 为腔透射率。(1), (2), (3) 式中的 W_a, W_b, W_c 分别是能级 a, b, c 的泵浦速率^[4]。

$W_a = W_b = 0.4 W_c = W_0 t \exp(-t/t_p)$, (6)
 t_p 为泵浦脉冲宽度, W_0 由 TEA 器件的小信号增益系数决定。(1)~(3) 式中的 $\sigma(\nu)$ 为高压增益管的受激辐射截面, 它与频率的关系:

$$\sigma(\nu) = \sigma_0 \frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2}, \quad (7)$$

其中 $\Delta\nu$ 为增益线型的半极大全宽度 (HMFV)。

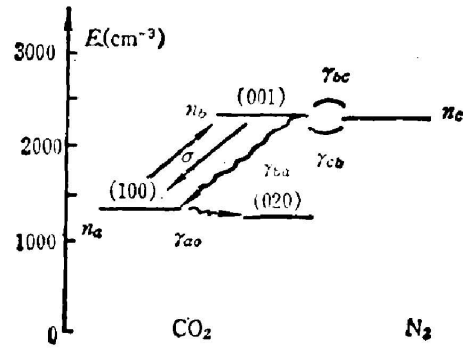


Fig. 1 Energy-level diagram of CO_2 transitions

由于(4)式右边最后一项中的因子 $k(\nu) \exp\left[-\int I dt/E_s\right]$ 在模型中的重要性, 下面我们较详细地说明一下它的来源。和 TEA 部分相似, 可以用以下两式描述 CW CO_2 管激光上、下能级的粒子数密度的变化

$$\frac{dn'_a}{dt} = (n'_b - n'_a) c \sum_{\nu} \sigma'(\nu) q(\nu) + \gamma'_{ba} n'_b - \gamma'_{ab} n'_a + W'_a, \quad (1')$$

$$\frac{dn'_b}{dt} = -(n'_b - n'_a) c \sum_{\nu} \sigma'(\nu) q(\nu) - \gamma'_{ba} n'_b + \gamma'_{ab} n'_a + \nu'_{bc} n'_c + W'_b, \quad (2')$$

式(1')及(2')中带撇的字母表示 CW CO_2 激光管相应量, 它们和式(1)及(2)中的量有相似的定义。实际上, 整个混合型 TEA CO_2 激光器的工作过程, 就是 TEA 部分所产生的光脉冲在低气压连续管内来回不断的传布过程。由于典型 TEA CO_2 激光器输出脉冲的宽度为 100 ns 左右, 远小于 CW CO_2 增益介质中的各种弛豫过程, 同时, 在 100 ns 的时间过程中, 可忽略粒子数的激发, 再考虑到 CW CO_2 增益介质的增益线宽很窄(约 75 MHz), 一般情况下只有一个纵模落在线宽之内。这样, 方程(1'), (2')简化为:

$$\frac{dn'_a}{dt} = (n'_b - n'_a) c \sigma' q, \quad (8)$$

$$\frac{dn'_b}{dt} = -(n'_b - n'_a) c \sigma' q, \quad (9)$$

由(8), (9)式得:

$$\frac{d\delta}{dt} = 2\delta c \sigma' q, \quad (10)$$

$$\delta \equiv n'_b - n'_a,$$

积分(10)式: 并利用关系 $I = ch\nu q$ 及 $E_s = h\nu/2\sigma'$, 得到

$$\delta = \delta_0 \exp\left[-\int_{-\infty}^t I dt/E_s\right], \quad (11)$$

E_s 为饱和能量。由(11)式得连续管的增益

$$k' = \sigma(\nu) \delta = \sigma(\nu) \delta_0 \exp\left[-\int_{-\infty}^t I dt/E_s\right] = k(\nu) \exp\left[-\int_{-\infty}^t I dt/E_s\right], \quad (12)$$

其中 $k(\nu)$ 为 CW CO₂ 管的小信号增益系数, 它和频率的关系为:

$$k(\nu) = k_0 \frac{(\Delta\nu_{\text{CW}}/2)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_{\text{CW}}/2)^2}, \quad (13)$$

其中 k_0 是中心纵模的小信号增益系数, $\Delta\nu_{\text{CW}}$ 为连续管增益曲线的半极大全宽度。当连续管的小信号增益系数 k_0 大于阈值增益系数时, 则 k_0 为阈值增益系数, (因为达到稳定状态的连续管只能工作在阈值), 而已经存在的腔内光强给出 $q(\nu)$ 的初始条件。应当说明, 连续管的增益线型实际上应为 Voigt 线型, 但以 (13) 式代之所产生的误差是很小的。文献 [2] 中为了说明连续管的作用, 分别在式 (1), (2) 及 (3) 右边再加上一项常数激发项。这种处理在以下两个方面是令人不满意的: (1) 对于实际混合型器件, 当 TEA 部分放电激发时, 连续管已处于稳定状态, 而上述处理将使 TEA 部分和连续管部分同时激发, 这将减弱连续管增益的作用; (2) 上述模型忽略了连续管的饱和效应。我们此文中所采用的模型不存在上面提出的两个问题。

三、结 果

用 Runge-Kutta 方法在 Burroughs 机上进行计算。计算中所需的参数列于:

l	L	V_{00}	R	T
0.5 m	2.23 m	70 cm ³	9.36	0.85
V_{00}				
$P_{\text{CO}_2}^{(\text{CW})}$	$P_{\text{N}_2}^{(\text{CW})}$	$P_{\text{He}}^{(\text{CW})}$	J_{CW}	E_s
2 τ	1 τ	8 τ	74 MHz	1.61 mJ/cm ²
P_{CO_2}	P_{N_2}	P_{He}	$\Delta\nu$	σ_0
120 τ	60 τ	480 τ	3.8 GHz	5.8×10^{-23} cm ²
γ_{ba}	γ_{cb}	γ_{bc}	γ_{a0}	H^+
0.0868 μs^{-1}	2.1 μs^{-1}	1.145 μs^{-1}	24.4 μs^{-1}	5.7×10^{13} cm ⁻³ μs^{-2}

我们考虑了 50 个纵模对 TEA 部分的反转粒子数的影响和连续管部分饱和的贡献。并设高气压和低气压增益曲线的中心频率重合。

图 2, 3 的结果是在某纵模频率 ν_0 和增益曲线中心频率 ν_0 的偏离 $4f$ 等于零的条件下得出的。图 2 中曲线 (a)、(b) 和 (c) 分别对应于连续管不工作、工作在阈值下以及工作在阈值以上时的计算脉冲波形, 它和文献 [6] 的实验结果符合得相当好。在图 2 我们同时描绘出文献 [2] 的实验结果。其中脉宽的不符是由不同的腔寿命所引起。我们计算中所用的输出镜反射率为 36%, 而他们实验中所用的是 65%。脉冲尾部的不符是由不同的气体比份引起的, 在他们的实验中, 气体中氮气的比份很高, 导致脉冲尾部有较大的光强。但从图 2 看到, 在连续管三种不同的工作状态下, 计算脉冲波形的相对位置和实验脉冲波形的相对位置

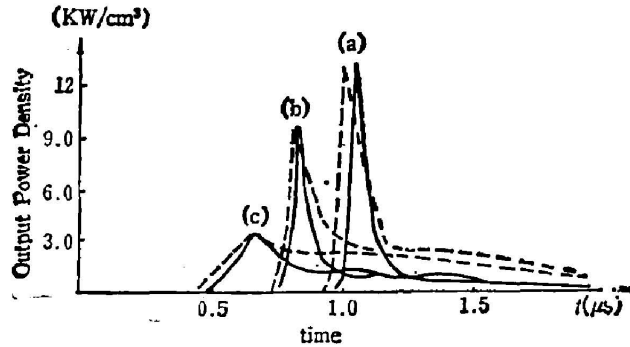


Fig. 2 Calculated output pulse shapes (The Broke curves represent experimental results of ref. [2])

(a) Low-pressure section not operating; (b) Low-pressure section operating below threshold; (c) Low-pressure section operating above threshold

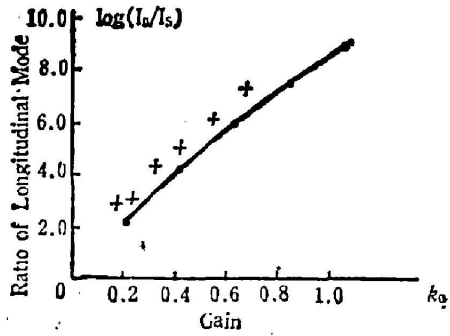


Fig. 3 Dependence of the ratio of I_0 to I_s on the gain of a low-pressure section

I_0 —density of center longitudinal mode; I_s —sum of the densities of other longitudinal modes k_0 represents threshold gain, crosses represent experimental results of ref. [7]

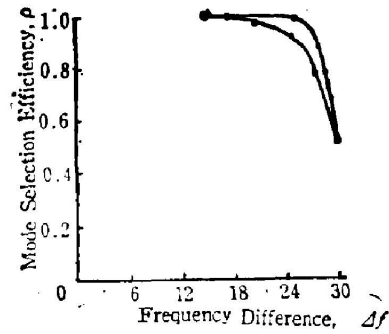


Fig. 4 Relationship between mode selection efficiency and frequency difference, Δf is the frequency difference between the center of gain profile and the closest longitudinal mode of the resonator

相当一致。正如我们上面所指出的，在文献[2]的理论处理中，假设了 TEA 部分和连续管部分同时激发，减弱了连续管增益的作用，使其计算脉冲波形的相对位置和实验结果有很大的出入。

图 3 显示了中心纵模强度与其余所有纵模强度和之比($I_0/\sum I_i, i \neq 0$)对低气压部分增益的依赖关系。它与文献[7]中的实验结果基本相符(其实验结果也描在图 3 上)。我们在计算中假设了连续管的气压为 11 Torr, 文献[7]中为 2 Torr, 即我们所用的 $\Delta\nu_{CW}$ 大于 [7] 中的 $\Delta\nu_{CW}$ 值。如果考虑到此差别, 理论和实验将吻合得相当好。

图 4 给出了选模效率与 Δf 的关系。选模效率定义为:

$$\rho = \frac{I_0}{I_0 + \sum_{i=0} I_i} \quad (14)$$

I_0 为频率 ν_0 的纵模光强, ν_0 和增益曲线中心频率的偏差为 Δf 。计算结果表明, 当低气压连续管的增益为 80% 阈值增益时, 在 Δf 高达 24 MHz 的情况下, 混合型 TEA CO₂ 激光器仍

以单纵模运转。当低气压管的增益为 40% 阈值增益时, 在 Δf 达 18 MHz 的情况下, 器件以单纵模运转。计算中所用的腔长为 2.23 m, 对应的纵模间隔为 67.3 MHz。对于无稳定腔长装置的混合型 TEA CO₂ 激光器, 定义单纵模运转几率:

$$\rho = 2 \frac{\text{保证单纵模运转的最大频率偏差}}{\text{腔纵模间隔}},$$

那么, 以上两种情况下获得单纵模运转的几率分别为 71% 和 54%。

参 考 文 献

- [1] S. L. Chin; *Opt. & Laser Technol.*, 1980, **12**, No. 2 (Apr), 85.
- [2] A. Gondhalekar; *IEEE JQE*, 1975, **QE-11**, No. 3 (Mar), 103.
- [3] V. V. Likhanskii; *Sov. JQE*, 1978, **8**, No. 4 (Apr), 512.
- [4] J. Gilbert; *Can. J. Phys.*, 1972, **50**, No. 20 (Oct), 2523.
- [5] P. H. Flamant; *IEEE JQE*, 1983, **QE-19**, No. 5 (May), 821.
- [6] 蔡英时等; 《光学学报》, 1984, **4**, No. 2 (Feb), 168.
- [7] N. R. Heckenberg; *Opt. Commun.*, 1976, **16**, No. 1 (Jan), 54.
- [8] J. L. Lachamber; *IEEE JQE*, 1976, **QE-12**, No. 12 (Dec), 756.
- [9] E. R. Pike; 《High-Power Gas Laser》, (The Institute of Physics Bristol and London, 1975).

Study of the performance of a hybrid TEA CO₂ laser

XU HUALE, YI JINGRONG AND CAI YINGSHI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 10 October 1985; revised 6 January 1986)

Abstract

The operating characteristics of a hybrid TEA CO₂ laser are analysed based on a numerical model. We have found the possibility of single longitudinal mode oscillation in a low-pressure CW CO₂ tube operating below the lasing threshold. The results have been borne out by experiments.