

小型多功能 CO₂ 激光器

谢冀江, 李殿军, 张传胜

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:研制了一种小型多功能 CO₂激光器。该激光器可以单脉冲、重复频率或连续方式输出,并可实现输出脉冲频率的编码及波长调谐。激光器谐振腔采用光栅一级振荡,零级输出的工作方式,分别利用声光调 Q 技术和脉冲放电技术实现了百纳秒至亚毫秒量级的脉冲激光输出。介绍了该激光器中基于光学角反射器原理设计的光栅调谐定向输出装置,并对其进行了理论计算和论证,实现了不同波长激光的定向、定位输出,获得调谐激光输出谱线超过 60 条,谱线分辨率优于 0.01 μm 。激光器脉冲重复频率 1 Hz ~ 10 kHz 连续可调,输出波长 9.2 ~ 10.8 μm ,激光器连续输出最大功率 8 W,重复频率 1 kHz 时最小激光脉宽 180 ns,峰值功率 4 062 W。该激光器在激光与物质相互作用研究领域,特别是在激光对物质作用与破坏机理的研究方面具有重要的应用价值。

关键词:CO₂激光器;波长调谐;声光调 Q

中图分类号:TN248.22 **文献标识码:**A

Compact multifunctional CO₂ laser

XIE Ji-jiang, LI Dian-jun, ZHANG Chuan-sheng

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: A compact multifunctional CO₂ laser is constructed. This laser can work at behaviors of single pulse, repetition frequency or continuous operation and also can realize pulse frequency coding and wavelength tuning. The resonator in the laser adopts an operation mode of zero-level output and first-order oscillation to achieve pulsed laser output time from a hundreds nanosecond level to a sub-millisecond level by using the technologies of acousto-optical Q -switch and pulse discharge. A grating tuned directional output device consisting of a rotating platform, a infrared grating and a plane mirror is introduced based on an optical angle reflector to realize the directional and positional outputs of different wavelengths, which has obtained 60 laser spectral lines with a resolution of 0.01 μm . From experiments it shows the laser can provide the pulse repetition rate continuously from 1 Hz to 10 kHz and the tuning ranges of output wavelength from 9.2 μm to 10.8 μm , also a maximal continuous output power of 8 W, a minimal pulse width of 180 ns and a maximal peak power of 4 062 W. The laser has great applied values in the scientific fields of laser interacting with materials, especially in the mechanism investigation on the damage effect of lasers on materials.

Key words: CO₂ laser; wavelength tuning; acousto-optical Q -switching

1 引言

近年来,随着激光与物质相互作用科学的发展和研究的深入,作为主要辐射源的 CO₂激光器的相关技术得到了长足发展,但同时对此类激光器的谱线和功率覆盖范围、激光输出方式及激光器的操控性等方面也提出了更高的要求^[1-3]。为此本文研制了一种小型多功能 CO₂激光器^[4],该激光器可以单脉冲、重复频率(脉宽范围百纳秒级至亚毫秒级)或连续方式输出,并可实现输出脉冲频率的编码及波长调谐。小型 CO₂激光器的波长调谐通常是采用光栅色散原理实现的^[5,6],但在实施方案上有所不同。本文分析了各种方案的优缺点,提出了采用光栅一级振荡,零级输出的工作方式,并基于光学的角反射原理设计了一套光束定向装置,使激光器在波长调谐的过程中保持输出激光束的方向和相对于激光输出窗口的位置不变。实验证明,该调谐方式激光指向稳定,调谐方便,波长定位准确,谱线分辨率优于 0.01 μm。以此技术为基础设计的小型多功能声光调 Q CO₂激光器实现了 9.2 ~ 10.8 μm 的全波段激光单线输出,输出谱线超过 60 条。激光器重复频率可在 1 Hz ~ 10 kHz 调节,在 1 kHz 时获得的最窄激光脉宽为 180 ns,最大峰值功率为 4 062 W。

2 CO₂激光器波长调谐方式的选择

利用光栅进行激光器波长调谐通常有两种方式,一种是一级振荡、一级输出(图 1),另一种是一级振荡,零级输出(图 2),但其波长调谐原理是相同的,即利用了光栅对不同波长的激光束具有

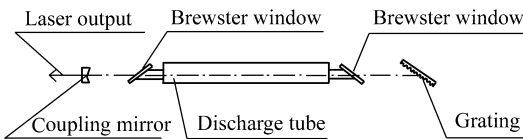


图 1 一级振荡、一级输出 CO₂激光器谐振腔
Fig. 1 First-order oscillating and first-order output CO₂ laser cavity

不同的衍射角这一基本性质。

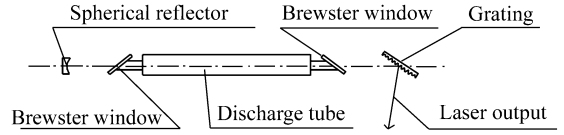


图 2 一级振荡、零级输出 CO₂激光器谐振腔
Fig. 2 First-order oscillating and zero-order output CO₂ laser cavity

由光栅方程^[7]可知其衍射角与光栅常数及波长的关系如下:

$$d(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数,即光栅的刻槽间距, α 和 β 分别为激光束的入射角和衍射角, m 为衍射级次, λ 为激光波长。实际上由光栅和全反镜(或透镜)构成的谐振腔,通常选择工作在 Littrow 自准直条件下^[7],即使光栅的一级振荡方向与光轴重合,此时由于入射角 α 与衍射角 β 相等,光栅方程(1)变为:

$$2d\sin\alpha = m\lambda, \quad (2)$$

式(2)表明,在 Littrow 自准直条件下,只有满足该方程的谱线才能在腔内建立振荡,其它波长的光则因光栅衍射角度的不同造成较大的损耗而无法形成振荡。 $\alpha(\beta)$ 仅由光栅的刻槽间距 d 决定,每一级次的相对光强分布,即衍射效率则取决于光栅刻槽的形状、光栅的入射面特性、入射光的偏振特性等因素^[8]。因此,提高衍射效率,需要减少衍射级数。通过限制刻槽间距,能使正一级衍射级次外其它的衍射级次所对应的衍射角超出光栅的反射面,使其不再存在。要满足这样的条件,所选择的激光波长 λ 对应的光栅刻槽数应该满足下述关系:

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

由此,可得到 9 ~ 11 μm 激光波长调谐对应的 d 值为 5.5 ~ 13.5 μm,相应的光栅刻线数为 74 ~ 181 l/mm。实际工作中选择了 120 l/mm,波长调谐采用了图 2 所示的方式,其优点是可采用镀金膜的球面全反射镜,其反射率较高($\geq 98\%$),光栅的输出透过率(零级衍射效率)可根据激光管的增益情况设定,缺点是波长调谐时激光输出的方向随光栅的转动而变化。而图 1 的方式则由于

光栅的一级衍射面作为激光器的全反射面,使实际工作中的反射效率很难达到95%以上,所以造成腔内的损耗很大,不利于激光输出,但是此方式的优点是在波长调谐过程中,激光输出的方向保持不变。

3 光束定向系统设计原理

在一级振荡零级输出工作模式的具体实现中,为了保证光栅转动过程中输出光束方向始终恒定,需要用一面平面反射镜与光栅反射面形成角反射镜结构。如果光栅和反射镜反射面形成的交线与转轴不严格重合,则输出光束随着光栅的转动会产生平移,这就给设计带来了困难。本文设计了光束定向系统,其工作原理如图3所示,图中 AO 为光栅, AB 为全反射镜,光线1为入射光,光线2为出射光,光栅与全反镜的夹角为 θ ($< 90^\circ$),经计算可知光线2与 X 轴的夹角为 2θ ,入射光1以 α 角入射时,在直角坐标系 XOY 中有:

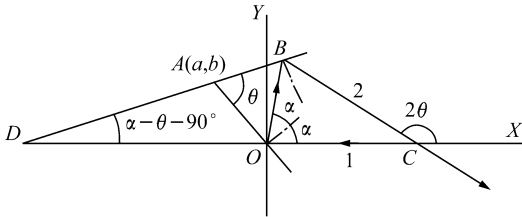


图3 光束定向系统原理

Fig. 3 Principle of beam orientation system

B 点坐标(X_b, Y_b)为:

$$X_b = (b - a \times \tan(\alpha + \theta - 90^\circ) / (\tan(2\alpha) - \tan(\alpha + \theta - 90^\circ))) /$$

$$Y_b = \tan(2\alpha) \times X_b$$

C 点坐标(X_c, Y_c)为:

$$X_c = X_b - Y_b / \tan 2\theta = X_b \times (\tan 2\theta - \tan 2\alpha) / \tan(2\alpha)$$

$$Y_c = 0$$

C 点距原点的距离为:

$$|OC| = b \times \tan \theta - b \times \tan \alpha$$

当光栅以 A 点为轴顺时针旋转 $\Delta\alpha$ 角度时,即入射角变为 $\alpha - \Delta\alpha$,此时原点移动,设到达 O' 点,则 C 点距 O' 点的距离:

$$|O'C| = b \times \tan \theta - b \times \tan(\alpha - \Delta\alpha)$$

变化前与变化后的距离差:

$$\Delta l = |O'C| - |OC| =$$

$$b \times \tan(\alpha) - b \times \tan(\alpha - \Delta\alpha), \quad (4)$$

而此时 O' 相对于 O 点位置变化:

$$\Delta 2 = b \times \tan(\alpha) - b \times \tan(\alpha - \Delta\alpha), \quad (5)$$

对比(4)、(5)两式可知, C 点相对于 O 点的位置没有发生变化,即当光栅(AO)和反射镜(AB)旋转时,光线2仍沿着原方向和位置传播,而其方向和位置仅由光栅与反射镜的夹角(θ)决定。

4 激光器波长调谐装置

根据上述原理设计的激光器波长调谐装置如图4所示,光栅和平面反射镜1置于水平放置的转台上,调整支架使两者的表面与平台垂直且保证其交线与转台的轴线重合。光栅的衍射方向为水平方向,设定光栅和平面反射镜1的夹角为 60° ,则经反射镜1输出的激光束与激光器光轴的夹角亦为 60° ,再经反射镜2输出。

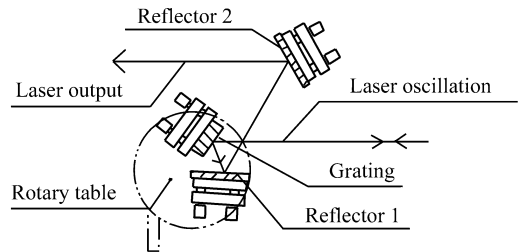


图4 激光器波长调谐系统

Fig. 4 Laser wavelength tuning system

需要注意的是,转台的旋转精度要与激光器输出波长的调谐精度,也就是谱线的间隔相对应。由于在 $9.3 \mu\text{m}$ 处, CO_2 激光的最小谱线间隔为 $0.01 \mu\text{m}$,由式(2)可知,分辨相邻两条谱线的相应转角应为 $2.5'$ 。 $9.2 \sim 10.8 \mu\text{m}$ 调谐范围对应的转角为 6.93° 。这里的 d 值为 $8.3 \mu\text{m}$ (120 l/mm 光栅), m 为1。

对式(2)求导得到激光输出波长差 $\Delta\lambda$ 与光栅转角 $\Delta\alpha$ 的关系可由下式表示:

$$\Delta\lambda = 2d \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2d}\right)^2} \Delta\alpha, \quad (6)$$

可见波长差 $\Delta\lambda$ 随光栅转角 $\Delta\alpha$ 呈线性变化,

如图5所示。可看出,转角精度为2.5'的转台即可满足最小相邻波长间隔(0.01 μm)的分辨率要求。

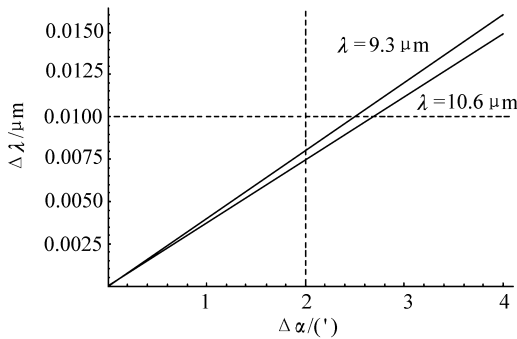


图5 Δλ 与 Δα 的关系

Fig. 5 Relationship of Δλ and Δα

实验采用的转台为北京卓立汉光仪器有限公司生产的RSM82-1A型精密旋转台,微调范围为±10°,旋转精度为2',满足了该激光器的谱线分辨率0.01 μm(对应转角2.5')和谱线调谐范围9.2~10.8 μm(对应转角6.93°)的要求。设计并制成的激光器波长调谐系统如图6所示。

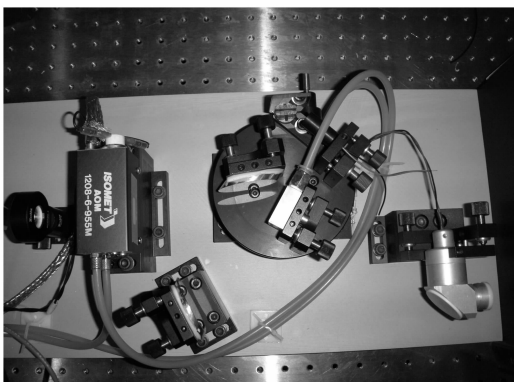


图6 激光器波长调谐系统实物照

Fig. 6 Photo of laser wavelength tuning system

5 实验结果与分析

激光器谐振腔设计的主要参数为:放电增益区长度800 mm,放点管内径8 mm,谐振腔长度1.2 m,反射镜曲率半径2.5 m,光栅一级反射率75%(闪耀波长10.6 μm)。利用CO₂激光谱线分析仪和LP-3C型激光功率计测得的小型多功能

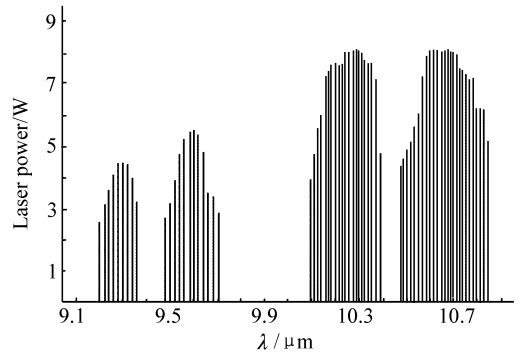


图7 激光输出谱线

Fig. 7 Laser spectral lines

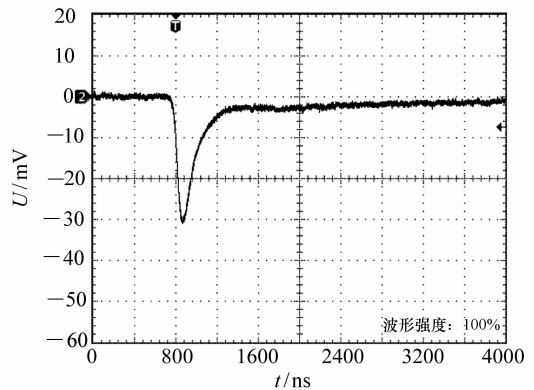


图8 调Q输出激光脉冲波形

Fig. 8 Acousto-optically Q-switched laser pulse waveform

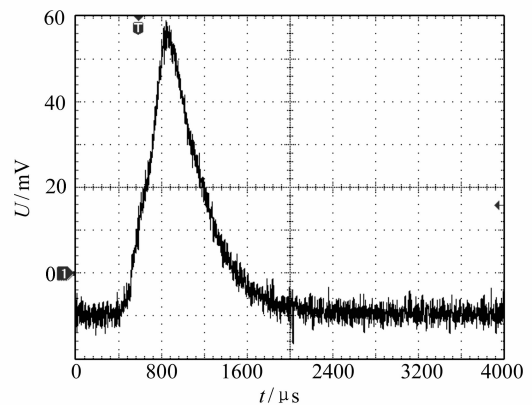


图9 脉冲放电激光脉冲波形

Fig. 9 Pulse discharge laser pulse waveform

CO₂激光器输出波长谱线如图7所示,9.18~10.88 μm内共测得连续输出功率2.5 W以上的输出谱线67条,其中最大输出功率约8 W。从分布情况看,10R/10P两支的谱线较丰富,输出功率

也较高,而 9R/9P 两支测得的谱线较少,且功率较低。造成这一现象的原因主要有两方面,一是由于所用光栅的闪耀波长是按 $10.6\ \mu\text{m}$ 设计的,使输出激光谱线长波部分相对较强;二是由于插入 AO 器件,增加了腔内损耗,激光器的振荡阈值提高,致使增益较低的谱线难以形成振荡输出。图 8 给出了该激光器在调 Q 方式工作,频率为 1 kHz 时的激光脉冲输出波形 ($10.6\ \mu\text{m}$),使用探测器 MCT 光电探测器测得的激光脉冲宽度为 180 ns,激光峰值功率为 4 062 W。1 Hz ~ 10 kHz 内均可采用声光调 Q 的方法实现激光器的脉冲工作,并可通过调整 TTL 信号占空比控制激光脉冲输出的平均功率和激光脉冲宽度,实现百纳秒至微秒级激光脉冲宽度的输出。图 9 给出了该激光器在采用电源脉冲放电工作时的激光输出波形,其激光脉冲宽度为 0.55 ms。在此工作方式

下激光器的频率调节范围为 1 Hz ~ 500 Hz。此外,该激光器还可通过 TTL 信号的控制实现工作频率的编码输出。

6 结 论

通过谐振腔振荡方式的选择和光栅调谐装置的合理设计,以及声光调制器与激光电源放电方式的匹配使用,在保持激光发射方向不变的情况下实现了小型 CO_2 激光器全波段调谐输出,并可以单脉冲、重复频率(可编码)、连续等多种方式运转,激光脉冲宽度百纳秒级至亚毫秒级可调,实现了该类激光器的多功能化,为激光与物质相互作用科学领域,特别是为多体制、多波长激光对物质作用与破坏机理的研究和模拟实验提供了一种实用的激光源。

参考文献:

- [1] QU Y C, REN D M, HU X Y, *et al.*. A monolithic microprocessor controlled tuning and triggering system of TEA CO_2 laser for differential absorption lidar[J]. *SPIE*, 2003, 4893: 377-383
- [2] PILTINGSRUD H V. CO_2 laser for lidar application, producing two narrowly spaced independently wavelength - selectable Q -switched output pulses[J]. *Appl. Optics*, 1991, 30(27): 3952-3963.
- [3] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
SUN CH W. *Laser Irradiation Effect*[M]. Beijing: National Defence Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 谢冀江, 李殿军, 张传胜, 等. 一种波长可调谐的编码输出声光调 Q 脉冲 CO_2 激光器: 中国 200810051433. 4[P], 2008-11-18.
XIE J J, LI D J, ZHANG CH SH, *et al.*. A tunable acousto-optical Q -switched pulsed CO_2 laser: China 200810051433. 4 [P], 2008-11-18. (in Chinese)
- [5] 吴谨. 光栅调谐 TEA CO_2 激光器理论计算模型[J]. *光学学报*, 2004, 24(4): 472-476.
WU J. Theoretical mode on calculating getting tuned TEA CO_2 laser[J]. *Acta Optica Sinica*[J], 2004, 24(4): 472-476. (in Chinese)
- [6] 田兆硕, 王骥, 王雨三, 等. 光栅选支电光调 Q 射频激励 CO_2 激光器研究[J]. *光电子·激光*, 2000, 11(8): 282-284.
TIAN ZH SH, WANG Q, WANG Y S, *et al.* Study of electrooptically Q -switched RF excited CO_2 waveguide laser with line selected by grating[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2000, 11(8): 282-284. (in Chinese)
- [7] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
WANG ZH J. *Practical Optics Technic Manual*[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)
- [8] 巴音贺希格, 高键翔, 齐向东, 等. $10.6\ \mu\text{m}$ 激光器一级输出高衍射效率闪耀光栅的研制[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(10): 1137-1140,
Bayinxig, GAO J X, QI X D, *et al.*. Manufacture for high diffraction efficiency grating in the first-order output of $10.6\ \mu\text{m}$ laser[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(10): 1137-1140 (in Chinese)

作者简介: 谢冀江(1959—), 男, 江苏镇江人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事气体激光器及其应用技术研究。

E-mail: laserxjj@163.com