

文章编号: 0258-7025(2008)03-0359-04

二维振镜调谐 TEA CO₂ 激光器

王元虎 曲彦臣 赵卫疆 任德明 胡孝勇

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 报道一种快速调谐 TEA CO₂ 激光器。该激光器采取紧凑式 Ernst 电极, 火花阵列放电紫外预电离方式, 采用二维振镜扫描衍射光栅的方案实现了激光的调谐输出。激光器可输出谱线 75 支, 其中 55 支谱线输出能量超过 1 J, 当激光器高重复频率运转时, 10P(20) 谱线基模能量大于 300 mJ, 脉冲宽度约为 70 ns。这种激光器可以在 10 ms 内实现 9.2~10.8 μm 范围内任意两条谱线的调谐输出。

关键词 激光器; TEA CO₂ 激光器; 二维扫描振镜; 快调谐

中图分类号 TN 248.2⁺2 **文献标识码** A

Tunable TEA CO₂ Laser by a Two-Dimensional Scanning System

Wang Yuanhu Qu Yanchen Zhao Weijiang Ren Deming Hu Xiaoyong

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

Abstract A rapidly tunable TEA CO₂ laser is reported. The main electrodes of the laser take the form of Ernst with the spark array preionization. With the method of a two-dimensional (2D) scanning system and a diffraction grating, rapidly tuned TEA CO₂ laser output is realized. Laser with 75 emission lines of the CO₂ molecule rotational transition is obtained, and there are 55 lines, whose pulse energy of laser radiation exceeds 1 J. The pulse energy of 10P(20) line is over 300 mJ in single-transverse mode at a repetition rate of 100 Hz, and the width of the light pulse is 70 ns. The system can be tuned between two different rotation lines spanning the wavelength range from 9.2 to 10.8 μm within 10 ms.

Key words lasers; TEA CO₂ laser; two-dimensional scanning mirrors; rapid tunable

1 引 言

激光差分吸收雷达(LDIAL)作为遥测空气污染物的工具被广泛应用于大气监测中^[1]。波长可调的 TEA CO₂ 激光器工作在 9~11 μm 波段, 与许多污染气体的特征吸收谱一致, 而且是运行在大气窗口技术成熟的激光器, 因此, 可调谐 TEA CO₂ 激光器可以作为激光差分吸收雷达系统的理想光源^[2,3]。激光差分吸收雷达系统要求可调谐激光器在大气“冻结”时间内(≤10 ms)向待测空间发射两束不同波长的激光^[4], 早期的 CO₂ 激光差分吸收雷达系统大多采用两台波长固定的 CO₂ 激光器作为发射器^[5], 随着快调谐技术的发展, 单台 CO₂ 激光器作为激光差分吸收雷达的发射源得到了广泛的使

用。目前国内外采用的快速调谐方法主要有高频步进电机驱动光栅^[6,7]、旋转多面体光栅^[8]、电流计控制振镜扫描固定光栅^[9]、多面体旋转棱镜扫描固定光栅^[10]等方法。

扫描振镜作为调谐元件具有角度灵敏度高、再现精度高、调谐速度快等优点^[11], 而采用一维振镜扫描衍射光栅调谐输出得到的激光光束指向性(不同波长输出光束指向一致)并不理想。为此, 本文研制了一台高重复频率快调谐 TEA CO₂ 激光器, 采用火花阵列放电紫外预电离方式, 二维振镜扫描衍射光栅的调谐方案, 实现了激光谱线的高能量快调谐输出。

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-09-29

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划(HITQNJ.S. 2006. 025)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介: 王元虎(1982—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事可调谐激光技术的研究。E-mail: wangyuanhu@126.com

导师简介: 任德明(1967—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 目前主要从事可调谐激光技术及激光雷达技术的研究。

2 利用二维振镜的调谐方法

可调谐 CO₂ 激光器中的调谐器件一般采用闪耀光栅,我们采用输出耦合镜与以利特罗(Littrow)自准直工作方式的闪耀光栅构成的谐振腔对激光进行调谐。由于光栅一级衍射波长与光栅和光轴所成的角度有关,因此激光器的输出波长可以通过倾动或者转动光栅来调谐得到。当闪耀光栅以利特罗自准直方式安装时,激光器的输出波长可表示为

$$2d\sin\theta = k\lambda, \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数, θ 为衍射角, k 为光栅衍射级次, λ 为输出波长。表征衍射光栅分辨两条波长差很小的谱线能力的色分辨本领为

$$A = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = kN, \quad (2)$$

式中 $\delta\lambda$ 为光栅所能分辨的最小的波长差, N 为光栅总刻线数。光栅常数与激光一级闪耀波长应满足

$$0.5\lambda < d < 1.5\lambda. \quad (3)$$

实验中所用的光栅刻线数为 150 lines/mm, 宽度 50 mm 的金属基底镀铝原刻光栅, 闪耀波长为 10.59 μm , 衍射级次为一级。经过计算得到在 10P(20) 谱线的闪耀角为 52.61°, 可知最小可分辨波长差 $\delta\lambda$ 为 1.41 nm。CO₂ 激光谱线间隔为 8~25 nm, 因此该光栅可以满足所有 00⁰1~10⁰0 和 00⁰1~02⁰0 能级跃迁输出谱线的需要。

激光的光束指向性严重影响着激光差分吸收雷达的探测灵敏度和空间分辨能力^[12]。使用二维振镜扫描衍射光栅,使得谐振光在光栅上的扫描从一维扩展到二维。图 1 为二维振镜扫描衍射光栅示意图,两个扫描振镜在各自的振镜控制器的控制下转动。由于采用了两个方向上的振镜相互配合,能够使谐振光以不同的角度入射到光栅上,通过振镜控制器使谐振光在平面内扫描。这不仅大大减小了谐振腔的调整难度,而且提高了输出光束的指向性。对 10P(20) 和 9P(18) 两支谱线输出光束的指向性进行了比较,接收屏距输出耦合镜 2 m 位置。采用一

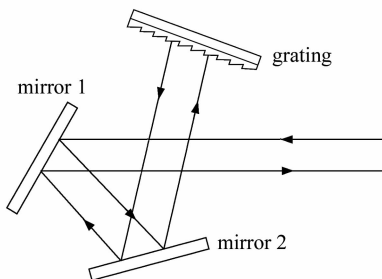


图 1 二维振镜结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D scanning mirrors

维振镜扫描时,接收屏上两光斑中心位置在竖直方向上偏离约 3 mm。采用二维振镜扫描,接收屏上两光斑的中心位置在测量误差范围内能够重合。

3 实验装置

激光器腔长为 1100 mm,由二维扫描振镜和衍射光栅进行调谐,实验装置如图 2 所示。激光器的腔体由不锈钢材料制成,长度为 900 mm,直径 300 mm,其结构如图 3 所示。主放电电极采用紧凑型 Ernst 电极,电极宽度 20 mm,间距 20 mm,激活长度 500 mm,激活体积约为 200 cm³。采用火花阵列放电紫外预电离方式。谐振腔的耦合输出窗为反射率 55%,曲率半径 15 m 的镀膜 ZnSe 球面镜。实验中所使用的光栅面积为 20 mm×50 mm,光栅刻线为 150 lines/mm,闪耀波长为 10.59 μm ,在 9.2~10.8 μm 波段处的一级衍射效率 $\geq 95\%$ 。控制振镜转动的是扫描振镜控制器,控制器接收由 BNC-212 信号发生器输入的模拟电压信号,然后将它转变成扫描振镜输出轴的一个稳定可重复的角度位置。扫描振镜能够接收最大为 ± 4.85 V 的直流电压信号,相对平衡位置偏转的最大角度约为 $\pm 9.7^\circ$ 。进行了扫描振镜分辨率的实验。根据(1)式,取 $k = 1$,计算得到相邻两支谱线的闪耀角之差约为 1.7 mrad,

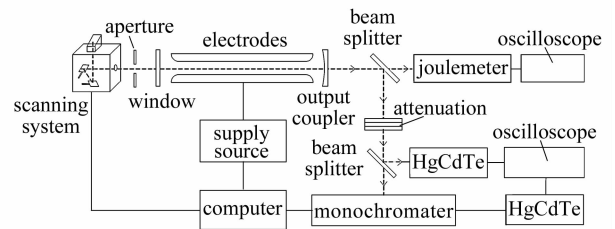


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

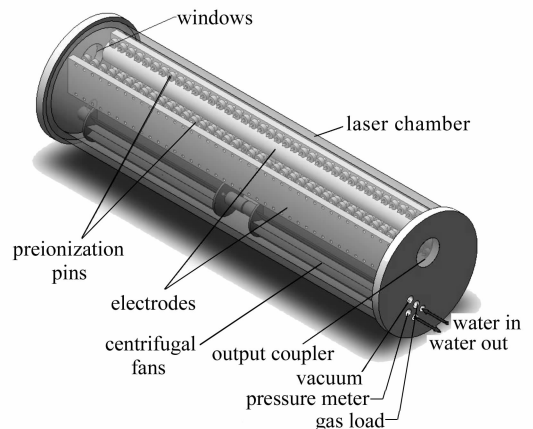


图 3 激光器腔体结构图

Fig. 3 View of the laser head

而扫描振镜的角分辨率可以达到 $41.2 \mu\text{rad}$,因此可以满足分辨激光谱线的要求。

激光器激励电源采用 L-C 反转电路,如图 4 所示。直流高压电源通过限流电阻 R 对储能电容 C_1 充电至初始电压 V_0 ,当外部触发信号使闸流管导通后, C_1 通过闸流管形成的回路使火花阵列击穿,火花放电生成的紫外光使激光介质电离并产生初始电子;当主放电电极两端的电压达到放电介质的着火电压时,主电极间放电。激光器的重复频率可以达到 100 Hz ,能够满足在 10 ms 内输出两支不同激光的要求。实验中 $C_1 = 65 \text{ nF}$, $C_2 = 200 \text{ pF}$ 。

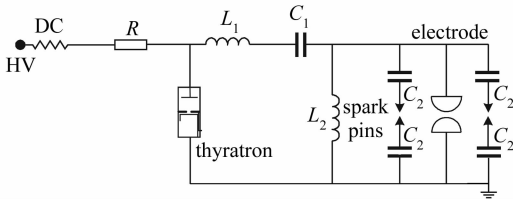


图 4 激励电路框图

Fig. 4 Schematic diagram of the excitation circuit used for energizing the laser

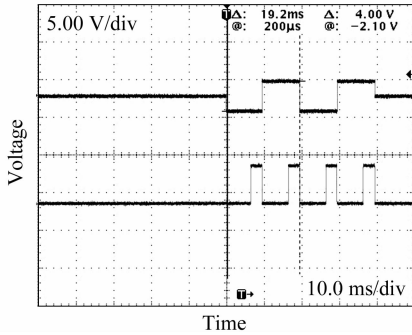


图 5 振镜 1 信号与同步触发信号脉冲波形图

Fig. 5 Pulse waveform of scanning signal and trigger signal at the same time

二维扫描振镜的转速由计算机控制,在确定振镜角度的同时触发 PC-7501 卡控制激光器放电。图 5 为控制振镜信号与同步触发信号脉冲波形图。

实验中,激光器输出能量使用 818E-20-50L 热释电焦耳计进行检测。使用液氮冷却的 PV-MCT 探测器测量脉冲波形,并用 TDS3032B 数字存储示波器予以显示。由焦距为 0.5 m 的红外光栅单色仪和 PV-MCT 探测器测量激光波长。

4 实验研究

为确定激光器最佳工作参数,对激光器自由振荡输出特性进行了实验研究。实验中所使用的工作气体体积比为 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He}) = 1:1:3$,在

激光器正常辉光放电条件下,研究了激光器效率和能量随气压以及工作电压的变化。图 6 为激光器在不同气压下,改变电压,得到的最大转换效率变化。图 7 和图 8 分别为在工作气压为 $9.40 \times 10^4 \text{ Pa}$,改变工作电压,得到的激光器输出能量和光电转换效率的变化。由实验结果可知,激光器的最佳工作气压为 $9.40 \times 10^4 \text{ Pa}$,最佳工作电压为 23 kV 。

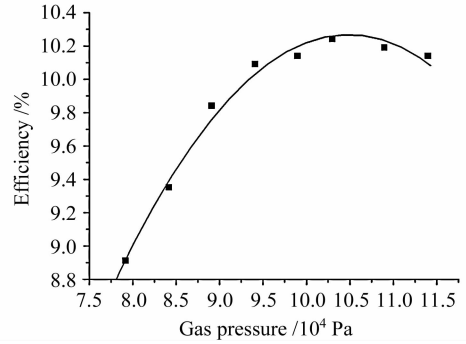


图 6 激光器最大转换效率随工作气压的变化

Fig. 6 Maximum electro-optic efficiency of the laser as a function of the gas pressure

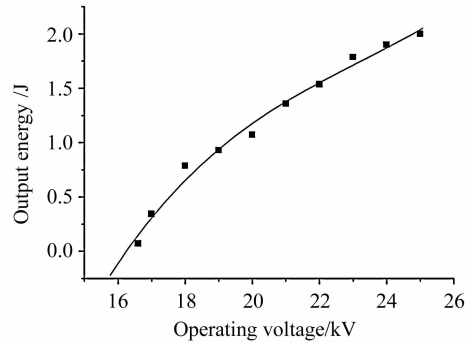


图 7 激光器输出能量随工作电压的变化

Fig. 7 Output energy as a function of the operating voltage

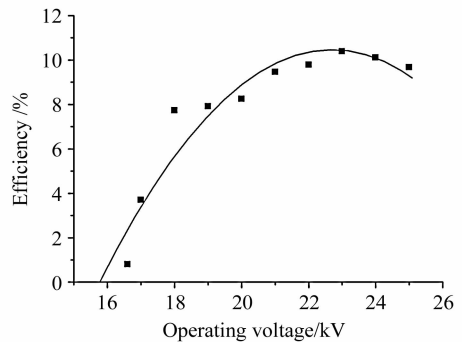


图 8 激光器光电转换效率随工作电压的变化

Fig. 8 Electro-optic efficiency of the laser as a function of the operating voltage

在单脉冲运转的情况下,实现了二维振镜扫描固定光栅选支输出,获得了 $9.2 \sim 10.8 \mu\text{m}$ 波段的激

光输出。在放电电压为23 kV,重复频率为2 Hz的条件下,共获得75支谱线输出,其中9P(18)线,9R(16)线,10P(20)线,10R(18)线等各支谱线多模输出能量的平均值如图9所示。

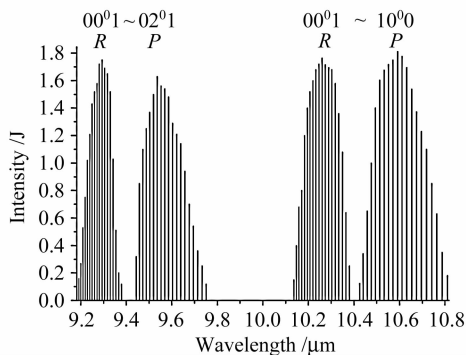


图9 调谐谱线波长与能量分布

Fig. 9 Dependence of laser pulse energy as a function of emission wavelength

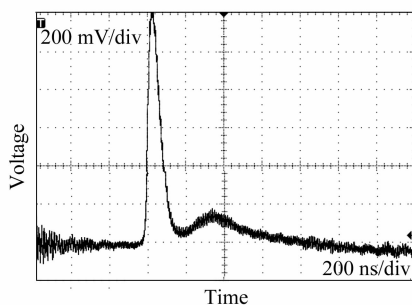


图10 10P(20)谱线波形图

Fig. 10 Laser pulse waveform of 10P(20)

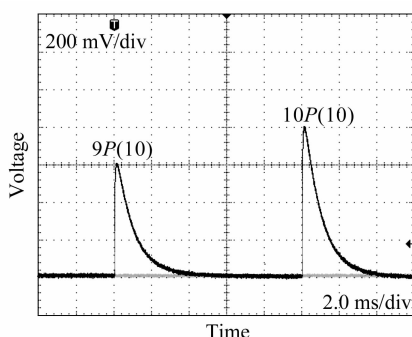


图11 9P(10),10P(20)谱线快调谐输出波形图

Fig. 11 Oscillogram of rapid tuning laser 9P(10) and 10P(20) lines within 10 ms

在激光谐振腔内插入直径为10 mm的光阑使激光器TEM₀₀模式输出,在放电电压23 kV条件下,10P(20)谱线输出能量为370 mJ,图10为10P(20)谱线脉冲波形,整个激光脉冲的持续时间约为1.2 μs,脉冲半宽度约为70 ns。

在9.2~10.8 μm范围内,进行了任意两支不同谱线的快调谐输出的实验,由计算机控制二维振

镜旋转的角度,当振镜旋转到所需输出波长的角度时同步触发激光器产生辉光放电,实现了在10 ms内相继输出两支不同波长的激光。图11表示其中的9P(10)和10P(20)两支谱线快调谐输出波形图。

5 结 论

所得到的实验结果证明采用二维扫描振镜扫描衍射光栅的TEA CO₂激光器具有较高的输出能量,调谐精度高,输出谱线较多,并且可以高重复频率工作。在9.2~10.8 μm范围内,得到了75条激光谱线的输出,并且可以实现任意波长两条谱线在10 ms内的调谐输出。

参 考 文 献

- 1 A. I. Karapuzikov, I. V. Ptashnik, I. V. Sherstov *et al.*. Modeling of helicopter-borne tunable TEA CO₂ DIAL system employment for detection of methane and ammonia leakages[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2000, **41**:87~96
- 2 V. O. Petukhov, V. A. Gorobets, A. A. Matsukevich. Lidar/DIAL gas detection of atmosphere pollutants with H₂O calibration[C]. Conf. Lasers Electro. Opt. Eur. Tech. Dig., 2000. 252
- 3 Zhang Lili, Ren Deming, Qu Yanchen *et al.*. Experimental research on TEA ¹³C¹⁶O₂ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1169~1172
张莉莉,任德明,曲彦臣等. TEA ¹³C¹⁶O₂激光器的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1169~1172
- 4 Clinton B. Carlisle, Jan E. van der Laan, Lewis W. Carr *et al.*. CO₂ laser-based differential absorption lidar system for range-resolved and long-range detection of chemical vapor plumes [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(27):6187~6200
- 5 Toshikazu Itabe, Kazuhiro Asai, Mitsuo Ishizu *et al.*. Measurements of the urban ozone vertical profile with an airborne CO₂ DIAL [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(5):931~934
- 6 H. Daneshvar-Hosseini, D. L. Begley, H. R. Heidary *et al.*. A microprocessor-controlled laser grating system for laser tuning [J]. *Optics and Laser Technology*, 1982, **6**:137~143
- 7 Yanchen Qu, Deming Ren, Xiaoyong Hu *et al.*. Rapidly tuning miniature transversely excited atmospheric-pressure CO₂ laser [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24):5025~5029
- 8 F. R. Faxvog, H. W. Mocker. Rapidly tunable CO₂ TEA laser [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(22):3986~3987
- 9 A. Crocker, R. M. Jenkins, M. Johnson. A frequency agile, sealed-off CO₂ TEA laser [J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1985, **18**:133~135
- 10 Jay Fox, Jeffrey L. Ahl. High speed tuning mechanism for CO₂ lidar systems [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(21):3830~3834
- 11 Ren Deming, Wang Yuanhu, Qu Yanchen *et al.*. Research of 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. 采用扫描振镜方式的快调谐 TEA CO₂激光器的研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1027~1031
- 12 M. J. Landry. Beam characteristics of a lidar system [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(1):63~73