

文章编号: 0258-7025(2007)08-1027-05

# 采用扫描振镜方式的快调谐 TEA CO<sub>2</sub> 激光器

任德明, 王元虎, 曲彦臣, 赵卫疆

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 为了研制适用于激光差分吸收雷达(DIAL)的可调谐横向激励大气压(TEA)CO<sub>2</sub>激光器,利用六温度模型速率方程理论,分析了TEA CO<sub>2</sub>激光器的动力学特性,计算了激光器的各种输出特性。设计研制了一台高重复频率快调谐TEA CO<sub>2</sub>激光器,采用共振扫描镜扫描固定光栅的方案实现了激光的快调谐输出。当激光器高重复频率运转时,得到弱支谱线如10P(42)~10P(48)支谱线基横模能量大于100 mJ,脉冲宽度小于100 ns。10P(46)支谱线的远场发散角为2.41 mrad(水平),2.27 mrad(竖直),约为1.6倍衍射极限。实现了任意波长两条谱线在10 ms内快速切换输出。

**关键词** 激光技术;TEA CO<sub>2</sub>激光器;可调谐;激光差分吸收雷达

**中图分类号** TN 248.2<sup>+</sup>1 **文献标识码** A

## Rapidly Tuned TEA CO<sub>2</sub> Laser by a Scanning Mirror

REN De-ming, WANG Yuan-hu, QU Yan-chen, ZHAO Wei-jiang

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** To develop tunable transversely excited atmospheric (TEA) CO<sub>2</sub> laser used in differential absorption lidar (DIAL) system, the kinetic characteristic of a TEA CO<sub>2</sub> laser is investigated, base on the theory of six-temperature model rate equation. The output characteristic of the laser is calculated. A rapidly tuned TEA CO<sub>2</sub> laser at high repetition frequency is manufactured by the result of calculation. With the method of a resonant reflecting mirror scanning a fixed grating, the rapidly tuned TEA CO<sub>2</sub> laser output is realized. The pulse energy of spectral lines such as 10P(42)~10P(48) in fundamental-transverse mode is over 100 mJ at a repetition rate of 100 Hz, and the pulse width is no more than 100 ns. The far-field divergence angles of 10P(46) spectral line are 2.41 mrad (horizontal) and 2.27 mrad (vertical), namely, 1.6 times of diffraction limitation. The laser can be tuned between two different rotational lines spanning the wavelength range within 10 ms.

**Key words** laser technique; transversely excited atmospheric CO<sub>2</sub> laser; tunable; differential absorption lidar

## 1 引言

高重复频率快调谐横向激励大气压(TEA)CO<sub>2</sub>激光器已广泛应用于激光雷达、激光化学、激光抽运远红外研究等诸多领域中<sup>[1~4]</sup>。国内外许多科研机构在可调谐TEA CO<sub>2</sub>激光器的研制方面进行了大量的工作,具有代表性的有俄罗斯的A. I. Karapuzikov等<sup>[5]</sup>研制的用于激光差分吸收雷达的可调谐TEA CO<sub>2</sub>激光器以及国内谭荣清等<sup>[6]</sup>研制的高重复频率可调谐TEA CO<sub>2</sub>激光器。在可调谐TEA CO<sub>2</sub>激光器的大气监测应用中,大气中的某些污染气体会对激光器输出的某些弱支谱线有着强烈

的吸收<sup>[4,5]</sup>,从目前发表的文献来看,以弱支谱线的输出特性为研究目的的TEA CO<sub>2</sub>激光器报道较少。本文设计并研制了一台高重复频率快调谐TEA CO<sub>2</sub>激光器,采用扫描振镜扫描固定光栅的调谐方案,实现了弱支谱线的调谐输出。

## 2 理论分析与设计

### 2.1 理论计算

采用六温度模型理论对TEA CO<sub>2</sub>激光器进行了设计。CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He系统能级跃迁如图1所示,各振动模振动能量变化的速率方程(Landau-Teller方

收稿日期:2007-01-03;收到修改稿日期:2007-03-26

基金项目:哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介:任德明(1969—),男,河北人,教授,博士,主要从事激光技术及应用的研究。E-mail:co2@hit.edu.cn

程组)<sup>[7~10]</sup>可描述为

$$\frac{dE_1}{dt} = N_e(t) N_{\text{CO}_2} h\nu_1 X_1 - \frac{E_1 - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} + \left(\frac{h\nu_1}{h\nu_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \left(\frac{h\nu_1}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} + \nu_1 \Delta N W I_{\nu_0}, \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = N_e(t) N_{\text{CO}_2} h\nu_2 X_2 - \frac{E_1 - E_1(T_2)}{\tau_{12}(T_2)} - \frac{E_2 - E_2(T)}{\tau_{20}(T)} + \left(\frac{h\nu_2}{h\nu_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \left(\frac{h\nu_2}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)}, \quad (2)$$

$$\frac{dE_3}{dt} = N_e(t) N_{\text{CO}_2} h\nu_3 X_3 - \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} + \left(\frac{h\nu_3}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} + \nu_3 \Delta N W I_{\nu_0}, \quad (3)$$

$$\frac{dE_4}{dt} = N_e(t) N_{\text{N}_2} h\nu_4 X_4 - \frac{E_4 - E_4(T_3)}{\tau_{43}(T)} + \left(\frac{h\nu_4}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}, \quad (4)$$

$$\frac{dE_5}{dt} = N_e(t) N_{\text{CO}} h\nu_5 X_5 - \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)} - \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} - \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)}, \quad (5)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E - E_1(T)}{\tau_{10}(T)} + \frac{E_2 - E_2(T)}{\tau_{20}(T)} + \left(1 - \frac{h\nu_1}{h\nu_3} - \frac{h\nu_2}{h\nu_3}\right) \frac{E_3 - E_3(T, T_1, T_2)}{\tau_3(T, T_1, T_2)} + \left(1 - \frac{h\nu_1}{h\nu_5} - \frac{h\nu_2}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_1, T_2)}{\tau_5(T, T_1, T_2)} + \left(1 - \frac{h\nu_4}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_4)}{\tau_{54}(T, T_4)} + \left(1 - \frac{h\nu_3}{h\nu_5}\right) \frac{E_5 - E_5(T, T_3)}{\tau_{53}(T, T_3)}, \quad (6)$$

$$\frac{dI_{\nu_0}}{dt} = -\frac{I_{\nu_0}}{\tau_c} + ch\nu_0 \left[ \frac{\Delta N W I_{\nu_0}}{h} + N_{001} P(J) S \right], \quad (7)$$

(1)~(3)式表示单位体积内  $\text{CO}_2$  分子三个振动模的总能量随时间的变化, (4), (5)式分别表示  $\text{N}_2$  分子及由  $\text{CO}_2$  分子分解的  $\text{CO}$  分子振动态的总能量随时间的变化, (6)式表示混合气体的动能随时间的变化, (7)式表示激光腔内光强的变化<sup>[7,10]</sup>。其中,  $c$  为光速,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为基振动模频率,  $N_e(t)$  表示单位体积电子密度,  $N_i$  表示单位体积内的分子数,  $X_i$  为有效激发速率系数,  $P(J)$  表示第  $J$  个转动能级上的粒子数占整个振动能级粒子总数的百分

数,  $\tau_{ij}$  为弛豫时间,  $\tau_c$  为激光腔内光子寿命,  $I_{\nu_0}$  为激光腔内光强,  $T_i$  表示等效振动温度,  $T$  为气体温度,  $\Delta N$  表示平衡态粒子数反转密度,  $N_{001}$  表示 001 态的粒子数密度。系数  $W = F\lambda^2/4\pi^2\nu\Delta\nu_c\tau_{sp}$ , 其中,  $F$  为填充因子, 等于增益长度与腔长之比  $F = l/L$ ,  $\lambda, \nu$  表示激光波长和频率,  $\Delta\nu_c$  表示碰撞宽度,  $\tau_{sp}$  为自发辐射寿命。系数  $S = 2\lambda^2 d\nu/A\pi\Delta\nu_c\tau_{sp}$ , 其中  $A$  为激光输出窗截面积,  $d\nu$  为受激辐射谱线的线宽。

相关的工作条件: 混合气体的比例  $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}) = 1:1:3$ , 气压为  $5.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ , 激励电压为 18 kV。采用 Rung-Kutta 法对 (1)~(7) 式进行数值求解, 计算得到激光器输出功率随时间的变化, 如图 2 所示。

计算中所使用的参数: 波长  $\lambda = 10.910 \mu\text{m}$ , 激光器腔长  $L = 150 \text{ cm}$ , 增益长度  $l = 100 \text{ cm}$ , 转动能级量子数  $J = 48$ , 气体温度  $T = 300 \text{ K}$ , 腔镜的反射率  $R_1 = 80\%$ ,  $R_2 = 92\%$ , 电子密度函数  $N_e(t)$  表示为<sup>[7,11]</sup>

$$N_e(t) = 7 \times 10^{13} (1 - e^{-t}) e^{-2t}, \quad (8)$$

计算中所用的其他参数参照文献[7]。

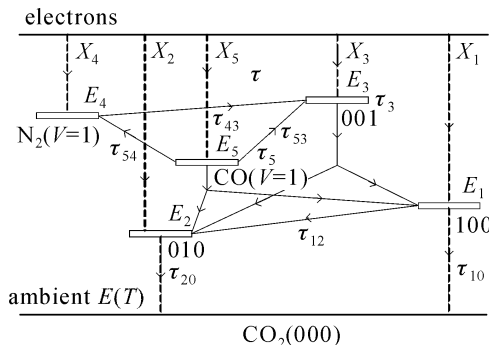


图 1  $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$  系统能级图

Fig. 1 Scheme of energy levels of  $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$  gas mixture

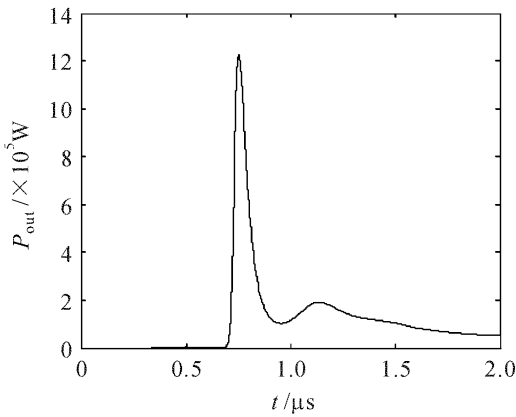


图 2 10P(48) 支谱线脉冲输出功率随时间的变化  
Fig. 2 Output pulse power of 10P(48) spectral line as a function of time

表 1 部分谱线输出参数计算值

Table 1 Calculated value of output parameters of some spectral lines

Spectral line	Average output energy / mJ	Pulse width / ns
10P(42)	271.4	79
10P(44)	252.8	70
10P(46)	236.5	63
10P(48)	240.7	72

当工作温度为 300 K 时, 通过计算得到 10P(42) ~ 10P(48) 支谱线输出参数如表 1 所示。

## 2.2 激光器设计

激光器腔体由放电电极、折返镜、峰值电容、风机和水冷系统等组件组成, 其直径为 40 cm, 长 76 cm。为了提高激光介质的利用率并且减小激光器的体积, 采用双通道放电折叠腔结构。激光器截面如图 3 所示, 激励电路如图 4 所示, 其中 D 为高压二极管, SCR 为可控硅整流器, G 为闸流管。

激光器主电极采用 Chang 氏剖面电极, 电极长

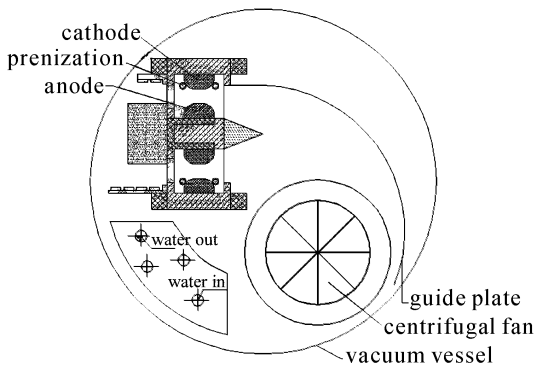


图 3 TEA CO<sub>2</sub> 激光器截面图  
Fig. 3 Section of TEA CO<sub>2</sub> laser

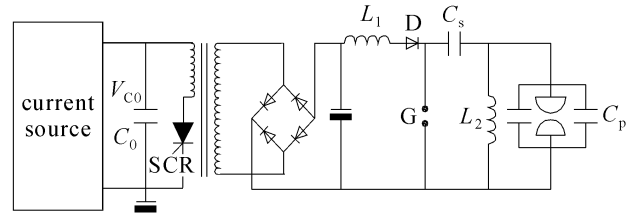


图 4 快放电激励电路

Fig. 4 Fast discharging excited circuit

度 100 cm, 宽度 2 cm, 电极间距 1.5 cm。采用面-线电晕放电紫外预电离方式, 双通道同步放电触发。谐振腔的耦合输出窗为反射率 80%, 曲率半径 20 m 的镀膜 ZnSe 球面镜。利用磁力耦合器驱动横流式风机进行气体横向流动, 在 101.33 kPa 时激活区内气体流速大于 6 m/s, 满足了高重复频率工作要求。

## 2.3 调谐方法

采用反射光栅和输出耦合镜组成的光栅腔对激光器进行调谐, 具有良好的波长选择性、易于控制<sup>[6]</sup>、便于输出波长的定标和识别等优点。目前国内采用以光栅腔进行快速调谐的方法主要有高频步进电机驱动光栅法<sup>[11]</sup>、旋转多面体光栅法<sup>[12]</sup>、电流计控制光栅法<sup>[13]</sup>、多面体旋转棱镜加固定光栅法<sup>[14]</sup>、扫描振镜加固定光栅法等。其中, 扫描振镜属于低惯性扫描器件, 具有角度灵敏度高、再现精度高、扫描角度大、非线性低、调谐速度快等优点。实验中采用共振扫描镜加固定光栅的调谐方案, 得到了弱支谱线的调谐输出。

激光器所采用的光栅为平面衍射光栅, 光栅刻线数为 135 条/mm, 一级衍射效率 92%, 闪耀波长为 10.6 μm。共振扫描镜能接收的电压范围为 ±5 V, 偏转角度约为 ±10°。在实验中, 振镜体至少能够感受到 1.2 mV 电压, 完全可以满足对激光谱线的分辨要求 (8 mV 的电压变化)。

## 3 实验研究

实验系统如图 5 所示。实验中, 激光器工作气体混合比为  $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=1:1:3$ , 气压为  $5.33 \times 10^4$  Pa。使用 818E-20-50L 能量探测计进行激光能量检测, 用光伏型 HgCdTe 探测器 (MCT) 及与之相匹配的前置放大器测量脉冲波形, 由平面光栅单色仪测量波长, 用 TDS3032B 数字存储示波器显示激光脉冲波形。

在单脉冲运转的情况下, 实现了扫描振镜扫描固定光栅选支输出, 获得了 9~10 μm 波段的激光。

在放电电压20 kV,重复频率为100 Hz的条件下,对10P谱区的弱支谱线进行了测试,其中所得到的10P(42)~10P(48)支谱线输出能量的平均值和脉冲宽度如表2所示。

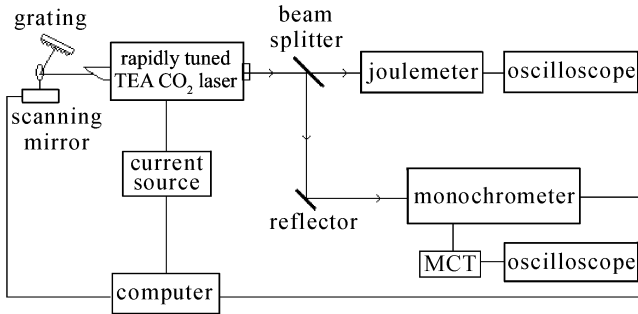


图5 实验系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental system

表2 10P谱区部分谱线输出参数

Table 2 Output parameters of some spectral lines in 10P area

Spectral line	Repetition rate/Hz	Average output energy /mJ	Pulse width /ns
10P(42)	100	184.7	92
10P(44)	100	157.4	89
10P(46)	100	144.3	96
10P(48)	100	113.5	93

采用移动狭缝法在距离激光器输出耦合窗口 $L_1 = 0.3$  m,  $L_2 = 2.8$  m的位置对10P(46)支谱线的束宽进行测量,并经计算得到光束发散角为2.41 mrad(水平),2.27 mrad(竖直),约为1.6倍衍射极限。其中,10P(48)谱线的输出能量如图6(a)所示,高重复频率下输出能量如图6(b)所示,图6(c)为脉冲波形。

在9P,10P两个谱区内,进行了任意两支不同谱线的快调谐输出的实验,实现了在10 ms内相继输出两支不同波长的激光。图7表示其中的10P(48)和9P(46)两支谱线快调谐输出波形图。

## 4 结 论

采用六温度模型,对TEA CO<sub>2</sub>激光器的输出特性进行了计算。按照计算结果,设计并研制了一台TEA CO<sub>2</sub>激光器,利用共振扫描镜扫描固定光栅方法,实现了激光调谐输出。得到激光器弱支谱线(10P(42)~10P(48)支)单脉冲能量超过100 mJ,激光脉冲宽度小于100 ns,实现了任意波长

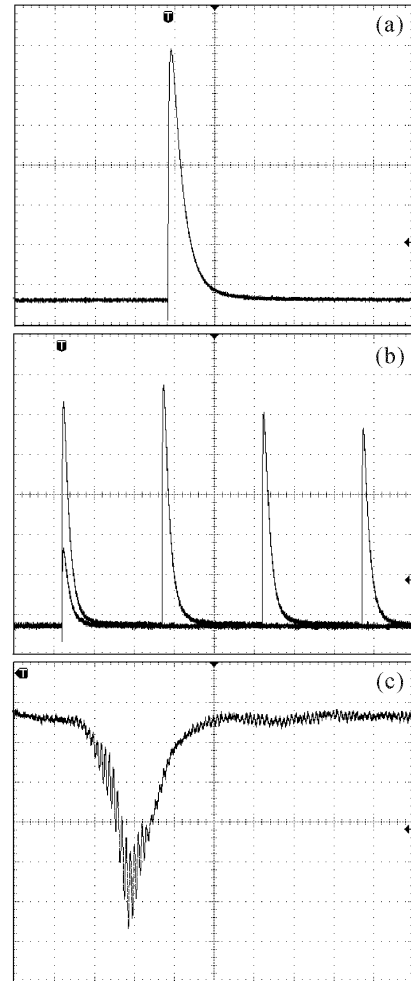


图6 10P(48)支谱线输出能量(a),100 Hz快速触发输出(b)和输出波形(c)

Fig. 6 Output energy (a), 100 Hz fast-spring output (b) and output waveform (c) of 10P(48) line

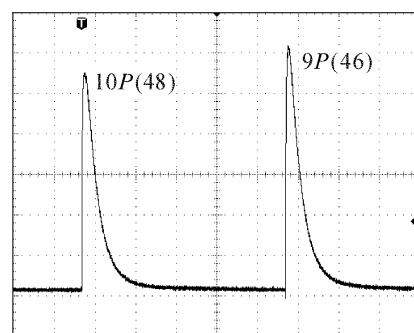


图7 10P(48),9P(46)支谱线快调谐输出波形  
Fig. 7 Fast tuned output waveform of 10P(48) and 9P(46) lines

两条谱线10 ms内的快速切换输出。因此,这种激光器能够满足作为直接探测方式工作的CO<sub>2</sub>差分吸收雷达光源的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Yijun, Tan Rongqing, Ke Changjun *et al.*. Effect of pulse waveform on momentum coupling coefficient [J]. *Chinese*

- J. Lasers*, 2006, **33**(11):1472~1476  
郑义军, 谭荣清, 柯常军 等. 脉冲波形对冲量耦合系数的影响 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1472~1476
- 2 A. R. Bahrampour, A. A. Askari. Fourier-wavelet regularized deconvolution (ForWaRD) for lidar systems based on TEA-CO<sub>2</sub> laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **257**:97~111
  - 3 Mohammad A. Rob, Jerald R. Izatt. Intermodal tuning behavior of an etalon-tuned three-mirror TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1):56~59
  - 4 Yan Chen Qu, Deming Ren, Xiaoyong Hu *et al.*. Rapidly tuning miniature transversely excited atmospheric-pressure CO<sub>2</sub> laser [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24):5025~5029
  - 5 A. I. Karapuzikov, A. N. Malov, I. V. Sherstov. Tunable TEA CO<sub>2</sub> laser for long-range DIAL lidar [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2000, **41**:77~85
  - 6 Tan Rongqing, Wan Congyi, Wu Jin *et al.*. Investigation on tunable high repetition rate TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):739~742  
谭荣清, 万重怡, 吴 谨 等. 高重复频率可调谐 TEA CO<sub>2</sub> 激光研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):739~742
  - 7 K. Simth, R. M. Thomson. Computer Modeling of Gas Laser [M]. New York: Plenum Press, 1978. 25~156
  - 8 Wu Jin. Theoretical mode on calculating grating tuned TEA CO<sub>2</sub> laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):472~476  
吴 谨. 光栅调谐 TEA CO<sub>2</sub> 激光器理论计算模型 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):472~476
  - 9 M. Soukieh, B. Abduh Ghani, M. Hammadi. Mathematical modeling of CO<sub>2</sub> TEA laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**:451~457
  - 10 Tian Zhaoshuo, Wang Qi, Li Ziqin *et al.*. Comparison between the theories of six-temperature model and the rate equation for Q-switched CO<sub>2</sub> laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(12):2369~2374  
田兆硕, 王 骐, 李自勤 等. 电光调 Q CO<sub>2</sub> 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
  - 11 H. Daneshvar-Hosseini, D. L. Begley, H. R. Heidary *et al.*. A microprocessor-controlled laser grating system for laser tuning [J]. *Optics & Laser Technology*, 1982, **6**:137~142
  - 12 F. R. Faxvog, H. W. Mocker. Rapidly tunable CO<sub>2</sub> TEA laser [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(22):3986~3987
  - 13 A. Crocker, R. M. Jenkins, M. Johnson. A frequency agile, sealed-off CO<sub>2</sub> TEA laser [J]. *J. Phys. E:Sci. Instrum.*, 1985, **18**:133~135
  - 14 Jay Fox, L. Jeffrey Ahl. High speed tuning mechanism for CO<sub>2</sub> lidar systems [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(21):3830~3834

\*\*\*\*\*

## 实现 2 μm 固体激光器的注入锁定

2 μm 固体激光器具有处于人眼安全波段和较低的大气消光比等优点, 已成为固体激光雷达的首选光源。将输出单纵模、窄线宽、频率稳定的种子激光注入到环形腔中进行放大, 可以获得满足激光雷达使用的激光光源。

我们使用双端镀膜的 Tm, Ho:YLF 微片作为种子激光器, 在低温条件下, 获得 15 mW 的单纵模、窄线宽、频率稳定的连续光输出, 波长为 2.067 μm。激光器采用环形腔结构, 腔内增益介质是与种子用微片同一块毛坯切割的 Tm, Ho:YLF 晶体, 利用熔融石英声光调 Q 开关, 获得脉冲激光输出。

种子激光经过耦合系统注入到环形腔内, 通过模式匹配和压电陶瓷扫描腔长, 得到与种子光同纵模频率的脉冲激光输出。种子激光器与环形腔之间使用光学隔离器, 避免在激光器调节或者失锁情况

下 2 μm 高能量脉冲激光损伤种子激光器。环形腔自由运转时为双向输出, 在频率锁定时实现单向。相比单纯的种子注入, 在注入锁定时, 环形腔内的脉冲建立时间缩短了近 500 ns, 输出脉冲宽度变窄 20 ns, 脉冲能量稳定性由 88% 变为 98% 以上, 在无突发性外界扰动下锁定率为 100%。最终在重复频率 23 Hz 下, 锁定的环形腔单脉冲输出能量为 2 mJ, 脉冲宽度达 146 ns。所获得的激光器已达到相干多普勒测风雷达对激光光源的要求。

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级

重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

王振国, 鞠有伦, 王月珠

收稿日期: 2007-07-10;

收到修改稿日期: 2007-07-18