

文章编号: 1001-3806(2005)04-0389-03

脉冲 TEA CO₂ 激光器温度特性的理论分析

吴 谦

(中国科学院 电子学研究所, 100080 北京)

摘要: 利用六温度模型速率方程计算了当激光工作气体温度从 -30℃ ~ +60℃ 变化时 TEA CO₂ 激光器输出脉冲能量的变化规律。结果表明, 激光器输出脉冲能量随着工作温度的升高而近似线性下降; 线性下降的快慢和激光工作气体组成、气压、输出耦合镜反射率、注入能量、工作气体组成等均有关系; 工作气体气压越高、输出耦合镜反射率越大或注入能量越高, 激光输出脉冲能量随温度升高而下降的速度越快。

关键词: TEA CO₂ 激光器; 六温度模型; 脉冲能量; 温度; 斜率

中图分类号: TN248.2⁺ 2 文献标识码: A

Theoretical analysis of temperature characteristics of pulsed TEA CO₂ laser

WU JIN

(Institute of Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The output energy of a pulsed TEA CO₂ laser versus the ambient temperature -30℃ ~ +60℃ was calculated out by six-temperature mode rate equations. Numerical result shows that the output pulse energy almost decreases linearly with the ambient temperature. The gradient of the pulse energy to ambient temperature varies with the composition of the laser mixtures, pressure, mirror reflectance or input energy. With higher mixture pressure, mirror reflectance or input energy, the output pulse energy decreases more quickly with the ambient temperature.

Key words TEA CO₂ laser; six-temperature mode; pulse energy; temperature; gradient

引言

TEA CO₂ 激光器的输出波长处在 8μm ~ 12μm 波段的远红外大气窗口, 大气穿透性好, 人眼安全, 能与前视红外系统兼容, 在军事上有一定的应用, 在第 3 代激光测距机中, TEA CO₂ 激光器已是主体器件之一。例如, 英国 Marconi 航空公司生产的 MK3 型 TEA CO₂ 激光器, 被美国 Hughes 公司用于 CO₂ 激光测距机, 装备在 M1E1 坦克上; 美国 Honeywell 公司生产的激光束制导系统, 也采用小型 TEA CO₂ 激光器。1997 年, 美国 Textron Systems 公司完成由美国陆军战略导弹与防御指挥 (USA SM DC) 支持的、为期 4 年的战场激光雷达演示计划 (field ladar demonstration)^[1]。该大型先进激光雷达系统也用了脉冲 TEA CO₂ 激光器。

作为军用激光器件, 一般都有严格的环境适应性要求。例如, 中华人民共和国国家军用标准 GJB 2225-94《地面电子对抗设备通用技术要求》关于装甲车载设备车内工作温度的基本要求为 -30℃ ~ +60℃。因

此, 安装在坦克等装甲车内的 CO₂ 激光测距机, 至少要在 -30℃ ~ 60℃ 的温度范围内测距准确才能满足要求和军检合格。

众所周知, TEA CO₂ 激光器的输出脉冲能量随着工作气体的温度升高而下降。文献 [2] 中实际测量了一台小型 TEA CO₂ 激光器的输出脉冲能量在 -10℃ ~ +40℃ 之间的变化情况。结果表明, 激光输出脉冲能量在所涉及的温度范围内随着温度的升高呈线性下降。因此, 如果没有对激光工作气体采取温度控制措施, CO₂ 激光测距仪在高温下的有效测量距离短, 低温下有效测量距离长。基于这种特性, 在设计军用 CO₂ 激光器时, 必须考虑使用环境条件, 留有一定的余量。

实际上, 除激光工作气体温度外, 影响 CO₂ 激光输出脉冲能量的因素很多, 如注入能量、增益体积、激光工作气体组成与气压、输出耦合镜的反射率, 等等。本文中将通过理论计算在激光工作气体温度变化过程中, 诸多的因素对 TEA CO₂ 激光器输出脉冲能量的影响程度。

1 计算模型

在文献 [3] 中所提供的六温度模型速率方程的基础上, 文献 [4] 中给出了适用于描述可调谐 TEA CO₂

作者简介: 吴 谦 (1965-), 男, 博士, 研究员, 主要从事工作为气体激光及应用。

E-mail jwu909@263.net

收稿日期: 2004-05-09 收到修改稿日期: 2004-09-10

激光器动力学过程的六温度模型速率方程组。本文中将采用这个方程组来进行计算。

计算采用的基本输入参数如下：(1) 谐振腔长度 L ，有效增益长度 L_g ，电极有效放电宽度为 D_x ，电极间距为 D_y ，即增益体积为 $L_g \times D_x \times D_y$ ，激光器谐振腔采用凹面全反镜和平面输出耦合镜组成，由平面镜耦合输出激光，假设放电电极是谐振腔的最小限模元件，这样，计算时，谐振腔反射镜较小者的面积可设为 $D_x \times D_y$ ，忽略其它损耗；(2) 激光工作气体由 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He-CO}$ 等 4 种气体组成；(3) 采用紫外预电离和放电激励。激励电子数密度函数 $N_e(t)$ 和具体的放电电路、激光工作气体组成、气压等有关，计算采用如下经验公式^[3-5]：

$$N_e(t) = N_0 \cdot \exp[-t/(5 \times 10^6)] \cdot \{1 - \exp[-t/(2.5 \times 10^6)]\} \quad (1)$$

式中， N_0 为初始时刻 $t=0$ 的电子数密度；(4) 只考虑 10P20 线，即 $10.6\mu\text{m}$ 波长；(5) 有关参量的初始值选取参见文献[6]。

2 计算结果

2.1 增益体积相同的 TEA CO_2 激光器

激光器的基本结构参数假设为： $L=2.4\text{m}$ ， $L_g=1.0\text{m}$ ， $D_x \times D_y = 3\text{cm} \times 3\text{cm}$ 。激光工作气体的温度变化范围 $243\text{K} \sim 333\text{K}$ ，即 $-30^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 。

图 1 为同一电子数密度下，保持激光工作气体总气压不变，激光输出脉冲能量随温度变化的关系曲线。

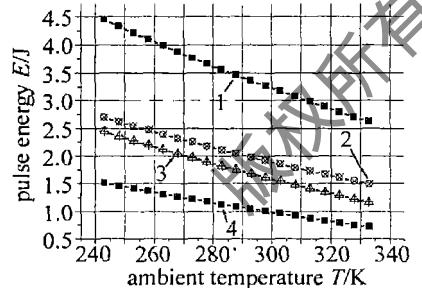


Fig 1 Laser output pulse energy versus ambient temperature
1— $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.32:0.50:0.02$
2— $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.16:0.64:0.04$
3— $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.08:0.21:0.67:0.04$
4— $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.10:0.10:0.76:0.04$

横坐标为激光工作气体温度，纵坐标为输出脉冲能量。计算中，激光工作气体总气压 50kPa ，输出耦合镜反射率 70% ，电子数密度参数 $N_0 = 1 \times 10^{18}$ 。

从图 1 可以看出，4 种激光工作气体表现出相同的规律，即输出脉冲能量随温度的升高而线性下降，如下式所示。这是因为：(1) 激光工作气体温度升高，谱线宽度增大，受激发射截面减小；(2) 气体温度升高，激光上能级的消激发速率加速，激光下能级的热激发

速率增加，其结果是粒子数反转密度降低：

$$E(T) = E_0 + k \cdot T \quad (2)$$

式中， E 为输出脉冲激光能量， T 为激光混合气体温度。

但是，不同的激光工作气体，下降的斜率 k ($k = dE/dT$) 并不一样，如 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.32:0.50:0.04$ (体积比，下同) 时， $k = -0.885 \times 10^{-2} \text{J/K}$ ； $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.16:0.64:0.04$ 时， $k = -2.023 \times 10^{-2} \text{J/K}$ 。因此，不同的激光工作气体，激光输出脉冲能量随温度升高而线性下降的快慢亦不相同；并且，当激光混合气体温度高到一定程度时，激光输出变为 0。

图 2 为斜率 k 与输出耦合镜反射率之间的关系曲线。横坐标为输出耦合镜的反射率，纵坐标为斜率 k 。

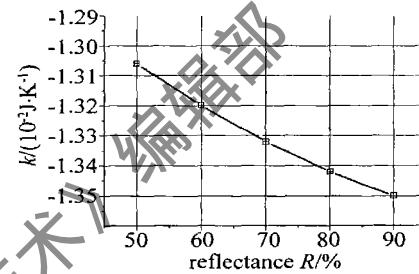


Fig 2 Gradient k versus mirror reflectance

计算中，激光工作气体总气压 50kPa 组成为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.16:0.64:0.04$ 电子数密度参数 $N_0 = 1 \times 10^{18}$ 。可以看到，随着输出耦合镜反射率的提高，斜率绝对值变大。也就是说，输出耦合反射镜的反射率越高，激光输出脉冲能量随温度升高而下降越快。

图 3 为斜率 k 与电子数密度之间的关系曲线。横

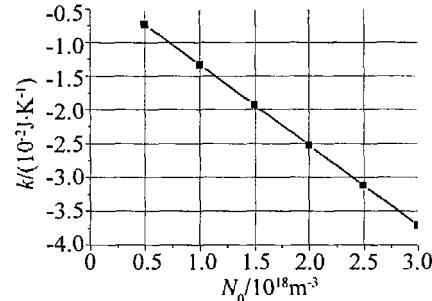
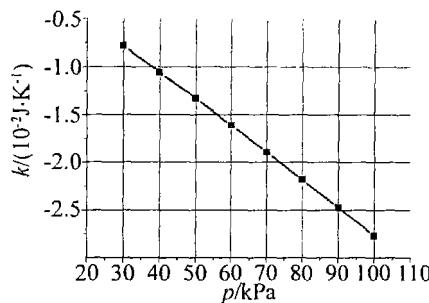


Fig 3 Gradient k versus pumping electron density

坐标为电子数密度参数，纵坐标为斜率 k 。计算中，激光工作气体总气压 50kPa 组成为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.16:0.64:0.04$ ，输出耦合镜反射率 70% 。可以看到，电子数密度越大，激光输出脉冲能量温度升高而下降越快。换言之，注入能量越大，激光器的输出脉冲能量随温度升高而下降越快。

图 4 为斜率 k 与激光工作气体气压的关系。横坐标为激光工作气体总气压，纵坐标为斜率 k 。计算中，激光工作气体组成为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})$ ：

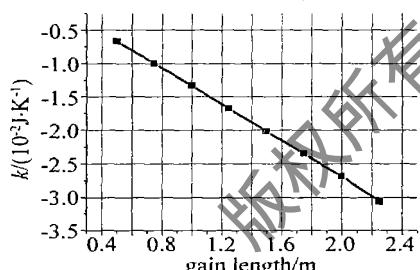
Fig 4 Gradient k versus mixture pressure

$V(\text{CO}) = 0.16:0.16:0.64:0.04$, 输出耦合镜反射率 70%, 电子数密度参数 $N_0 = 1 \times 10^{18}$ 。可以看到, 随着气压的提高, 斜率 k 的绝对值变大。这说明, 高气压下, 激光器输出脉冲能量随温度升高而下降越快。

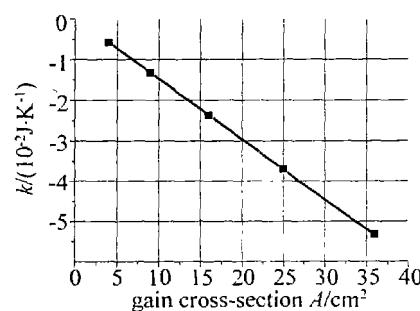
从上面的计算可以看出, 选择合适的激光工作气体组成、降低总气压、减小电子数密度(或减小注入能量)和增大耦合输出在一定程度上可以减小 TEA CO₂ 激光器的输出脉冲能量随温度升高而减小的速度。

2.2 具有不同增益体积的 TEA CO₂ 激光器

依旧假设为 $L = 2.4\text{m}$, 输出耦合镜的反射率为 $R = 70\%$, $D_x \times D_y = 3\text{cm} \times 3\text{cm}$, 激光工作气体总气压 $p = 50\text{kPa}$, 组成为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.16:0.64:0.04$ 电子数密度参数 $N_0 = 1 \times 10^{18}$, 但有效增益长度不同。图 5 为斜率 k 与有效增益长度之间的关系曲线。这实际是不同激光器之间的比较。在这种情况下, 可以看出, 增益长度越长, 激光器输出脉冲能量随温度升高而下降越快。

Fig 5 Gradient k versus active gain length

与图 5 情形有所不同, 保持激光器谐振腔长度为 $L = 2.4\text{m}$, 有效增益长度 $L_g = 1.0\text{m}$, 输出耦合镜的反射率为 $R = 70\%$, 激光工作气体总气压 50kPa , 组成为

Fig 6 Gradient k versus gain cross-section

$V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 0.16:0.16:0.64:0.04$ 电子数密度参数 $N_0 = 1 \times 10^{18}$, 但是, 放电截面大小变化(反射镜面积也相应变化), 图 6 中表示出在这种情况下斜率 k 与放电截面的关系。可以看到, 截面越大, 激光器输出脉冲能量随温度升高而下降越快。

根据计算结果, 也可以看到, 在图 5 和图 6 这两种情形下, 如果增益体积相同, 激光器的输出脉冲能量随温度而变化的特性也基本相同。例如, 图 5 中, $L_g = 2.0\text{m}$ 时, $k = -2.686 \times 10^{-2} \text{ J/K}$; 相同的增益体积将对应图 6 中的 $A = 18\text{cm}^2$, $k = -2.664 \times 10^{-2} \text{ J/K}$ 。两者基本相同。

一般来说, 增益体积越大, 激光输出能量越大。因此, 图 5 和图 6 的计算结果表明, 高能 TEA CO₂ 激光器的输出脉冲能量随温度升高而下降的速度比低能脉冲 TEA CO₂ 激光器要快。

3 结 论

对于增益体积相同的 TEA CO₂ 激光器: (1) 激光输出脉冲能量随温度升高而线性下降; (2) 不同的激光工作气体组成, 激光输出脉冲能量随温度升高而下降的速度不一样; (3) 激光工作气体总气压越高, 激光输出脉冲能量随温度升高而下降越快; (4) 注入能量越大, 激光输出脉冲能量随温度升高而下降越快; (5) 输出耦合镜的反射率越高, 激光输出脉冲能量随温度升高而下降越快。

对于不同增益体积的 TEA CO₂ 激光器: (1) 一般而言, 不同的激光器的输出温度特性不一样; (2) 不同增益体积的激光器, 即使其它参数相同, 激光器输出脉冲能量随温度升高而下降的速率不一样; (3) 与增益体积小的激光器相比较, 增益体积大的激光器, 其输出脉冲能量随温度升高而下降的速度越快。

这些结论值得在设计军用 TEA CO₂ 激光器时借鉴和思考。

参 考 文 献

- [1] HASSON V. Review of recent advancements in the development of compact high power pulsed CO₂ laser radar systems [J]. SPIE, 1999, 3707: 499~512
- [2] 吴 谨, 万重怡, 刘世明 et al. 小型 TEA CO₂ 激光器的温度特性 [J]. 激光技术, 2002, 26(6): 409~410
- [3] SMITH K, THOMSON R M. Computer modeling of gas lasers [M]. New York: Plenum Press 1978 1~78
- [4] 吴 谨, 万重怡. 可调谐 TEA CO₂ 激光器速率方程 [J]. 量子电子学报, 2002, 19(5): 425~430
- [5] MANESK R, SEGUIN J. Physics of CO₂ TEA laser [J]. Appl Phys, 1972, 43(1): 5073~5078
- [6] SOUKIEH M, GHANIB A, HAMMADIM. Mathematical modeling of CO₂ TEA laser [J]. Opt & Laser Technol, 1998, 30(8): 451~457