

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0113-03

TEA CO₂ 激光器谐波振子数学模型

曲彦臣¹, 任德明¹, 胡孝勇¹, 刘逢梅¹, 张莉莉¹, 姜永亮¹, 宋宝安¹, 宋文梅²

(¹ 哈尔滨工业大学光电子技术研究所暨可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;)
(² 哈尔滨东安发动机集团公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 谐波振子数学模型是 TEA CO₂ 激光振动动力学的一种表述, 它是对复杂温度模型的一种简化。以四个特征变量表征 CO₂ 的三个振动态和 N₂ 分子的振动态的能量变化, 把激光腔内输出光强、光通量、气体温度与四个特征变量随时间变化率相联系, 建立数学方程。改变激光器各种参量, 可计算得到其对脉冲波形的影响。由激光光强, 可求得激光输出功率和能量, 为激光器的优化设计提供重要的理论依据。经过实验验证, 理论计算值与实验结果基本相符。

关键词 TEA CO₂ 激光器; 激光动力学; 谐波振子模型

中图分类号 TN248.2¹

文献标识码 A

Harmonic Oscillator Mathematical Modeling of TEA CO₂ Laser

QU Yan-chen¹, REN De-ming¹, HU Xiao-yong¹, LIU Feng-mei¹, ZHANG Li-li¹,

JIANG Yong-liang¹, SONG Bao-an¹, SONG Wen-mei²

(¹ National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Optoelectronic Technology Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(² Harbin Dongan Engine (Group) Co. Ltd., Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Harmonic oscillator mathematical model is a description of TEA CO₂ laser vibrational dynamics, and it simplifies temperature model. The equations are built using four characteristic variables for three vibration states of CO₂ molecule and one of N₂ molecule to show energy variety, to relate time to output intensity in cavity, light flux and gas temperature. The laser pulse waveform can be calculated with varied laser's parameters. The output power and energy can be obtained with intensity, it provides theoretical basis for laser design. Theoretical calculations shows a good agreement with the experimental result.

Key words TEA CO₂ laser; laser kinetics; harmonic oscillator modeling

1 引言

TEA CO₂ 激光动力学过程已有几种不同的数学模型描述, 其中温度模型分为四温度、五温度^[4]和六温度模型^[1,2,4]。实际上, 四温度模型和五温度模型可看成六温度模型的特例。本文根据实际工作条件的要求, 简化复杂的温度模型, 暂不考虑 CO₂ 的解离过程, 而详细分析谐波振子数学模型。

2 数学模型

CO₂ 分子是一种线性对称排列的三原子分子, 其基本振动形式有三种, 可将其分子振动模视为谐波振子, 其主要振动能级跃迁特征如图 1 所示。CO₂

分子的 00n 能级可处理为在特征温度 T_{00n} 下的谐波振子的一个系统, 以变量 A 表征, 即

$$A \equiv \exp(-\varepsilon_{001}/kT_{00n})$$

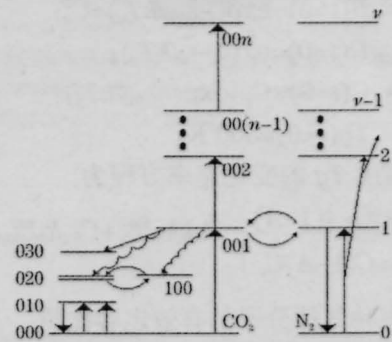


图 1 CO₂ 激光谐波振子模型

Fig.1 Harmonic oscillator modeling of CO₂ laser

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(编号:F01-10)

作者简介: 曲彦臣(1971-), 男, 哈尔滨工业大学光电子技术研究所副教授, 博士, 主要从事红外激光技术、红外非线性光学及光纤技术研究。 E-mail: quyanchen@263.net

CO₂ 分子的 100 能级可视为在温度 T_{100} 时的一个离散能级,以变量 B 来表征,即

$$B \equiv \exp(-\varepsilon_{100}/kT_{100})$$

CO₂ 分子的 010、020、030 等能级看成是在特征温度 T_{0m0} 下的一个系统,以变量 C 来表征,即

$$C \equiv \exp(-\varepsilon_{010}/kT_{0m0})$$

N₂ 分子振动能级视为谐波振子的一个系统,其特征温度为 T_v ,有

$$D \equiv \exp(-\varepsilon_v/kT_v)$$

其中 $\varepsilon_{001}, \varepsilon_{100}, \varepsilon_{010}$ 分别为 001, 100, 010 能级的振动能量。

分析图 1 中的各振动能级间的粒子数交换过程,考虑到整个系统为谐波振子系统,综合电子碰撞激发过程及消激发过程,电子温度的变化,电子分布是非麦克斯韦分布,处于细致平衡态。通过合理的近似,可得到特征变量 A, B, C, D 随时间变化的方程

$$\frac{dA}{dt} = [e]_{000} k_{e-CO_2}^{001} (1-A) + [N_2]_1 k_{N_2-CO_2}^{001} \frac{(1-D)(1-A)^3(1+AD)}{(1-AD)^3} D + \varphi\sigma(1-A)^3 B - \{ [e]_{000} k_{e-CO_2}^{001} (1-A) \exp(\varepsilon_{001}/\bar{u}_e) + [N_2]_1 k_{N_2-CO_2}^{001} \frac{(1-D)(1-A)^3(1+AD)}{(1-AD)^3} + \varphi\sigma(1-A)^3 + [M]_{001} k_{M-CO_2}^{030} (1-A)^3 \} \cdot A \quad (1)$$

$$\frac{dB}{dt} = \varphi\sigma A + [M]_{100} k_{M-CO_2}^{020} C^2 - \{ \varphi\sigma + [M]_{100} k_{M-CO_2}^{020} \} \cdot B \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dt} = \{ 3[M]_{001} k_{M-CO_2}^{030} A + 2[M]_{100} k_{M-CO_2}^{020} A + [e]_{000} k_{e-CO_2}^{lm0} + [M]_{010} k_{M-CO_2}^{000} C_g \} (1-C)^2 - \{ (2_{100} k_{M-CO_2}^{020} C + 0_{100} k_{M-CO_2}^{000}) [M] (1-C)^2 \} C \quad (3)$$

$$\frac{dD}{dt} = \left\{ [e]_0 k_{e-CO_2}^v + [CO_2]_1 k_{N_2-CO_2}^{001} \frac{(1-A)(1+AD)}{[1+C(1-A)](1-AD)^3} \right\} (1-D)^3 - \left\{ [e]_0 k_{e-CO_2}^v \exp(\varepsilon_v/\bar{u}_e) + [CO_2]_1 k_{N_2-CO_2}^{001} \frac{(1-A)(1+AD)}{[1+C(1-A)](1-AD)^3} \right\} (1-D)^3 D \quad (4)$$

式中 $[CO_2]$ 是 CO₂ 分子数密度, $[M]$ 是第 M 种分子的密度,依次类推; $_{00n}k_{e-CO_2}^{00(n+1)}$ 是 $00n$ 能级到 $00(n+1)$ 能级的电子碰撞激发速率, $_{00n}k_{e-CO_2}^{00(n-1)}$ 是相反过程的消激发速率; \bar{u}_e 为电子平均能量, $_{1}k_{N_2-CO_2}^{001}$ 是 V-V 转移速率; φ 是光通量 ($\varphi = I/h\nu$); σ 是受激发射截面; $_{00n}k_{M-CO_2}^{030}$ 是与 M 分子碰撞引起的 001-030 能级的淬灭速率。 $_{100}k_{M-CO_2}^{020}$ 为 CO₂(100)-CO₂(020) 碰撞消激发的有效速率; $_{010}k_{M-CO_2}^{000}$ 为 CO₂(010) 碰撞消激发的有效速率; $_{000}k_{e-CO_2}^{lm0}$ 为电子直接碰撞激励多重 $lm0$ 的有效速率; $\bar{k}_{e-CO_2}^v$ 为激发氮振动能级的合成速率。以上方程的初始条件为:

$$\begin{aligned} A(t=0) &= \exp(-\varepsilon_{001}/kT_g); \\ B(t=0) &= \exp(-\varepsilon_{100}/kT_g) = C_g^2; \\ D(t=0) &= \exp(-\varepsilon_v/kT_g); \\ C(t=0) &= C_g = \exp(-\varepsilon_{010}/kT_g); \\ Tg(t=0) &= 300 \text{ K}. \end{aligned}$$

气体温度 Tg 的变化速率方程为

$$\frac{dTg}{dt} = \frac{[CO_2] (1-A)}{[1+C(1-A)] \tilde{C}_v} (A_{001} k_{M-CO_2}^{030} + C_{010} k_{M-CO_2}^{030} \varepsilon_{010}) \quad (5)$$

式中 \tilde{C}_v 为每种气体分子的有效定容比热。

TEA CO₂ 激光器的输出光强为

$$I_{out} = \frac{(1-R_2)}{(1+R_2)} h\nu\varphi \quad (6)$$

其中, R_2 为耦合输出窗镜的功率反射率。

由(1)~(6)式构成的方程组所描述的 CO₂ 激光

器谐波振子数学模型实质上是振动动力学数学模型的一种表述。

3 结果与讨论

对于给定初始条件,由计算机数值计算该方程组,可得到激光器各种参量对激光输出脉冲波形的影响。当激光器气体组分选为 CO₂:N₂:He=1:1:3,激光谐振腔长 50 cm,增益介质激活长度 30 cm,总气压为 100kPa 时,计算 CO₂ 激光器的自由振荡最强支 10P(20) 谱线(波长为 10.591 μm)的脉冲波形如图 2 所示,受激发射截面随时间的变化如图 3 所示。

计算得到的激光脉冲宽度约为 62 ns,脉冲持续时间约 3.7 μs。激光器的受激发射截面随时间的变化为下降趋势,与时间近乎成线性。

激光混合气压为 53.3kPa 时的激光脉冲波形如

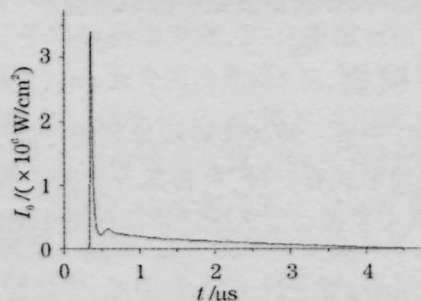


图 2 CO₂ 激光脉冲波形为时间的函数

Fig.2 CO₂ laser pulse shape as a function of time

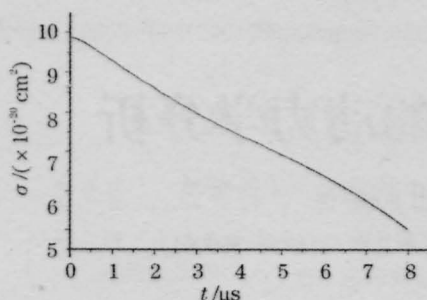
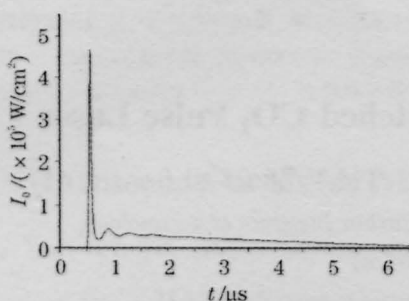
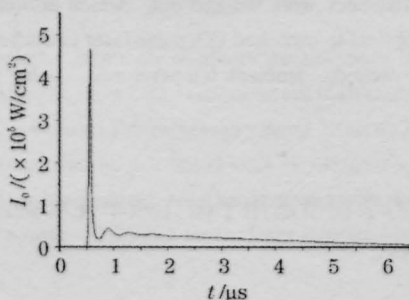
图3 CO₂ 激光器受激发射截面为时间的函数Fig.3 Cross section for stimulated emission of CO₂ laser as a function of time图4 CO₂ 激光脉冲波形为时间的函数(CO₂:N₂:He=1:1:3)Fig.4 CO₂ laser pulse shape as a function of time (CO₂:N₂:He=1:1:3)图5 CO₂ 激光脉冲波形为时间的函数(CO₂:N₂:He=1:1:8)Fig.5 CO₂ laser pulse shape as a function of time(CO₂:N₂:He=1:1:8)

图4所示,脉冲宽度约为59 ns。气体配比为CO₂:N₂:He=1:1:8时的激光脉冲波形如图5所示,脉冲宽度约为73 ns。相同气压下气体配比由1:1:3变为1:1:8

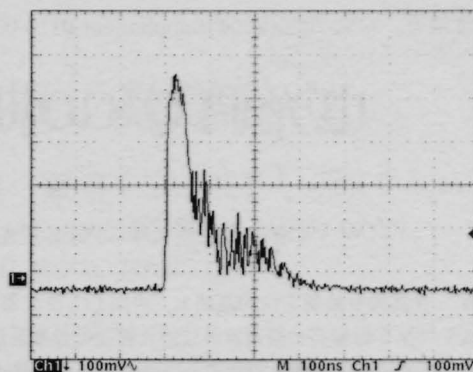
图6 TEA CO₂ 激光脉冲波形示意图

Fig.6 Oscillogram of pulse shape TEA CO₂ laser 后,激光脉冲宽度随着氦气含量的增加而变大。

在激光混合气体配比为CO₂:N₂:He=1:1:3,总气压53.3 kPa,气体温度300 K时,Tektronix 684A数字存储示波器记录得到的激光脉冲波形如图6所示^[7]。实验记录脉冲能量为50 mJ,脉冲宽度约为62 ns,脉冲峰值功率为0.81 MW。在同样条件下的理论计算结果:脉冲宽度59 ns;脉冲能量45 mJ;峰值功率为0.76 MW。计算值与实验值相比较,可得出数值计算与实验结果基本相符。

参考文献

- 1 M. Soukieh, B. A. Ghani, M. Hammadi. Mathematical modeling of CO₂ TEA laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**(8): 451~457
- 2 Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Li Ziqin *et al.* Comparison between theories of six temperature model and the rate equation for Q-switched CO₂ laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(12): 2369~2374
田眺硕,王 骐,李自勤等. 电光调Q CO₂ 激光器的六温度模型理论与速率方程理论比较分析[J]. *物理学报*, 2001, **50**(12):2369~2374
- 3 K. R. Manes, H. J. Seguin. Analysis of the CO₂ TEA laser[J]. *Appl. Phys.*, 1972, **43**(12): 5073~5078
- 4 A. Ghani, M. Hammadi. Mathematical modeling of hybrid CO₂ laser[J]. *Opt. & Laser Tech.*, 2001, **33**(4): 243~247
- 5 Qu Yanchen, Ren Deming, Hu Xiaoyong *et al.* Rapidly tuning miniature transversely excited atmospheric -pressure CO₂ laser[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24):5025~5029