声光调 Q CO_2 激光器波长调谐理论分析与实验研究

潘其坤[1,2],陈 飞[1,2],石宁宁[3], 李殿军[2],谢冀江[2],何 洋[2],郭 劲[2]

(1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,
吉林 长春 130033; 3. 宇航智能控制技术国家级重点实验室,北京 100854)

摘 要:采用旋转光栅法实现了声光调 Q CO_2 激光器可调谐脉冲激光输出。理论分析了 CO_2 激光波长调谐特性,发现调节各支谱线腔内损耗是实现激光波长调谐的有效方法。进而理论计算了特定设计波长闪耀光栅的衍射效率与激光波长间的关系, 结果显示光栅调谐的激光谱线自准直角与光栅闪耀角一致时具有最高的衍射效率。采用闪耀角分别为 31.97°(闪耀波长 10.59 μm)和 28.71°(闪耀波长 9.60 μm)的光栅实验研究了声光调 Q CO_2 激光器波长调谐特性,分别获得了 65 条和 75 条激光谱线。实验结果显示:光栅设计闪耀波长处于弱激光增益分支时可获得更多条激光谱线,该实验与理论计算结果相符。在脉冲重复频率为 1 kHz 时,获得 10.59 μm 激光脉冲宽度为 160 ns,平均功率 4.2 W,脉冲峰值功率 26.25 kW,且稳定性良好。

关键词: CO_2 激光器; 波长调谐; 闪耀光栅; 声光调 Q
中图分类号: TN248.5 **文献标志码**: A **DOI**: 10.3788/IRLA201746.0705002

Theoretical analysis and experimental research on tunable acousto-optic Q-switched CO_2 laser

Pan Qikun[1,2], Chen Fei[1,2], Shi Ningning[3], Li Dianjun[2], Xie Jijiang[2], He Yang[2], Guo Jin[2]

(1. State Key Laboratory of Pulsed Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;
2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. National Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Beijing 100854, China)

Abstract: A tunable acousto-optic Q-switched CO_2 laser was presented using a blazed grating. The tuning principle of CO_2 laser was analyzed, and it was found that changing the intra-cavity loss of lines is an effective way to realize the laser wavelength tuning. Then the relationship between diffraction efficiency of blazed grating and the laser wavelength were researched. The theoretical calculations show that the grating has highest diffraction efficiency when the auto-collimating angle of laser line equals to blaze angle of grating. Two blazed gratings with blaze angle of 31.97° (blaze wavelength 10.59 μm) and 28.71° (blaze wavelength 9.60 μm) were employed and the tuning performances of acousto-optic Q-switched CO_2 laser were researched on experiments. Laser emission lines of 65 and 75 were obtained separately. The emission lines were richer when blaze wavelength of grating equals to the laser

收稿日期:2016-11-10; **修订日期**:2016-12-20
基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(SKL2015KF08);激光与物质相互作用国家重点实验室自主基金项目(SKLLIM1510,SKLLIM1413)
作者简介:潘其坤(1985-),男,博士,主要从事脉冲激光器及其应用技术研究。Email: panqikun2005@163.com

wavelength with lower gain, which accorded with the theoretical calculations. When the repetition frequency is 1 kHz, the maximum average power of 4.2 W, pulse width of 160 ns, peak power of 26.25 kW are achieved at the wavelength of 10.59 μm, showing good stability.

Key words: CO_2 laser; wavelength tuning; blazed grating; acousto-optic Q-switched

0 引 言

CO_2 激光在 9~11 μm 范围内拥有丰富的激光谱线,且谱段处于大气红外传输窗口,因而可调谐、窄脉冲、重复频率 CO_2 激光器在诸如激光雷达、环境探测、激光光谱学、激光医疗等领域具有广泛的应用需求[1-4]。

CO_2 激光振转能级存在显著的谱线竞争机制,一旦增益损耗比最高的激光谱线形成谐振输出,将迅速抽空其他谱线的上能级粒子,抑制光谱范围内其他谱线输出。因此,调节激光各分支谱线增益损耗比成为 CO_2 激光波长调谐的主要方法。Faxvog 采用了转动光栅法实现 CO_2 激光器可调谐输出,该激光器可快速扫描输出 70 多条跃迁谱线[5]。哈尔滨工业大学的曲彦臣采用转镜和固定光栅组成的同步触发控制系统获得了 CO_2 激光器可调谐输出,在单步静态扫描输出实验中,对光栅整个有效工作范围进行全波段扫描,在 9~11 μm 光谱区内可选出 51 条谱线[6-7]。笔者团队之前开展了声光调 Q CO_2 激光器方面的研究,并采用旋转光栅法实现激光波长调谐[8-11]。上述报道获得的激光谱线多数分布在增益较强的 10P、10R 支,并未开展提升增益相对较弱的 9P、9R 支谱线输出的研究。

文中首先从理论上分析了光栅衍射效率对激光波长调谐性能的影响,发现光栅调谐激光波长的自准直角与光栅闪耀角一致时光栅具有高的衍射效率。进而采用两块不同闪耀角的金属原刻光栅对上述理论进行实验验证,结果显示采用光栅闪耀角处于弱增益谱线分支时可提升激光输出谱线条数。

1 波长调谐机理分析

CO_2 激光器拥有丰富的振转能级,它在 9~11 μm 范围内拥有百余条激光谱线,各谱线辐射光强表达式为[12-13]:

$$\frac{\mathrm{d}I(v)}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}I(v)}{\tau_c}+c*h*v\left[\frac{\Delta N*W*I(v)}{h}\right]+N_{001}*p(J)*S \quad (1)$$

式中:v 为激光频率,它是激光波长的倒数;ΔN 为反转粒子数密度;h 为普朗克常数;c 为光速;J 为振动量子数。其中 W、S 及腔内光子寿命 τ_c 的表达式:

$$W=\frac{F*\lambda^2}{8\pi*(v)*\tau_{sp}(v)}*f(v,v_0) \quad (2)$$

$$S=\frac{2*\lambda^2\Delta v_N}{\pi*A*\tau_{sp}(v)\Delta v_L} \quad (3)$$

$$\tau_c=-\frac{2*L}{c(\ln R(v)+2*\ln(1-K_{loss}(v)))} \quad (4)$$

式中:$\tau_{sp}(v)$为自发辐射寿命;F 为填充因子;$R(v)$为谐振腔在频率 v 处的反射率;$K_{loss}(v)$为腔内频率 v 处的单程损耗系数。通过改变公式(4)中的参数 $R(v)$和 $K_{loss}(v)$,可决定各激光频率光强的演化,从而使选定的激光波长增益大于损耗实现谐振输出,其他激光波长由于过大的损耗而无法形成激光振荡输出。光栅法、腔镜镀膜法、法布里-珀罗法、棱镜法等激光波长调谐技术均基于该原理,通过降低非选定激光波长的单程损耗,使选定的激光波长在增益竞争中占据绝对优势,从而实现 CO_2 激光可调谐输出。

旋转光栅法具有激光波长分辨率高、光谱调谐范围大、结构简单、易于调节等优点,文中重点阐述光栅法激光调谐理论。旋转光栅法利用了光栅对不同波长的激光束具有不同的衍射角这一特性,即激光以同一角度入射到光栅面上时,不同波长的激光具有不同的腔内非输出损耗系数 $K_{loss}(v)$,因而可通过调整激光入射角降低选定波长激光的非输出损耗系数实现激光波长可调谐。

工作在 Littrow 自准直条件下的光栅方程为:

$$2d\sin\alpha=m\lambda \quad (5)$$

式中:d 为光栅常数,即光栅的刻槽间距;α 为激光束的自准直入射角;m 为衍射级次;λ 为激光波长。对于闪耀光栅,衍射光强 I 可表示为:

$$I=\frac{\sin^2\left[\frac{d\pi}{\lambda}(\sin(\alpha-\theta)+\sin(\beta-\theta))\right]}{\left[\frac{d\pi}{\lambda}(\sin(\alpha-\theta)+\sin(\beta-\theta))\right]^2}\times \frac{\sin^2\left[\frac{N\pi d}{\lambda}(\sin\alpha+\sin\beta)\right]}{\sin^2\left[\frac{d\pi}{\lambda}(\sin\alpha+\sin\beta)\right]} \tag{6}$$

式中:N 为光栅刻槽总数;θ 为光栅闪耀角;β 为衍射角。激光光栅要求有较高的损伤阈值,必须采用金属原刻闪耀光栅。光栅设计波长取 10.6 μm, 光栅面刻线 100 条/mm,对应的光栅常数为 10 μm。此时由公式(5)计算可得金属光栅闪耀角为 31.97°。CO_2 激光的各分支振转跃迁谱线频率详见参考文献[11],将之代入公式(5)可得相应激光频率自准直入射角。采用设计波长 10.6 μm 光栅参数, 理论计算了以几支典型谱线以自准直入射角入射时的光栅衍射效率,结果如图 1 所示。

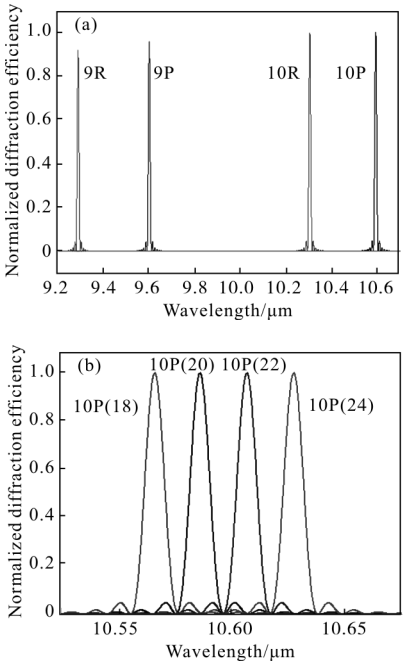


图 1 各谱线激光衍射效率分别随波长变化关系

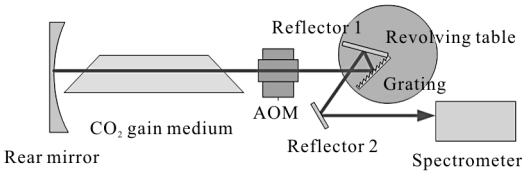
Fig.1 Diffraction efficiency of laser emission lines versus the wavelength

图 1(a)给出了 9R(16)/9.293 μm、9P(26)/9.604 μm、10R(12)/10.303 μm、10P(20)/10.591 μm 四条典型激光谱线衍射效率随波长变化关系。以各激光谱线自准直入射角入射时, 衍射光栅只在该激光谱线处具有陡峭的衍射效率, 而在其他谱线处的衍射效率几乎为零,有效抑制了非选定激光谱线的谐振输出。另外,由图 1(a)可看出,9R、9P 支谱线衍射效率显著低于 10R、10P 支谱线, 其主要原因是光栅设计波长为 10.6 μm,其激光谱线自准直入射角与光栅衍射角一致。由于 CO_2 激光光谱范围较宽,很难设计一块光栅在其整个光谱范围内各谱线均有较高的衍射效率。图 1(b)给出了 10P(18)/10.571 μm、10P(20)/10.591 μm、10 P(22)/10.611 μm、10 P(24)/10.632 μm 四条相邻激光谱线衍射效率随波长变化关系, 相邻谱线衍射效率峰值清晰可辨,无交叉重叠现象,即该光栅可分辨相邻的激光谱线,实现相邻激光谱线可调谐输出。该数值计算结果暗示, 光栅设计波长与激光弱增益谱线重合时, 可提升 CO_2 激光全光谱范围内波长输出条数。

2 CO_2 激光器波长调谐实验

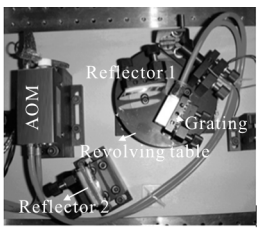
2.1 实验装置

采用的实验装置如图 2 所示: 后反射镜与闪耀光栅组成光学谐振腔,腔长 1.5 m,后反射镜采用镀金铜镜, 光栅为金属原刻光栅。由上述理论分析可知: 一块光栅难以实现全光谱范围内具有等同的高衍射效率,笔者等加工了两块光栅,设计波长分别为 10.59 μm(光栅常数为 10 μm,光栅闪耀角 31.97°)和 9.60 μm(光栅常数为 10 μm,光栅闪耀角 28.71°)。两块光栅均采用 1 级振荡,0 级输出的工作方式,光栅 1 级衍射效率 70%,0 级衍射输出约为 30%。光栅与



(a)实验原理图

(a) Experimental setup



(b) 波长调谐机构实物图

(b) Photo of tunable wavelength setup

图 2 可调谐声光调 Q CO_2 激光器

Fig.2 Tunable acousto-optic Q-switched CO_2 laser

反射镜 1 组成角反射器,共同放置在精密转台上,其主要功能是在旋转转台调谐波长的过程中, 保持激光器输出光束的方向不变。CO_2 增益区采用两个 ZnSe 布氏窗口片封装, 增益区长度 1 m, 充气压为 3.3 kPa,工作气体配比 Xe:CO_2:N_2:He 为 1:2.5:2.5:17.5。调 Q 开关采用 Gooch 的单通道声光调制器(AOM),声光晶体为多晶 Ge,对 10.6 μm 激光的单程透过率大于 95%,衍射效率大于 90%。最终激光经反射镜 2 反射输出, 由 Macken 公司生产的 CO_2 激光光谱仪测试输出激光波长。

2.2 实验结果与分析

实验中,激光器放电电流可调节范围 8~16 mA,连续输出功率最高 22 W,插入声光调制器后,连续输出功率(声光调制器未工作)下降到 9.5 W。在 TTL 触发信号控制下,声光调 Q 开关开始工作。此时激光上能级周期性地积蓄大量反转粒子数并在 Q 开关导通后形成脉冲激光输出。在重复频率为 1 kHz 时,波长为 10.59 μm 的 10P(20)分支谱线激光功率最高,平均功率为 4.2 W。图 3 给出了 10P(20)支激光谱线照相图,由图 3 可知,此时在光栅调谐下,只有一支激光谱线输出, 其他谱线由于光栅较大的衍射损耗而被抑制。

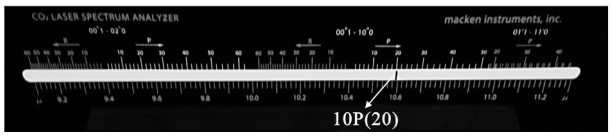


图 3 10P(20)支 CO_2 激光谱线照相图

Fig.3 Photo of 10P(20) branch CO_2 laser emission line

图 4 给出了设计波长 10.59 μm 的衍射光栅作为谐振腔时的激光器输出谱线,在 9~11 μm 范围内共获得了 65 条激光谱线。从分布情况来看,10R/10P 两支的谱线较丰富,10R 支拥有 21 条谱线,10P 支拥有 23 条谱线,同时激光平均功率也较高,多数谱线输出功率大于 3 W。而 9R/9P 两支激光谱线较少,分别拥有 9 条和 12 条谱线,且输出功率也不高,输出功率低于 3 W。

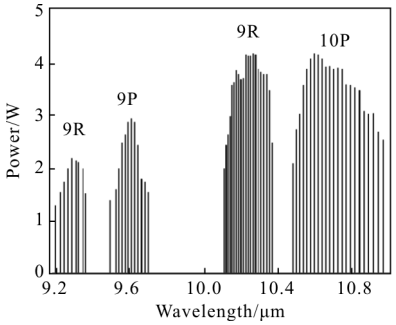


图 4 调 Q CO_2 激光器输出谱线:光栅设计波长 10.59 μm

Fig.4 Q-switched CO_2 laser emission lines: the blaze wavelength of grating is 10.59 μm

图 5 给出了设计波长 9.60 μm 的衍射光栅作为谐振腔时的激光器输出谱线,在 9~11 μm 范围内共获得了 75 条激光谱线。从分布情况来看,4 分支的激光谱线条数和平均功率相当,此时 9R 支拥有 18条谱线,9P 支谱线最为丰富,达到 23 条谱线,10R 支拥有 16 条谱线,10P 支谱线缩减到 18 条。9P(26)支谱线输出激光功率最高,达到了 3.86 W,而多数激光谱线输出平均功率在 3 W 左右。

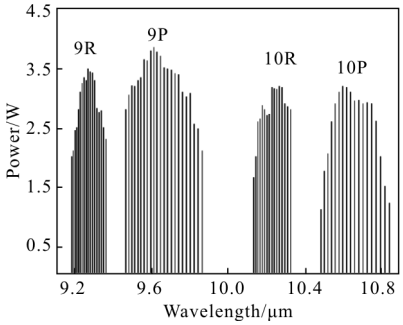


图 5 调 Q CO_2 激光器输出谱线:光栅设计波长 9.60 μm

Fig.5 Q-switched CO_2 laser emission lines: the blaze wavelength of grating is 9.60 μm

对比图 4、图5 可知, 光栅设计波长为 9.6 μm 时,9R/9P 支谱线丰富且激光平均功率高,而光栅设计波长为 10.59 μm 时,10R/10P 支谱线丰富且功率高。造成这一现象的主要原因为:光栅的在设计闪耀波长分支具有高的衍射效率, 这与理论分析结果一致。另外,由于 CO_2 激光 10P 支谱线具有较高的激光增益,因而上述两种情况下 10P 支谱线条数均较多,且当光栅设计波长与激光高增益谱线一致时, 可获得高的激光功率。

在激光输出波长为 10.59 μm, 脉冲重复频率为 1 kHz 时,采用 HgCdTe 探测器测得激光脉冲波形如图 6 所示。图 6(a)给出一个激光脉冲波形,其中 Ch1 为激光脉冲波形,Ch2 为 TTL 触发信号, 此时脉冲宽度约为 160 ns,激光脉冲建立时间为 3 μs。对应的最高激光平均功率为 4.2 W, 由此计算可得激光峰

值功率高达 26.25 kW。图 6(b)显示多脉冲波形,脉冲间隔为 1 ms,对应 1 kHz,激光器稳定性较好,输出激光脉冲幅值差小于±5%。

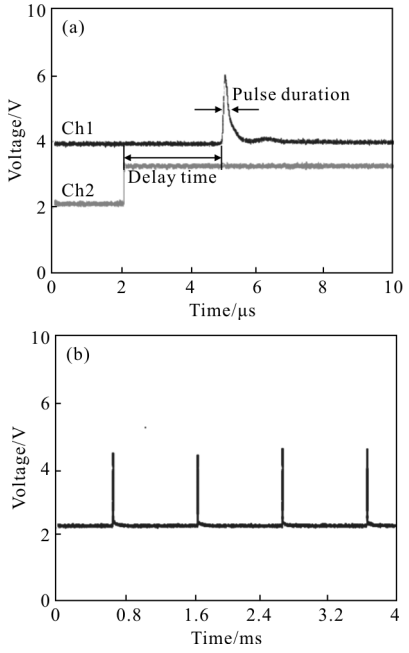


图 6 重频为 1 kHz 时的激光脉冲波形

Fig.6 Waveforms of laser pulses at 1 kHz

3 结 论

采用数值分析法研究了旋转光栅法调谐 CO_2 激光波长的机理,理论上获得提升激光弱增益谱线 9P/9R 输出条数的方法,进而采用两块不同闪耀角的光栅进行了实验验证。闪耀波长为 10.59 μm 的光栅在全光谱范围内获得 65 条激光谱线,而闪耀波长 9.60 μm 的光栅获得了 75 条谱线,即光栅设计波长与激光弱增益谱线重合时可提升 CO_2 激光输出谱线条数。最终,在脉冲重复频率为 1 kHz 时,激光波长 10.59 μm 处获得的最高平均功率为 4.2 W,激光峰值功率高达 26.25 kW。

参考文献:

[1] Kovacs M, Dryden G, Pohieb R, et al. HI-CLASS on AEOS: large aperture laser radar for space surveillance/situational awareness investigations [C]//SPIE, 2001, 4490: 298-306.

[2] Nasrullah I, Kiichiro K, Fujio S, et al. Analysis of heavy metal pollution in soil using transversely excited atmospheric CO_2 laser-induced plasma by trapping the soil in microstructured holes on metal subtargets [J]. ***Applied Spectroscopy***, 2007, 61(12): 1344-1351.

[3] Zelinger Z, Strrizik M, Kubat P. Dispersion of light and heavy pollutants in urban scale models: CO_2 laser photoacoustic studies[J]. ***Applied Spectroscopy***, 2009, 63(4): 430-436.

[4] David A B, Emeyr S L, Goto S W. High pulse repetition frequency, multiple wavelength, pulsed CO_2 radar system for atmospheric transmission and target reflectance measurements [J]. ***Applied Optics***, 1992, 31(21): 4224-4232.

[5] Fxavog F R, Moeker H W. Rapidly tunable CO_2 TEA laser [J]. ***Applied Optics***, 1982, 21(22): 3986-3987.

[6] Qu Yanchen, Ren Deming, Hu Xiaoyong, et al. Research of rapidly tuning technology of miniature TEA CO_2 laser [J]. ***Laser Technology***, 2003, 27(6): 547-550. (in Chinese)
曲彦臣, 任德明, 胡孝勇, 等. 小型 TEA CO_2 激光器的快速调谐技术研究[J]. 激光技术, 2003, 27(6): 547-550.

[7] Ren Deming, Wang Yuanhu, Qu Yanchen, et al. Rapidly tuned TEA CO_2 laser by a scanning mirror [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2007, 34(8): 1027-1031. (in Chinese)
任德明, 王元虎, 曲彦臣, 等. 采用扫描振镜方式的快调谐 TEA CO_2 激光器的研究 [J]. 中国激光, 2007, 34 (8): 1027-1031.

[8] He Yang, Lu Jun, Chen Fei, et al. Experimental researches on acousto-optic Q-switched CO_2 laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(8): 2280-2285. (in Chinese)
何洋, 陆君, 陈飞, 等. 声光调 Q CO_2 激光器实验研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2280-2285.

[9] Xie Jijiang, Pan Qikun, Li Dianjun, et al. Theoretical calculation and experimental study of acousto-optically Q-switched CO_2 laser [J]. ***Chinese J Lasers***, 2011, 38(2): 0202004. (in Chinese)
谢冀江, 潘其坤, 李殿军, 等. 声光调 Q CO_2 激光器的理论计算和实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202004.

[10] Xie Jijiang, Pan Qikun, Guo Ruhai, et al. Dynamical analysis of acousto- optically Q-switched CO_2 laser [J]. ***Optics and Lasers in Engineering***, 2012, 50(2): 159-164.

[11] Guo Jin, Li Dianjun, Wang Tingfeng, et al. High Power CO_2 Laser and Its Application Technology [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
郭劲, 李殿军, 王挺峰, 等. 高功率 CO_2 激光器及其应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[12] Smith K, Thomson R M. Computer Modeling of Gas Laser [M]. New York: Plenum Press, 1978.