文章编号 2095-1531(2019)02-0355-07

声光偏转快调谐脉冲 CO_2 激光器实验研究

潘其坤[1,2*],俞航航[2,3],陈 飞[1,2],谢冀江[2],何 洋[2],于德洋[2],张 阔[2]
(1. 解放军电子工程学院 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. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:采用双声光调制器光路快速偏转技术与自准直光栅法实现 CO_2 激光全波段快调谐同光路输出。首先对声光调制器特性进行实验研究,结果显示:声光调制器偏转角度约为 4.4°,与运用布拉格方程计算结果相符;且激光单次通过声光调制器移频量为 40.68 MHz,与声光驱动器射频频率一致,将激光往返多次经声光调制器的移频量叠加。进而,开展基于声光调制器的 CO_2 激光快调谐实验研究,运用两个对称布置的同驱动频率声光调制器补偿声光移频,实现偏转光路振荡输出,运用光栅法在直线光路中实现激光全波段可调谐输出。最终,在声光调制器时序控制下,实现双波长激光快调谐同光路输出,选定激光波长的切换时间约为 1 ms,脉宽小于 300 ns,且双波长切换速度不受 CO_2 激光跃迁谱带的限制。

关 键 词:CO_2 激光器,快调谐,声光调制器,光栅
中图分类号:TN248.5 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191202.0355

Experimental research on acousto-optic deflection rapid tuning pulsed CO_2 lasers

PAN Qi-kun[1,2*], YU Hang-hang[2,3], CHEN Fei[1,2], XIE Ji-jiang[2], HE Yang[2], YU De-yang[2], ZHANG Kuo[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. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: Panqikun*2005@163.*com*

Abstract: A rapid tuning pulsed CO_2 laser is presented using a blazed grating system and a pair of acousto-optic modulators. Firstly, the characteristics of acousto-optic modulators were studied through experimentation. The results showed that the deflection angle of the acousto-optic modulator was approximately 4.4°, which was

收稿日期:2018-06-11;**修订日期**:2018-07-13
基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金项目(No. SKL2015KF08);国家自然科学基金项目(No. 61675200),中国科学院青年创新促进会资助,吉林省中青年科技创新领军人才团队项目(No. 20170519012JH)
Supported by Foundation of State Key laboratory of Pulsed Laser Technology(No. SKL2015KF08); National Natural Science Foundation of China(No. 61675200); Youth Innovation Promotion Association CAS, Youth and Middle-aged Science and Technology Innovation Leader and Team Project in Jilin Province (No. 20170519012JH)

in agreement with the calculations of the Bragg equation. When a single laser passed the acousto-optic modulator, the shift in frequency was approximately 40.68 MHz, which was in agreement with the acousto-optic driving frequency. In addition, when multiple lasers passed through the acousto-optic modulator, the shift in frequency was compounded. Based on the acousto-optic modulator results, experimental research was performed on rapid tuning pulsed CO_2 lasers. In order to offset the shift in acousto-optic frequency, two acousto-optic modulators were placed symmetrically in the deflected optical beam, and a laser output was obtained. Using a blazed grating, a full band tunable output laser was obtained in the linear optical beam. Finally, under sequential control of double acousto-optic modulators, a double wavelength laser with rapid tuning output and a common optical axis was obtained. The tuning time of the pulsed laser was approximately 1 ms, which pulsed at a width of less than 300 ns. The tuning speed of the pulsed laser was independent of the transition band of the CO_2 laser.

Key words: CO_2 laser; rapidly tunable; acousto-optic modulator; grating

1 引 言

CO_2激光器具有良好的波长可调谐性,在9~11 μm范围内拥有百余条谱线,对应了多种大气污染物的吸收峰,在激光差分吸收雷达、激光测距、激光监听等领域具有重要的应用前景[1-5]。激光差分吸收雷达的工作原理是向待测区域发射两束波长不同的激光,一束是与待测污染气体吸收峰重合的测量光束,另一束是与待测污染气体吸收峰偏离的参考光束。为了得到精确的测量结果,要求在大气"冻结"时间内发射两束不同波长的激光,因而,脉冲CO_2激光快调谐技术备受关注[6]。

快速旋转波长调谐器件是脉冲CO_2激光快调谐领域的常用技术。Dvaid等人报道了高重复频率多波长脉冲CO_2激光雷达系统[7],其中的快调谐激光器利用振镜和固定光栅法实现了CO_2激光器的快调谐输出。Faxvog等人通过旋转多面体光栅并同时控制激光器的放电时间,使光栅旋转到相应输出谱线对应的入射角度,利用多面体光栅的每一刻面,选出单一波长激光输出[8]。哈工大曲彦臣团队采用6面转镜和固定光栅组成的同步触发控制系统实现波长快调谐[9-10],转镜在持续转动时能使激光束以不同的角度入射到光栅上,从而可实现若干支波长激光单调有序的选出,波长调谐时间约为10 ms。北京电子所谭荣清团队采用直驱交流伺服电机驱动光栅高速旋转和精确定位技术实现激光波长快速调谐[11],动态快速触发时,在60 ms内实现了整个CO_2激光光谱任意两条谱线调谐输出,在20 ms内实现同一个跃迁带内相邻两条谱线的调谐输出。本团队也开展了脉冲CO_2激光器波长调谐方面的研究,获得了60余条激光谱线输出[12-15],在此基础上,进一步开展了基于声光偏转的快调谐脉冲CO_2激光技术研究。

本文首先通过实验研究了声光调制器的工作特性,实验测试了声光偏转角和声光移频量,分析了声光移频对激光性能的影响,并提出了移频补偿方案。进而,基于腔内声光偏转,搭建了声光快调谐实验装置,实现了CO_2激光双波长快调谐输出。

2 声光调制器特性

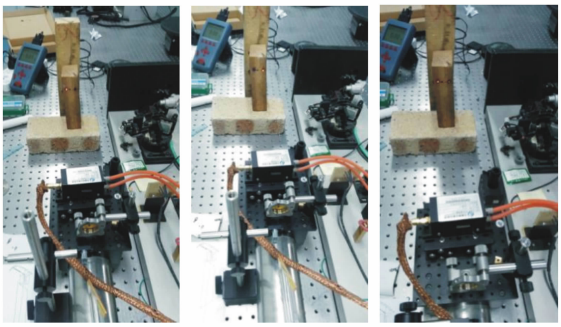
声光调制器的工作原理是利用超声波在介质中传播造成介质折射率产生相应的周期性变化,相当于形成一个布拉格光栅,当光波通过该介质时会产生衍射实现光束偏转。声光调制器的激光偏转角为2倍的声光衍射布拉格角,它可由布拉格方程给出:

$$\theta_B = \frac{\lambda}{2v_s} f_S, \tag{1}$$

式中,θ_B为布拉格角,λ为激光波长,f_s为声波频率,v_s为声光晶体内的声速。CO_2激光声光调制器

的声光驱动声波频率为 40.68 MHz，它在 Ge 晶体内的声速为 5.5 mm/μs，计算可得激光偏转角度为 4.4°。

实验中对声光调制器在腔外的偏转特性进行测量，结果如图 1 所示。



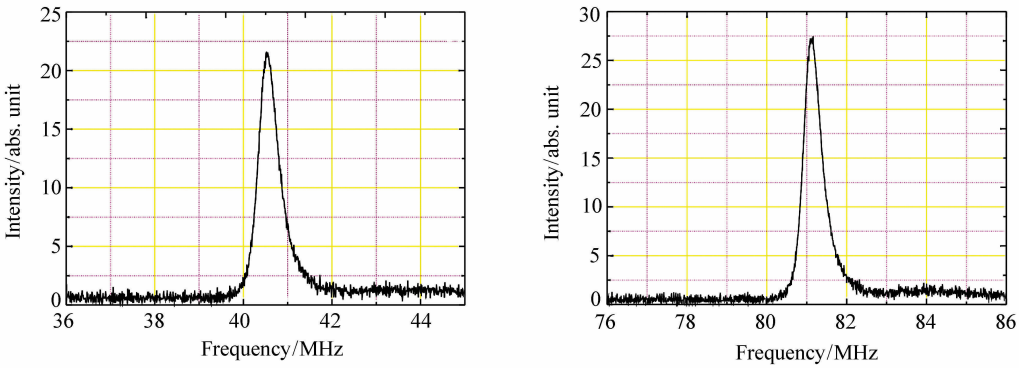
(a) 无偏转　(b) 偏转　(c) 光路1 kHz切换
(a) Without deflection (b) With deflection (c) Switching at 1 kHz

图 1　激光偏转测量装置

Fig. 1　Setup for laser deflection measurement

当声光调制器未加射频驱动信号时，声光调制器为普通 Ge 晶体，此时光路无偏转，如图 1(a)所示，激光沿着 0 级衍射光方向传输。当声光调制器加 40.68 MHz 的射频驱动信号时，声光调制器等效为体布拉格光栅，此时光路偏转，激光沿着 1 级衍射光方向传输，如图 1(b)所示，根据实际测量，衍射角为 4.4°，与理论计算结果相符。当给 40.68 MHz 的射频驱动信号加上 1 kHz、占空比为 1∶1 的调制信号时，激光将以 1 kHz 的频率在 0 级衍射光和 1 级衍射光间快速切换，如图 1(c)所示，声光调制器 1 级衍射效率约为 92%，因此 1 级衍射光弱于 0 级光，通过优化调制信号的占空比，可提升 1 级衍射光强度。

采用单频 CO_2 激光器进行声光调制器移频特性测量，移频前后激光信号的快速傅立叶分析频谱如图 2 所示。图 2(a)为单次经过声光调制器的傅立叶分析频谱，移频量为 40.6 MHz(1 倍的射频驱动信号)，其与声光调制器所加射频驱动信号频率一致。而激光往返两次经声光调制器后，测得的傅立叶分析频谱如图 2(b)所示，此时的移频量为 81.2 MHz(2 倍的射频驱动信号)。腔内插入声光调制器时，激光在腔内往返振荡的过程中移频量将依次叠加。通常，直流放电 CO_2 激光器充气压较低(kPa 量级)，其增益线宽约为 100 MHz[16]，即激光谐振数次，频率便移出增益线宽范围，无法形成有效的激光振荡，因此，必须考虑激光声光移频补偿的问题。



(a) 单次经过声光调制器
(a) Single passes acousto-optic modulator

(b) 往返两次经声光调制器
(b) Double pass acousto-optic modulator

图 2　快速傅立叶分析频谱图

Fig. 2　FFT analytical spectra

3　CO_2 激光器波长调谐实验研究

3.1　实验装置

采用的实验装置如图 3 所示，其中后反射镜、声光调制器 2、声光调制器 1、光阑、激光增益管、输出镜组成偏转光路；光栅、声光调制器 2、光阑、激光增益管、输出镜组成直线光路。声光调制器 1 不加射频驱动信号时，直线光路工作，此时，通过 100 线/mm 的光栅选支可实现直线光路 CO_2 激

光可调谐输出。声光调制器 1 加射频驱动信号时,光路中设置声光调制器 2,二者间距 500 mm,激光横向偏移量约为 38.4 mm,以保证器件间对光路无遮挡。偏转光路中的两个声光调制器射频驱动频率一致,超声波发生器设置在光轴两侧,在单次振荡过程中实时补偿声光移频,此时全反射镜与输出镜组成谐振腔实现增益最强的 10P(20)支激光输出。在 TEA 或射频激励的高增益激光器中,偏转光路的全反射镜也可更换为光栅,实现两路激光的任意支谱线可调谐同光路输出。

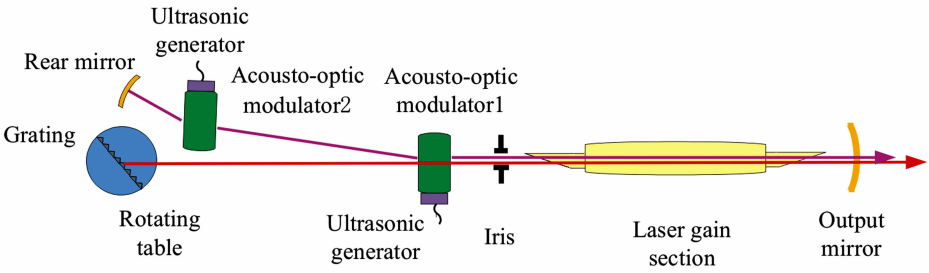


图 3 快调谐脉冲 CO_2 激光器实验装置

Fig. 3 Experimental device of rapidly tunable pulsed CO_2 laser

两路激光共用一个激光增益区,为实现调 Q 脉冲输出,必须在时间上有一个上能级粒子数积累过程,因此,需对声光调制器 1、2 的驱动时序进行精确控制,实验采用的声光调制器驱动时序如图 4 所示。

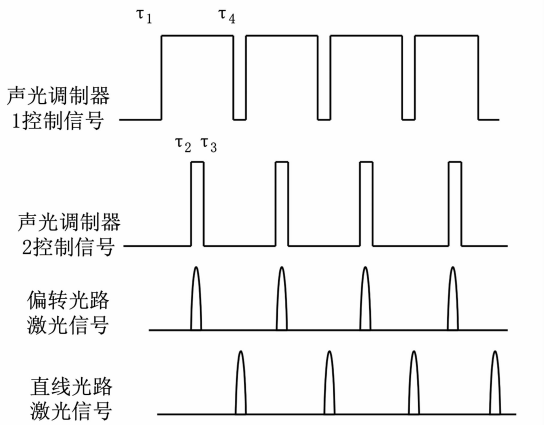


图 4 声光调制器时序控制示意图

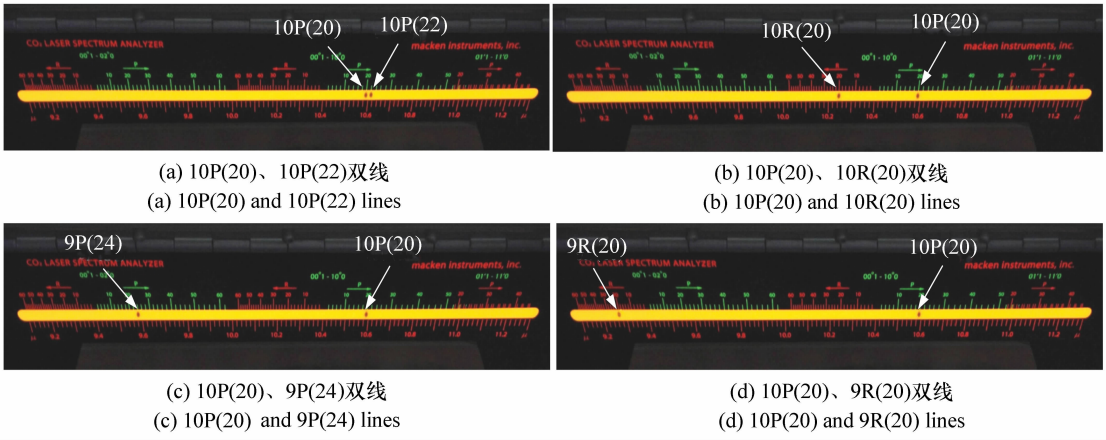
Fig. 4 Schematic of sequential control of the acousto-optic modulator

声光调制器时序逻辑设定为:高电平光路偏转(1 级衍射光方向),低电平光路不偏转(0 级衍射光方向)。快调谐激光器在单个时序控制周期内工作过程为:(a)τ_1时刻,声光调制器 1 偏转,声光调制器 2 不偏转,无激光输出,增益区积累上能级粒子数直至 τ_2时刻;(b)τ_2时刻,声光调制器 1、2 均偏转,增益区积累的上能级粒子数瞬间在偏转光路中以巨脉冲的形式输出;(c)τ_3时刻,声光调制器 1 偏转,声光调制器 2 不偏转,无激光输出,增益区积累上能级粒子数直至 τ_4时刻;(d)τ_4时刻,声光调制器 1、2 均不偏转,增益区积累的上能级粒子数瞬间在直线光路中以巨脉冲的形式输出。从而,可以实现在一个时序控制周期内,实现激光快调谐输出。实验过程中,通过调整声光调制器 1、2 的占空比和延迟时间,可适当改变上能级粒子数的积累时间,优化双光路激光的激光功率。

3.2 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,连续输出功率最高为 22 W,插入声光调制器 1 后,连续输出功率下降到 9.5 W。在 TTL 触发信号控制下,声光调制器 1、2 协调工作,实现脉冲 CO_2 激光双波长快调谐输出。实验中,重复频率为 500 Hz 时输出性能最佳(双波长、双脉冲输出,等效频率为 1 kHz),这与 CO_2 激光 1 ms 的上能级寿命相符。此时偏转光路中波长为 10.59 μm的 10P(20)分支激光功率最高为 0.86 W,直线光路中激光波长可调谐,10P(20)分支谱线激光功率最高,平均功率为 1.24 W。采用 CO_2 激光谱线分析仪对快调谐激光波长进行测试,结果如图 5所示。结果显示,两路激光可以同光路

输出,且波长调谐范围涵盖 CO_2 激光 9.3 ~ 10.6 μm 全波段。



(a) 10P(20)、10P(22)双线
(a) 10P(20) and 10P(22) lines

(b) 10P(20)、10R(20)双线
(b) 10P(20) and 10R(20) lines

(c) 10P(20)、9P(24)双线
(c) 10P(20) and 9P(24) lines

(d) 10P(20)、9R(20)双线
(d) 10P(20) and 9R(20) lines

图 5　CO_2 激光双谱线

Fig. 5　Double lines of CO_2 laser

采用 HgCdTe 光电探测器对两路激光切换时间进行测试,结果如图 6 所示。

如图 6 所示,声光调制器运行在 500 Hz,HgCdTe 探测器测得 A、B 两组脉冲激光信号,A 组电压幅值约为 1.7 mV,B 组电压幅值约为 0.65 mV,且两个脉冲信号交替出现,激光器交替稳定输出两个波长的激光,双波长激光切换时间约为 1 ms。声光调制器声频扰动影响了脉冲幅值稳定性。偏转光路与直线光路的激光脉宽如图 7所示,分别为 220 ns 和 280 ns,偏转光路等效为双调 Q,因而具有更窄的激光脉宽。

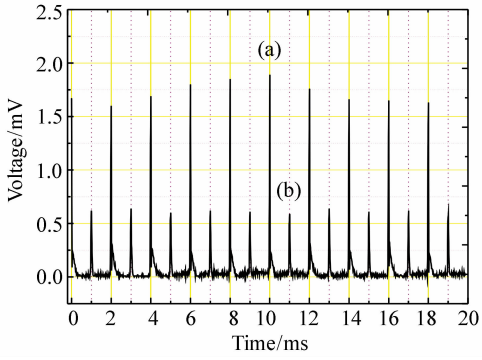
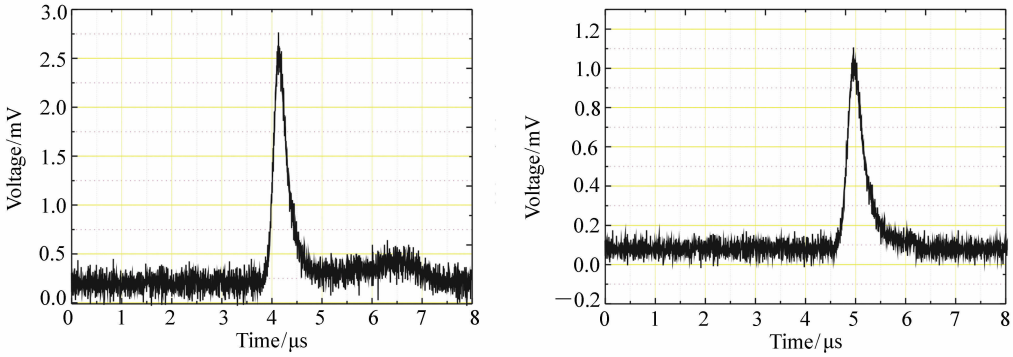


图 6　双波长激光器快调谐波形

Fig. 6　Rapidly tunable waveform of double wavelength laser



(a) 偏转光路
(a) Deflection optical beam

(b) 直线光路
(b) Linear optical beam

图 7　激光脉冲宽度

Fig. 7　Laser pulse width

4 结 论

采用外腔法研究了声光调制器的工作特性，实验测试的声光调制器偏转角度为 4.4°，与声光布拉格衍射角的理论计算结果相符，可满足偏转光路与直线光路在空间位置上有效分离的应用需求。采用稳频 CO_2 激光器对声光调制器的移频量进行实验测试，发现往返两次经声光调制器时移频量累次叠加，因此，在窄增益带宽激光偏转光路中须考虑移频补偿问题。进而开展基于声光调制器的快调谐 CO_2 激光器实验研究，在偏转光路中沿光轴对称设置两个射频驱动频率一致的声光调制器实现声光移频补偿。最终，在声光调制器时序控制下，通过光栅选支，实现 CO_2 激光全波段快速调谐输出，可将 CO_2 激光及波长切换时间缩短至毫秒量级。选定激光波长的切换时间在毫秒量级，脉宽为 200 ~ 300 ns，且双波长切换速度不受 CO_2 激光跃迁谱带的限制。

参考文献：

[1] KOVACS M A, DRYDEN G L, POHLE R H, *et al.*. HI-CLASS on AEOS: a large-aperture laser radar for space surveillance/situational awareness investigations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4490: 298-306.

[2] 罗青山，郭唐永，姚运生. 适用于立方体卫星的激光测距合作目标[J]. 光学 精密工程，2017，25(7)：1705-1713.
LUO Q SH, GUO T Y, YOU Y SH. Laser ranging cooperative target for CubeSa[J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1705-1713. (in Chinese)

[3] 王超杰，王博，郭慧楠，等. 空间飞行器平台大气密度的在轨测量[J]. 光学 精密工程，2017，25(1)：15-20.
WANG CH J, WANG B, GUO H N, *et al.*. Online measurement of atmospheric density based on space vehicle platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 15-20. (in Chinese)

[4] 王惠琴，姚宇，曹明华. 沙尘天气下激光信号的传输特性[J]. 发光学报，2017，38(4)：521-529.
WANG H Q, YAO Y, CAO M H. Transmission characteristics of laser signal in sand and dust weather[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(4): 521-529. (in Chinese)

[5] 吕韬，张合勇，郭劲，等. 远距离语音的激光相干获取及增强[J]. 光学 精密工程，2017，25(3)：569-575.
LÜ T, ZHANG H Y, GUO J, *et al.*. Acquisition and enhancement of remote voice based on laser coherent method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 569-575. (in Chinese)

[6] HOLLY S, IKEN A. Carbon dioxide Probe laser with rapid wavelength switching[J]. *Soc. Opt. Eng.*, 1977, 122: 45-52.

[7] BEN-DAVID A, EMERY S L, GOTOFF S W, *et al.*. High Pulse repetition frequency, multiple wavelength, pulsed CO_2 lid arsystem for atmospheric transmission and target reflectance measurements[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(21): 4224-4232.

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

[9] 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.
QU Y C, REN D M, HU X Y, *et al.*. Research of rapidly tuning technology of miniature TEA CO_2 laser[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 547-550. (in Chinese)

[10] 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[J]. 中国激光，2007，34(8)：1027-1031.
REN DM, WANG Y H, QU Y CH, *et al.*. Rapidly tuned TEA CO_2 laser by a scanning mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(8): 1027-1031. (in Chinese)

[11] 程永强，谭荣清，郑义军，等. 光栅选线 TEA CO_2 激光快速调谐实验研究[J]. 红外与激光工程，2007，36(5)：635-638.
CHENG Y Q, TAN R Q, ZHENGY J, *et al.*. Rapidly tunable experiment of grating line selectable TEA CO_2 laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 635-638. (in Chinese)

[12] 何洋，陆君，陈飞，等. 声光调 Q CO_2 激光器的实验研究[J]. 红外与激光工程，2015，44(8)：2280-2285.
HE Y, LU J, CHEN F, *et al.*. Experimental researches on acousto-optic Q-switched CO_2 laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2280-2285. (in Chinese)

[13] 潘其坤，谢冀江，阮鹏，等. 声光调 Q CO_2 激光器的输出特性[J]. 中国光学，2012，5(3)：283-288.

PAN Q K, XIE J J, RUAN P, *et al*.. Output performance of acousto-optic Q-switched CO_2 laser[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 283-288. (in Chinese)

[14] XIE J J, PAN Q K, GUO R H, *et al*.. Dynamical analysis of acousto-optically Q-switched CO_2 laser[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2012, 50(2): 159-164.

[15] 潘其坤,陈飞,石宁宁,等. 声光调 Q CO_2 激光器波长调谐理论分析与实验研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0705002.
PAN Q K, CHEN F, SHI N N, *et al*.. Theoretical analysis and experimental research on tunable acousto-optic Q-switched CO_2 laser[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2017, 46(7): 0705002. (in Chinese)

[16] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
ZHOU B K, GAO Y ZH, CHEN T R, *et al*.. *Laser Principle*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:

潘其坤(1985—),男,河南开封人,博士,副研究员,2014 年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事中红外激光器及其应用方面的研究。E-mail: panqikun2005@163.com