

文章编号: 0258-7025(2008)05-0664-06

脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长的温度漂移

吴 谨¹ 唐永新¹ 卢远添²

(¹ 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 当工作气体温度变化时, 脉冲 TEA CO₂ 激光器的输出波长也可能发生变化, 此现象称为输出波长的温度漂移。通过建立六温度理论模型, 用数值计算的方法揭示了平凹稳定腔脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长的温度漂移规律。计算结果表明, 这种激光器输出光谱为多谱线结构, 工作气体温度升高, 激光输出波长向长波长方向移动; 工作气体温度降低, 激光输出波长向短波长的方向移动。计算结果还表明, 激光输出波长随温度的漂移局限在 10P 支内, 没有 9 μm 带与 10 μm 带之间的跨带移动, 因此, 采用光栅谐振腔, 可抑制脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长的温度漂移, 稳定激光输出波长。

关键词 激光技术; 脉冲 TEA CO₂ 激光器; 波长-温度漂移; 六温度模型; 平凹稳定腔; 光栅谐振腔

中图分类号 TN 248.2⁺2 **文献标识码** A

Wavelength-Temperature Shift of a Pulsed TEA CO₂ Laser

Wu Jin¹ Tang Yongxin¹ Lu Yuantian²

(¹ Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The output wavelength would change according to the change of the temperature of the gas mixture in a pulsed TEA CO₂ laser, which is called the wavelength-temperature shift. A theoretical model based on the six-temperature mode rate equations is suggested to interpret such a phenomenon, which is used to calculate the wavelength-temperature shift relation of a TEA CO₂ laser with plano-concave stable resonator. The numerical results indicate that the laser simultaneously generates several transition lines at one laser pulse, and the wavelength keeps positive change with the change of the ambient temperature. In addition, the laser's wavelength-temperature shift occurs merely within the 10P branch no matter what ranges the temperature varies. So a grating resonator can easily eliminate the shift and keep the laser output spectra stable.

Key words laser technique; pulsed TEA CO₂ laser; wavelength-temperature shift; six-temperature mode; plano-concave stable resonator; grating resonator

1 引言

脉冲 TEA CO₂ 激光器输出峰值功率高、脉冲能量大、可以高重复频率运转, 在军用和民用领域都得到了一定的应用。理论和实验都表明, 脉冲 TEA CO₂ 激光器的输出脉冲能量受工作气体温度变化影响很大^[1,2], 因此, 在每次脉冲放电开始前, 应当使工作气体得到充分冷却, 以保证激光输出能量的稳定。在民用领域, 空间和环境限制较少, 对 CO₂ 激光器工作气体采取温度控制措施相对容易; 但是, 在军用领域, 由于工作环境温度要求范围宽, 使用限制条件多, 要在较大环境温度范围内控制激光器工

作气体温度会增加系统的体积、重量和制造成本, 带来很多不便。不仅脉冲 TEA CO₂ 激光器的输出脉冲能量随工作气体温度变化很大, 在实际工作中, 还观察到其输出波长也随着工作气体温度变化而漂移至不同的振转谱线。例如, 一台采用平凹稳定腔的脉冲 TEA CO₂ 激光器, 在 +25 °C 环境中, 输出激光波长经测量为 10.55 μm; 当温度升高到 +50 °C 时, 热平衡后, 输出激光波长变为 10.57 μm。这种脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长随温度(指激光工作气体平动温度, 热平衡后, 也是激光器所处周围环境温度)而跳跃至不同振转谱线的现象在本文中称为激光输出波长的温度漂移。关于脉冲 TEA CO₂ 激光

收稿日期: 2007-10-23; 收到修改稿日期: 2007-11-20

作者简介: 吴 谨(1965—), 男, 侗族, 湖南人, 研究员, 主要从事激光技术与应用系统研究工作。E-mail: jwu909@263.net

输出波长的温度漂移现象,在大量关于这类激光器的研究文献中,很少有人涉及,似乎这不是一个重要的问题。事实上,在具体的应用系统设计中,脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长随温度漂移的量值和范围却是一个重要的参考数据,尤其当接收系统对波长非常敏感时,脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长随温度的漂移将可能严重影响整个应用系统的性能。因此,脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长的温度漂移的研究不仅有助于获得波长随温度漂移的规律、数值大小和抑制波长漂移的办法,而且对于脉冲 TEA CO₂ 激光器的实际工程应用具有重要的参考价值。

本文将以在我国军用标准《GJB2225-94 地面电子对抗设备通用技术要求》中规定的 A 级工作温度要求范围(-45~+65 °C,即 228~338 K)为例,基于可调谐 TEA CO₂ 激光器六温度模型速率方程^[3],从理论上探讨了脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长的温度漂移,通过数值计算寻找波长温度漂移的规律,并探索抑制波长温度漂移的办法。

2 激光波长的温度漂移理论解释

激光输出波长决定于工作物质增益的频率特性和谐振腔的频率损耗特性。在脉冲 TEA CO₂ 激光器中,CO₂ 气体的小信号增益系数表示为^[4](以 10P 支为例)

$$\alpha_p(J) = \frac{\lambda^2 hc}{4\pi kT} (2J+1) A_p f(\nu, \nu_0) \times \left\{ N_{00^0} B_{00^0} \exp\left[-F_{00^0}(J) \frac{hc}{kT}\right] - N_{10^0} B_{10^0} \exp\left[-F_{10^0}(J+1) \frac{hc}{kT}\right] \right\}, \quad (1)$$

$$F(J) = BJ(J+1) + DJ^2(J+1)^2, \quad (2)$$

$$P(J) = \left(\frac{2hcB}{kT}\right) g(J) \exp\left[-F(J) \frac{hc}{kT}\right], \quad (3)$$

(1)~(3)式中, J 为激光上能级转动量子数, B 为转动常数, D 为非刚性分子修正项常数, B 和 D 均与所在的振动能级有关; $g(J) = 2J+1$ 为统计权重, T 为激光工作气体平动温度; A_p 为跃迁谱线的自发辐

射概率, ν_0 为应跃迁谱线的中心频率; $f(\nu, \nu_0)$ 为谱线的线型函数。

由(1)式可以知道,CO₂ 激光器的小信号增益与谱线能级、平动温度等因素有关。当其他因素固定时,温度便是影响激光小信号增益系数与跃迁频率关系的主要因素。

此外,当温度发生变化时,激光谐振腔材料的物理特性、谐振腔的机械结构等也会发生变化,从而影响激光谐振腔的频率损耗特性。

3 数学模型

图 1 所示为常用的 TEA CO₂ 激光器谐振腔结构示意图。谐振腔为平凹稳定腔,由一块金属凹面全反镜和一块平面输出耦合镜组成。实际工作中,输出耦合镜常采用双面平行的 ZnSe 晶体,腔内一侧镀部分透射膜,腔外一侧镀增透膜(目前可获得最好水平的 CO₂ 激光增透膜大约为 $R_2 = 0.05\%$),对于输出能量较大的脉冲 TEA CO₂ 激光器,输出耦合镜也常采用双面平行的不镀膜 ZnSe 晶体。

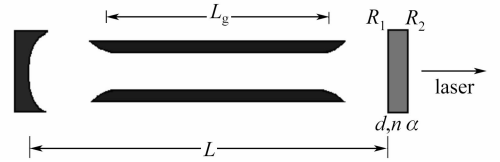


图 1 脉冲 TEA CO₂ 激光器谐振腔结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of a pulsed TEA CO₂ laser resonator

如图 1 所示的简单谐振腔中,双面平行的输出耦合镜实际构成法布里-珀罗(F-P)干涉具,温度变化时晶体材料热胀冷缩引起的变化影响输出耦合镜的频率特性。因此,对图 1 所示的普通非调谐脉冲 TEA CO₂ 激光器,当需要研究温度导致激光输出频率变化时,要将其当作可调谐 TEA CO₂ 激光器处理。

3.1 可调谐 TEA CO₂ 激光器速率方程组

文献[3]给出了一个可用于计算可调谐 TEA CO₂ 激光器输出特性的六温度模型速率方程组

$$\frac{dE_2}{dt} = N_e(t) N_{CO_2} h\nu_2 X_2 - \frac{E_2 - E_2^c(T)}{\tau_{20}(T)} + \frac{E_1 - E_1^c(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \frac{h\nu_2}{h\nu_3} \frac{E_3 - E_3^c(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{h\nu_2}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5^c(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)}, \quad (4)$$

$$\frac{dE_4}{dt} = N_e(t) N_{N_2} h\nu_4 X_4 - \frac{E_4 - E_4^c(T_3)}{\tau_{43}(T)} + \frac{h\nu_4}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5^c(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}, \quad (5)$$

$$\frac{dE_5}{dt} = N_e(t) N_{\text{CO}} h\nu_5 X_5 - \frac{E_5 - E_5^e(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} - \frac{E_5 - E_5^e(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} - \frac{E_5 - E_5^e(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} = & \frac{E_1 - E_1^e(T)}{\tau_{10}(T)} + \frac{E_2 - E_2^e(T)}{\tau_{20}(T)} + \left(1 - \frac{\nu_1}{\nu_3} - \frac{\nu_2}{\nu_3}\right) \frac{E_3 - E_3^e(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \\ & \left(1 - \frac{\nu_1}{\nu_5} - \frac{\nu_2}{\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5^e(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} + \left(1 - \frac{\nu_4}{\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5^e(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)} + \\ & \left(1 - \frac{\nu_3}{\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_3^e(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dt} = & N_e(t) N_{\text{CO}_2} h\nu_1 X_1 - \frac{E_1 - E_1^e(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1^e(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \\ & \frac{h\nu_1}{h\nu_3} \frac{E_3 - E_3^e(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{h\nu_1}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5^e(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} + \\ & h\nu_1 F \left\{ \sum_{J_i} \Delta N_{10P}(J) \frac{(\lambda_i)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(10P)}(J)} f[\nu_i, \nu_0^{(10P)}(J)] \frac{I(\nu_i)}{h\nu_i} \right\} + \\ & h\nu_1 F \left\{ \sum_{J_j} \Delta N_{10R}(J) \frac{(\lambda_j)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(10R)}(J)} f[\nu_j, \nu_0^{(10R)}(J)] \frac{I(\nu_j)}{h\nu_j} \right\} + \\ & h\nu_1 F \left\{ \sum_{J_k} \Delta N_{9P}(J) \frac{(\lambda_k)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(9P)}(J)} f[\nu_k, \nu_0^{(9P)}(J)] \frac{I(\nu_k)}{h\nu_k} \right\} + \\ & h\nu_1 F \left\{ \sum_{J_l} \Delta N_{9R}(J) \frac{(\lambda_l)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(9R)}(J)} f[\nu_l, \nu_0^{(9R)}(J)] \frac{I(\nu_l)}{h\nu_l} \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_3}{dt} = & N_e(t) N_{\text{CO}_2} h\nu_3 X_3 - \frac{E_3 - E_3^e(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{E_4 - E_4^e(T_3)}{\tau_{43}(T)} + \frac{h\nu_3}{h\nu_5} \frac{E_5 - E_5^e(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} - \\ & h\nu_3 F \sum_{J_i} \Delta N_{10P}(J) \frac{(\lambda_i)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(10P)}(J)} \frac{1}{h\nu_i} f[\nu_i, \nu_0^{(10P)}(J)] I(\nu_i) - \\ & h\nu_3 F \sum_{J_j} \Delta N_{10R}(J) \frac{(\lambda_j)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(10R)}(J)} \frac{1}{h\nu_j} f[\nu_j, \nu_0^{(10R)}(J)] I(\nu_j) - \\ & h\nu_3 F \sum_{J_k} \Delta N_{9P}(J) \frac{(\lambda_k)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(9P)}(J)} \frac{1}{h\nu_k} f[\nu_k, \nu_0^{(9P)}(J)] I(\nu_k) - \\ & h\nu_3 F \sum_{J_l} \Delta N_{9R}(J) \frac{(\lambda_l)^2}{8\pi\tau_{\text{sp}}^{(9R)}(J)} \frac{1}{h\nu_l} f[\nu_l, \nu_0^{(9R)}(J)] I(\nu_l). \end{aligned} \quad (9)$$

激光谐振腔内激光光强满足的方程为

$$\begin{aligned} \frac{dI(\nu_i)}{dt} = & -\frac{I(\nu_i)}{\tau_c(\nu_i)} + ch\nu_i \left\{ \frac{F\Delta N_{(a)}(J) (\lambda_i)^2 I(\nu_i)}{8\pi h\nu_i \tau_{\text{sp}}^{(a)}(J)} f[\nu_i, \lambda_0^{(a)}(J)] \right\} + ch\nu_i [N_{001} P_{(a)}(J) S(\nu_i)]. \\ & (a = 10P, 10R, 9P, 9R) \end{aligned} \quad (10)$$

(4)~(10)式中各参数的物理意义及表达式可从文献[4~7]中查到,限于篇幅,不一一列出。该方程组系在文献[5~7]的工作上扩展而来,可用于计算可调谐脉冲 TEA CO₂ 激光器输出的脉冲能量、激光波形、输出激光光谱、输出激光光谱的精细纵模结构等动力学特性^[8,9]。

考虑到计算所涉及的温度范围较大,对方程(4)~(10)中的一些参数因为难以获得其随温度变化的数据,在计算所涉及的温度范围内,做出如下近似:

1) 激光上下能级的转动常数 B 等随温度变化不大;

2) P 支和 R 支内各跃迁谱线的自发辐射寿命

视为常数;

3) 电子激发速率 X_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) 也作为与温度无关的常数。

根据上述近似计算的脉冲 TEA CO₂ 激光器输出脉冲能量随温度变化的情况与实验结果基本相符^[1,2]。这说明,在本文所涉及的温度范围内,上述近似具有一定的合理性。

3.2 脉冲 TEA CO₂ 激光器参数模型

脉冲 TEA CO₂ 激光器参数主要描述三个部分:增益介质、抽运源和谐振腔。

1) 增益介质:即激光工作气体,由 CO₂-N₂-He-CO 等四种气体组成,计算需要设置总气压和组分

比。计算中,假设组分气体体积比为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}):V(\text{CO}) = 1:1:7.7:0.3$,总气压为 101.3 kPa。

在计算中,不同的温度下,激光工作气体的压力保持不变。温度的变化会引起激光混合气折射率的变化,从而引起谐振腔等效长度的变化。谐振腔等效长度的变化也会引起激光输出频率的变化,但是,这种因素引起的波长变化限于同一跃迁谱线宽度内的不同纵模,与本文涉及的激光振转谱线的跳变相比,要小很多,因此,在下面的计算中,忽略激光工作气体折射率随温度变化对激光输出波长的影响。

2) 抽运源:由电子数密度函数 $N_e(t)$ 描述。 $N_e(t)$ 和具体的放电电路、激光工作气体组成、气压等有关。对于紫外预电离 TEA CO₂ 激光器,计算采用经验公式^[5,6]

$$N_e(t) = N_0 \exp\left(\frac{-t}{5 \times 10^{-6}}\right) \times \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{2.5 \times 10^{-6}}\right)\right], \quad (11)$$

式中, N_0 为初始时刻 $t = 0$ 的电子数密度。

3) 谐振腔:设谐振腔长度为 L ,有效增益长度为 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 $L_g \times D_x \times D_y$ 。对 TEA CO₂ 激光器,放电电极是谐振腔的最小限模元件,即计算时谐振腔反射镜较小者的面积可设为 $D_x \times D_y$ 。忽略其他损耗。

对于工程用的 TEA CO₂ 激光器,激光谐振腔安装在由低线膨胀系数材料(如因瓦合金)构成的光桥上,谐振腔长度随温度的变化可以忽略。

如图 1 所示的两块谐振腔镜中,凹球面全反镜为金属铜制反射镜,铜是各向同性金属,温度的变化引起的全反镜曲率半径和反射率的变化可以忽略。在谐振腔准直良好时,输出镜法布里-珀罗标准具的等效光强反射率经简单推导为

$$R(\nu) = \frac{R_1 + R_2 e^{-4\alpha d} - 2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-2\alpha d} \cos(2\varphi)}{1 + R_1 R_2 e^{-4\alpha d} - 2 \sqrt{R_1 R_2} e^{-2\alpha d} \cos(2\varphi)}, \quad (12)$$

式中 R_1, R_2 分别为输出镜的单面光强反射率, d 为输出镜 ZnSe 晶体厚度, α 为 ZnSe 材料的吸收系数, $\varphi = 2\pi\nu nd$, ν 为激光频率, n 为 ZnSe 晶体材料折射率。

对化学气相沉积的 ZnSe 晶体,其有关数据见表 1^[10]。

从表 1 可见,在 8.0~12.0 μm 的波长范围内,ZnSe 晶体材料折射率随波长近似线性变化,对于脉

表 1 ZnSe 晶体有关数据

Table 1 Data of ZnSe crystal

Formula	ZnSe			
Growth method	Chemical vapour deposition			
Structure	Cubic			
Thermal expansion coefficient / ($\times 10^{-6}$ / K)	6.4~7.6 (Calculated value 7.0)			
Wavelength / μm	5.0	10.0	12.0	15.0
Refractive index	2.4296	2.4067	2.3936	2.3662
Absorption coefficient α / cm^{-1}	0.005 (10.6 μm)			

冲 TEA CO₂ 激光器的 9~11 μm 波长范围,用表 1 中 10.0 μm 和 12.0 μm 折射率数据求得线性关系为

$$n(\lambda) = -0.00655\lambda + 2.4722, \quad (13)$$

式中波长单位为 μm 。

假设脉冲 TEA CO₂ 激光器具体结构参数为:放电截面 2 cm \times 2 cm, $L = 1.2$ m, $L_g = 0.7$ m,常温下(25 $^{\circ}\text{C}$)输出镜晶体厚度 6 mm。设全反镜反射率为 1,输出镜常用两种情况:纯 ZnSe 晶体材料,双面不镀膜;一面镀部分反射膜(如 $R_1 = 50\%$ (9~11 μm)),一面镀抗反膜(如 $R_2 = 0.05\%$ (9~11 μm))。计算时,两种输出镜都需要考虑。

根据以上具体激光器设计参数,采用龙格-库塔法数值求解速率方程组(4)~(10)。

4 计算结果

4.1 常温下脉冲 TEA CO₂ 激光器的输出光谱

图 2(a),(b)为常温(298 K)下分别采用两种输出镜时,激光器的输出光谱。图 2(a)为激光器采用双面镀膜($R_1 = 50\%$, $R_2 = 0.05\%$ (9~11 μm))输出镜时的输出光谱,图 2(b)为激光器采用双面不镀膜 ZnSe 晶体作为输出镜时(这时候,输出镜的等效光强反射率约为 51% (9~11 μm))的输出光谱。可见,两种情况下,激光器输出光谱相同,都输出多条谱线,其中,强线都在谱线 10P(16) (波长约 10.55 μm)。这说明,在这个温度下,采用这两种输出镜,对激光器输出光谱没有影响。

4.2 不同温度下脉冲 TEA CO₂ 激光器的输出光谱

表 2 给出了温度从 228 K (-45 $^{\circ}\text{C}$) 到 338 K (+65 $^{\circ}\text{C}$) 变化时,激光输出波长的计算结果。可以看出,温度对激光输出波长的影响较大,在室温 298 K 时,激光输出波长在 10P(16)/10.55 μm ,当温度升高至 318 K 时,温度仅升高了 20 K,激光输出波长漂移至 10P(18)/10.57 μm ,这个计算结果与实验观察基本相符。从表 2 的数据还可得出如下结论:

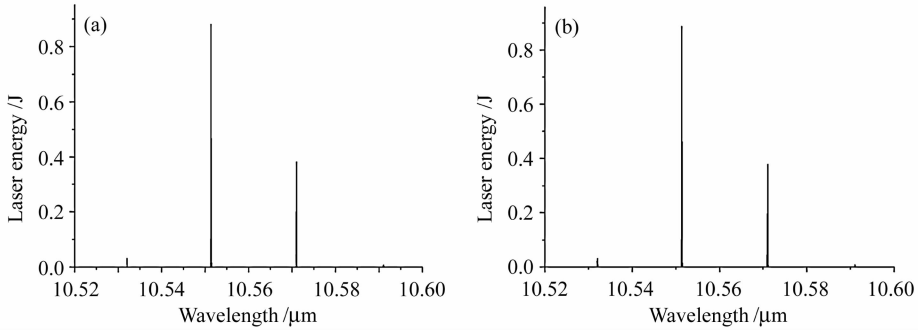


图 2 常温(298 K)激光器(a)双面镀膜输出镜和(b)双面未镀膜输出镜的输出光谱

Fig. 2 Calculated output spectra of laser (a) with double coated coupler and (b) with uncoated coupler at ambient temperature 298 K

表 2 脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长随温度变化的计算结果

Table 2 Calculated laser output wavelengths versus ambient temperatures

Temperature /K	Laser Energy /J							
	Uncoated ZnSe coupler wavelength /μm				Double coated ZnSe coupler wavelength /μm			
	10.53	10.55	10.57	10.59	10.53	10.55	10.57	10.59
228	3.13	1.48			3.14	1.49		
238	2.09	2.27			2.08	2.27		
248	1.29	2.79			1.29	2.79		
258	0.78	3.01			0.78	3.01	0.11	
268	0.48	3.00			0.47	3.00	0.20	
273	0.36	2.93	0.26		0.36	2.94	0.27	
278	0.28	2.84	0.34		0.28	2.83	0.34	
288	0.16	2.52	0.57		0.16	2.52	0.59	
298	0.10	2.04	0.88		0.10	2.05	0.89	
308		1.52	1.26			1.52	1.26	
318		1.05	1.54	0.10		1.05	1.54	
328		0.70	1.69	0.16		0.70	1.68	0.15
338		0.43	1.67	0.25		0.45	1.67	0.25

1) 两种输出镜对脉冲 TEA CO₂ 激光器输出光谱的影响并无不同;

2) 不同温度下,脉冲 TEA CO₂ 激光器输出光谱都包含多条谱线;因此,如果要获得单一支谱线输出,必须采取具有良好频率选择特性的光学谐振腔,如光栅谐振腔;

3) 温度降低时,输出波长向短波长的谱线方向移动(蓝移);温度升高时,输出波长向长波长的谱线方向移动(红移);

4) 激光波长的漂移局限在 10P 支内,没有 9 μm 带与 10 μm 带之间的跨带移动;

5) 在所涉及的温度范围内,激光输出波长(强线)的变化只在 10P 支内连续的三条线之间移动,波长范围只有约 40 nm。

4.3 光栅谐振腔对激光波长温度漂移的抑制

表 2 的计算结果表明,在所考虑的温度范围内,激光波长随温度的漂移局限在 10P16/10.55 μm 附

近几条谱线,没有带间移动。这个结论提示,采用光栅谐振腔可抑制脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长的温度漂移,这是因为光栅具有良好的选线能力,并且 10P16/10.55 μm 附近几条谱线的小信号增益系数差别不大。

将图 1 中的激光器输出耦合镜用一个金属原刻光栅代替,并采用零级耦合输出。金属原刻闪耀光栅一般采用紫铜,紫铜的线膨胀系数为 $\alpha = 17.2 \times 10^{-6}/K$,当温度发生变化时,光栅常数的变化为

$$d(T) = d_0[1 - \alpha(T - 298)], \quad (14)$$

式中 d_0 为温度 298 K 时的光栅常数值(取 120 line/mm)。

激光调谐于 10P(16)线(波长 10.55 μm)时,图 3(a)为激光输出波长随温度变化的数值计算曲线,图 3(b)为激光输出脉冲能量随温度变化的数值计算曲线。

从图 3 可以看出,在所涉及的温度范围内,激光输出波长不随温度变化,激光输出能量随温度升高而下降。图 3(a)说明,脉冲 TEA CO₂ 激光器采用光栅谐振腔时,即使没有采取温度控制措施,激光输出波长也不会随工作气体温度变化而漂移。在工程

应用上,这个结论意味着,对于一个基于脉冲 TEA CO₂ 激光器的主动探测系统,当接收系统对波长极其敏感时,脉冲 TEA CO₂ 激光器采用光栅谐振腔,可以避免激光输出波长的温度漂移,可能对提高系统整体性能有利。

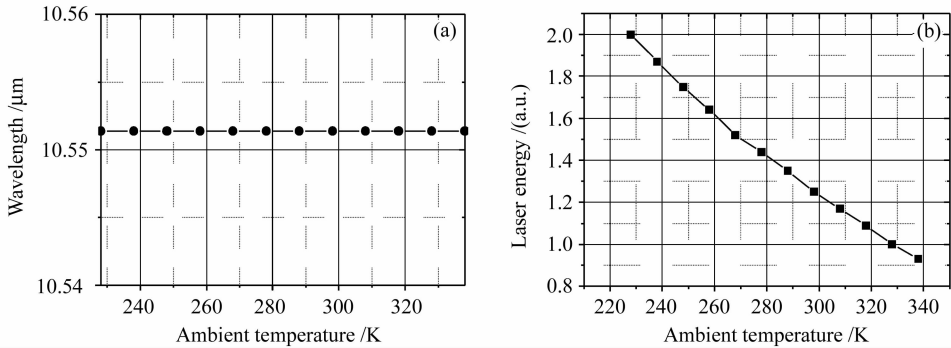


图 3 激光输出波长(a)和能量(b)与工作气体温度的关系

Fig. 3 Laser output wavelength (a) and energy (b) versus ambient temperature

5 结 论

理论计算表明,对于常用的没有频率选择特性的平凹稳定腔脉冲 TEA CO₂ 激光器,当工作气体温度发生变化时,它的输出波长会发生有规律的变化:温度升高,输出波长向长波长的跃迁谱线移动(红移),温度降低时,输出波长向短波长的跃迁谱线移动(蓝移);这种波长温度漂移局限于 10P 支内,没有 9 μm 带与 10 μm 带之间的跨带移动。具体数值是,当工作气体温度从 228 K (-45 °C) 到 338 K (+65 °C) 变化时,激光输出波长的漂移发生在相邻的几条跃迁谱线之间,输出光谱中强线的漂移量约为 40 nm。

平凹稳定腔脉冲 TEA CO₂ 激光器的输出波长随温度漂移的原因在于温度会改变增益谱的分布及谐振腔没有频率选择特性。脉冲 TEA CO₂ 激光器如果采用具有良好选线特性的光栅谐振腔,可以抑制输出波长的温度漂移。此外,高重复频率脉冲 TEA CO₂ 激光器中必须的水冷措施除可以起到冷却激光工作气体以稳定激光输出功率的作用外,还起到限制激光输出波长漂移的作用。平凹稳定腔可认为没有频率选择特性,因此,关于平凹稳定腔脉冲 TEA CO₂ 激光器输出波长温度漂移的理论研究结果具有代表性,这个结果可使工程技术人员在设计军用脉冲 TEA CO₂ 激光器应用系统时,熟悉激光器输出波长的温度漂移情况,为脉冲 TEA CO₂ 激光器的工程应用提供参考。

参 考 文 献

- 1 Wu Jin, Wan Chongyi, Liu Shiming *et al.*. Temperature characteristics of a mini-TEA CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(6):409~410
吴 谨,万重怡,刘世明 等. 小型 TEA CO₂ 激光器的温度特性 [J]. 激光技术, 2002, **26**(6):409~410
- 2 Wu Jin. Theoretical analysis of temperature characteristics of pulsed TEA CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(4):389~391
吴 谨. 脉冲 TEA CO₂ 激光器温度特性的理论分析 [J]. 激光技术, 2005, **29**(4):389~391
- 3 Jin Wu, Changjun Ke, Donglei Wang *et al.*. Mathematical modeling of tunable TEA CO₂ lasers [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(5):1033~1039
- 4 W. J. Wittman. *The CO₂ Lasers* [M]. Springer-Verlag, 1987. 22~60
- 5 Kenneth Smith, R. M. Thomson. *Computer Modeling of Gas Lasers* [M]. New York and London: Plenum Press, 1978. 1~78
- 6 K. R. Manes, H. J. Seguin. Analysis of CO₂ TEA laser [J]. *Appl. Phys.*, 1972, **43**(12):5073~5078
- 7 M. Soukieh, B. Abdul Ghani, M. Hammadi. Mathematical modeling of CO₂ TEA laser [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 1998, **30**(8):451~457
- 8 Wu Jin. Theoretical mode on calculating grating tuned TEA CO₂ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):472~476
吴 谨. 光栅调谐 TEA CO₂ 激光器理论计算模型 [J]. 光学学报, 2004, **24**(4):472~476
- 9 Ren Deming, Wang Yuanhu, Qu Yanchen *et al.*. Rapidly tuned TEA CO₂ laser by a scanning mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1027~1031
任德明,王元虎,曲彦臣 等. 采用扫描镜方式的快调谐 TEA CO₂ 激光器 [J]. 中国激光, 2007, **34**(8):1027~1031
- 10 www.crystal-gmbh.com