

文章编号 1004-924X(2009)05-1008-06

声光调 Q CO_2 激光器

谢冀江,李殿军,张传胜,郭汝海

(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:为满足激光测距、环境探测、空间通讯及激光与物质相互作用机理研究等领域应用要求,研制了声光调 Q CO_2 激光器。针对影响声光调 Q CO_2 激光器输出的各种因素,利用调 Q 脉冲激光器速率方程对该激光器输出的主要技术参数进行了理论分析和计算,提出了声光调 Q CO_2 激光器优化设计的方法,并进行了验证实验。激光器脉冲重复频率为 1 Hz~50 kHz,在 1 kHz 运转时获得的输出激光脉冲宽度为 180 ns,峰值功率为 4 062 W,与理论计算基本一致。结果证明:通过声光晶体(AO)的优选及谐振腔的合理设计,可实现小型 CO_2 激光器的高重频、窄脉宽,高峰值功率输出,并可通过光栅选线的设计方式和 TTL 信号控制实现此类激光器的波长调谐和编码输出。

关键词:激光技术; CO_2 激光器; 声光调 Q ; 速率方程

中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A

Acousto-optically Q -switched CO_2 laser

XIE Ji-jiang, LI Dian-jun, ZHANG Chuan-sheng, GUO Ru-hai

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

Abstract: An acousto-optically Q -switched CO_2 laser is developed to satisfy the requirements of research fields such as laser ranging, environmental detection, spacial communications and the mechanism study of the interaction between laser and materials. In consideration of the influence of various factors on the outputs of the acousto-optically Q -switched CO_2 laser, an optimization method to design the acousto-optically q -switched CO_2 laser is presented by using the theoretical analysis and calculations of the laser rate equations for the main parameters of laser outputs. Then, a verified experiment is undertaken. The experimental results show that the laser can offer the laser parameters in the pulse repetition frequency (PRF) of 1 Hz—50 kHz, a pulse width of 180 ns and a peak power of 4 062 W, which agrees with the theoretical results well. The results demonstrate that a miniature laser with high repetition rates, narrow pulse widths and high peak powers can be realized by optimally choosing an acousto-optically Q -switched crystal and rationally designing an optical resonator, and it can also realize the wavelength tuning and coding output by selecting the grating lines and controlling the TTL signals.

Key words: Laser technology; CO_2 laser; acousto-optically Q -switched; rate equations

收稿日期:2008-12-23;修订日期:2009-03-02.

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目

1 引言

CO₂ 激光器可产生 9~11 μm 的激光输出,此波段恰好处于光束传输的大气窗口,在激光测距、测速、成像雷达、环境探测及空间通讯及激光与物质相互作用机理研究等方面具有广阔的应用前景^[1-4]。此类激光器通常需要在高重复频率的脉冲形式下工作,目前小型 CO₂ 激光器实现脉冲输出的方法主要有电光调 Q 法和机械调 Q 法。电光调 Q 通常采用 CdTe 晶体作为开关器件,脉冲频率可以做到 100 kHz,脉宽可压缩至几十 ns,但由于电光调 Q 通常需要用到高电压,技术相对复杂,且设备造价较高^[4]。机械调 Q 通常是利用插入谐振腔内并高速旋转的斩波器或转镜实现的,此方法的优点是结构简单,稳定可靠,成本低,且激光脉冲的峰值功率较高,可达千瓦级^[5],但由于受到斩波器转速的限制难以实现高重频输出,且无法进行激光脉冲的编码控制。本文介绍另一种实现小型 CO₂ 激光器脉冲输出的方法—声光调 Q 法,该方法是将通常用于小型 CO₂ 激光器腔外光强度调制的声光调制器(acousto-optic modulator)置于谐振腔内实现的^[6]。由于此器件(通常由 Ge 晶体制成)的吸收系数较大,造成腔内损耗严重,致使激光器运转困难,因此,国内外还很少见到采用此技术的相关报道。本文根据调 Q 脉冲激光器速率方程对声光调 Q 小型 CO₂ 激光器的主要技术参数进行了理论计算和分析,并据此设计制造了一台封离式声光调 Q 小型 CO₂ 激光器。该激光器采用国产声光调制器,经优化设计获得了重频 1 Hz~50 kHz、脉宽为 180 ns、峰值功率为 4 062 W 的激光输出,并利用光栅实现了此激光器的 9.2~10.8 μm 全波段调谐。

2 激光器的设计

激光器结构如图 1 所示,采用半外腔的直流放电增益区和光栅一级振荡,零级输出的方式,谐振腔长 $L=1.2$ m,放电管由带水冷套的玻璃管制成,管内径 $D=8$ mm,放电管增益区长度 $l=800$ mm,气压为 3.3 kPa,配比为 Xe : CO₂ : N₂ : He

= 1 : 3 : 5 : 21,全反射镜曲率半径为 2.5 m,反射率 $R=98.5\%$,布儒斯特窗采用 ZnSe 材料,金属原刻光栅为 120 l/mm,一级反射率为 70%,声光 Q 开关置于布儒斯特窗与输出光栅之间,光栅安装在水平放置的精密转台上,通过旋转光栅来实现激光器输出波长调谐。

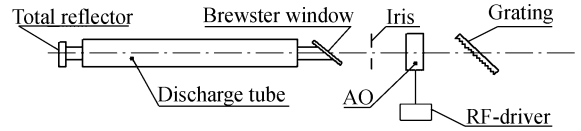


图 1 可调谐声光调 Q CO₂ 激光器

Fig. 1 Tuneable acousto-optic Q-switched CO₂ laser

声光调制器的声光介质为 Ge 单晶体,对 10.6 μm 激光的单程透过率为 90%,采用布拉格衍射垂直入射方式,中心频率为 40 MHz,换能器面积为 3 mm×37 mm,对水平方向偏振光的一级衍射效率约 80%。

3 激光器速率方程及计算

根据 Q 开关 CO₂ 激光器的理论,其速率方程可表示为^[7-8]:

$$\frac{d\phi}{dt} = (n_{J'} - n_{J''} - 1)\phi + \frac{n_{J'}}{N_{th}^V}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_{J'}}{dt} = (n_{J''} - n_{J'})\phi + (P_{J'}n_{\nu'} - n_{J'})k_{J'}, \quad (2)$$

$$\frac{dn_{J''}}{dt} = (n_{J'} - n_{J''})\phi + (P_{J'}n_{\nu''} - n_{J''})k_{J''} - n_{J''}k'', \quad (3)$$

$$\frac{d(n_{\nu'} - n_{J'})}{dt} = (n_{J''} - P_{J'}n_{\nu'})k_{J'}, \quad (4)$$

$$\frac{d(n_{\nu''} - n_{J''})}{dt} = (n_{J''} - P_{J'}n_{\nu''})k_{J''} - (n_{\nu''} - n_{J''})k''. \quad (5)$$

式中 ϕ 为一个光波模中的光子数, $n_{J'}$ 为激光上能级的粒子数, $n_{\nu'}$ 为激光振动能级(001)上的粒子数, $n_{J''}$ 为激光下能级上的粒子数, $n_{\nu''}$ 为激光振动下能级(100,020)上的粒子数, $P_{J'}$ 为初始状态时的玻尔兹曼分布函数, $k_{J'}$ 为转动能级粒子的弛豫速率, k 为振动下能级(100,020)的粒子弛豫到其它振动态的弛豫速率。上述方程中所有粒子数和光子数均以上能级阈值反转粒子数 N_{th}^V 为度量单

位,所有的速率均以腔寿命 t_c 为度量单位。这里假设转动弛豫是任意的,则初始时的玻尔兹曼分布函数 P_J 可表示为^[9]:

$$P_J = \frac{(2J+1)}{Q_{\text{rot}}} \exp\left[\frac{-hcBJ(J+1)}{kT}\right], \quad (6)$$

式中 Q_{rot} 为转动分配函数, B 为转动常数 (m^{-1}), 001 振动模中所有转动能级初始时的粒子数与激光上能级的粒子数的关系可由下式给出:

$$n_{v'} = \frac{n_{J'}}{P_J}. \quad (7)$$

激光的自发辐射速率由 $1/N_{\text{th}}^V$ 为度量单位,在上述情况下它是上激光能级的粒子数的倍数。光子由谐振腔耦合到腔外的速率可由 $\bar{\alpha}$ 表示,且有:

$$\bar{\alpha} = \frac{\ln(1/T_{\text{TOT}})}{2L}, \quad (8)$$

式中 T_{TOT} 为总的输出耦合透过率, L 为腔长。由此可以得到激光峰值功率表达式为:

$$P_{\text{out}} = \phi h \nu \bar{\alpha}_{\text{out}} N_{\text{th}}^V. \quad (9)$$

根据 CO_2 激光器的有关弛豫速率数据^[10-12]和激光器的实验结果,计算出该激光器的参数为: $N_{\text{th}}^V = 1.02 \times 10^{15}$, $P_J = 0.015$, $t_c = 20$ ns, $\delta = 20\%$, $\phi_0 = 2.43 \times 10^{-15}$, $k_{J'} = k_{J''} = 5.78$, $k'' = 0.072$, $n_{J'}|_{t=0} = 0.88$, $n_{v'}|_{t=0} = 58.67$, $n_{J''}|_{t=0} = 0$, $n_{v''}|_{t=0} = 0$, $J'' = 19$ 。将其代入方程(1)~(5),利用 Runge-Kutta 法进行数值计算,得到的腔内光子数随时间变化的曲线如图 2 所示。计算出调 Q 激光脉冲延迟时间为 $2.5 \mu\text{s}$,脉冲宽度为 200 ns,脉冲峰值功率为 3 443 W。

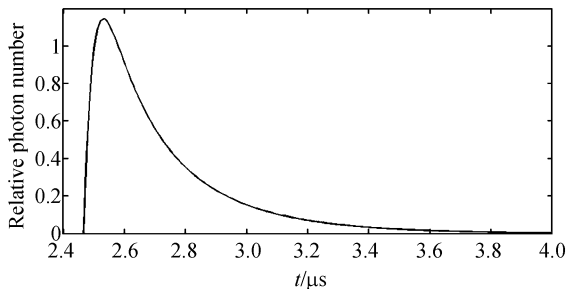


图 2 腔内光子数随时间的变化

Fig. 2 Number of photons in laser cavity vs time

当激光器工作在 Q 调制的模式下,可以通过测量得到小信号增益和弛豫速率。脉冲的延时和

上升时间在很大程度上由增益损耗比决定。当激光器开始工作时,辐射很小并且激光上能级粒子消耗可忽略,从文献 8 知道脉冲形成可由下式给出。

$$\Phi_p(t) = \Phi_p(0) \exp\left(\left\{2\gamma_0 l - \ln\left[\frac{1}{R_G T_c^2 (1-T_0)}\right]\right\} \frac{ct}{2L}\right), \quad (10)$$

式中, R_G 为输出镜反射率(光栅一级反射率), T_c 为腔内光学元件透过率, T_0 为输出镜透过率(光栅零级反射率), L 为光腔长度, l 为增益介质的长度, c 为光速, $\Phi_p(0)$ 为模式中从自发辐射发出的初始光子数。将激光器参数带入式(10),得到图 3 所示的激光脉冲延迟时间随腔内透过率变化的曲线,由此可看出腔内透过率增大时激光脉冲延迟时间明显缩短。

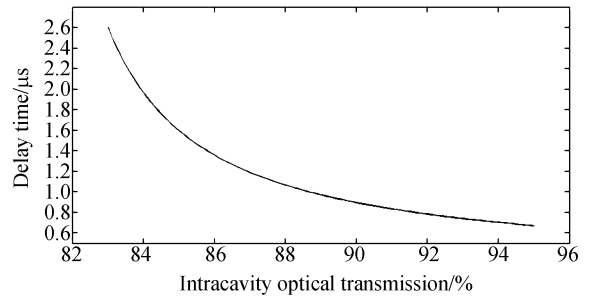


图 3 腔内透过率对于激光脉冲建立时间的影响

Fig. 3 Transmission of intracavity optical elements versus establishing time of laser pulse

4 实验结果与分析

实验显示,激光器放电电流为 $8 \sim 20$ mA,空腔时最大连续输出功率为 22 W,插入 AO(声光调制器)后最大输出功率为 7.5 W,光栅拉远(腔长增加)时,激光功率略有下降,输出激光模式为准基模,脉冲频率调谐范围为 $1 \text{ Hz} \sim 50 \text{ kHz}$,图 4 为在重复频率 1 kHz 时使用 MCT 光电探测器测得的 $10.6 \mu\text{m}$ 输出激光脉冲波形(通道 2),通道 1 为 TTL 触发信号,通道 2 左侧的波形为 AO 驱动器输出的射频干扰信号,由图可看出输出激光脉冲宽度约 180 ns,激光脉冲建立时间为 $2.7 \mu\text{s}$,射频信号消失时间(后沿)为 200 ns,射频

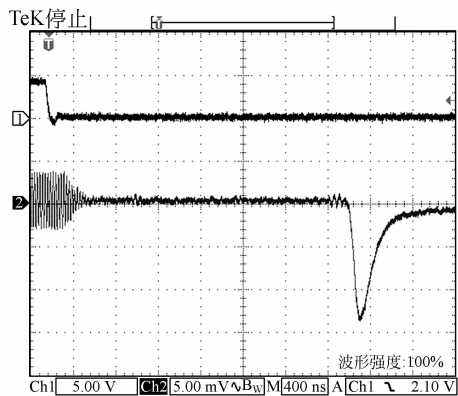
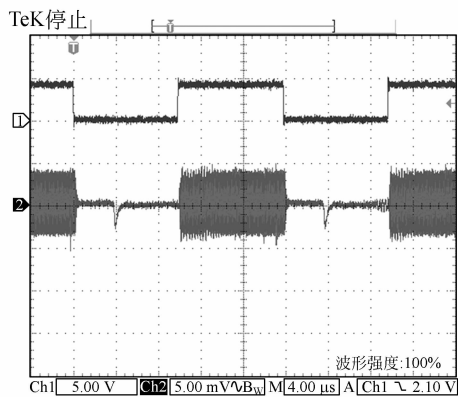
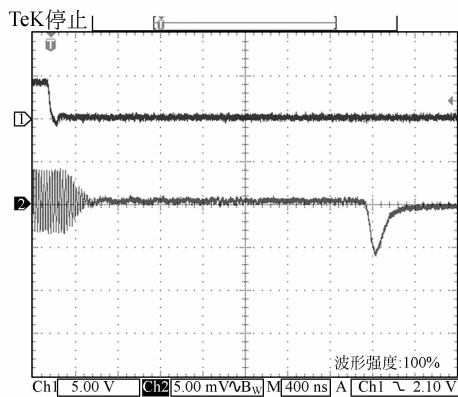


图 4 激光脉冲波形
Fig. 4 Laser pulse waveform



(a)



(b)

图 5 不同腔内损耗时的激光脉冲波形

Fig. 5 Laser pulse waveforms at different intracavity losses

光脉冲峰值功率为 4 062 W。图 5 为重频 50 kHz 时,在相同条件下通过调整可变光阑(Iris)改变腔内损耗时得到的激光脉冲波形比较,可以看出腔内损耗对激光脉冲延迟时间的影响非常明显(2.8~4.0 μs),同时对激光输出的平均功率有较大影响,但对激光脉宽的影响相对较小。图 6 给出了重频 1 kHz 工作时的激光脉冲波形,可以见到激光器在高重频运转时输出稳定性较好,在重复频率为 1 kHz 运转时的脉冲幅值误差 < ±10%。

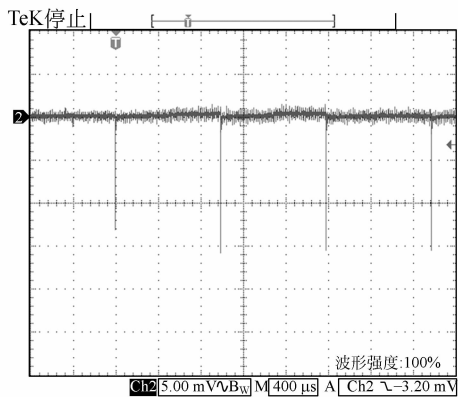


图 6 高重频激光脉冲波形

Fig. 6 High repetition rate laser pulse waveform

实验显示,在调 Q 状态下,激光器的最佳放电电流为 10 mA;频率增加时,脉冲峰值功率呈下降趋势,激光脉宽基本不变,该实验结果与理论计算基本一致,但激光脉冲延迟时间的实验值比理论计算的结果略大,这主要是由于计算时没有考虑工作中由于热影响等因素造成实际的腔内损耗值的增大,这一数值与报道中采用电光调 Q 时的光脉冲延迟时间相比明显加长,主要是由于所用 AO 晶体的吸收损耗较大,因此设计时对减少激光器腔内损耗应提出更高的要求。实验使用的国产品体单程损耗约 10%,而目前国外同类产品单程损耗最小已做到 ≤6%。如采用此种调制晶体做腔内 Q 开关,在其他条件不变的情况下,激光器的脉冲形成时间将明显缩短,输出频率也将进一步提高。此外,实测的激光脉冲峰值功率要高于理论计算的结果,这是由于理论计算时采用的模体积(V)为基模模体积公式,而实际中激光

信号与 TTL 触发信号间的延迟时间约 150 ns。此时用北京物科光电公司生产的 LP-3C 型激光功率计测得平均激光功率为 0.65 W,由此算出激

输出并非完全的基模,而是准基模所致。

5 结 论

速率方程理论可较好地解释和分析小型 CO₂ 激光器的声光调 Q 过程;腔内损耗是影响小型声光调 Q CO₂ 激光器高重频运转的一个重要因素;可通过声光晶体(AO)的优选及谐振腔的合

理设计,实现小型 CO₂ 激光器的高重频、窄脉宽、高峰值功率输出;通过光栅可实现小型 CO₂ 激光器的全谱线波长调谐。采用此工作方式运行的激光器可通过 TTL 信号控制方便地实现激光脉冲的编码输出,与电光调 Q 和机械调 Q 相比具有明显的优势,该技术的开发成功将为高重频脉冲 CO₂ 激光器的广泛应用提供了一个有效的技术途径。

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 CO₂ laser for differential absorption lidar [J]. *SPIE*, 2003, 4893: 377-383.
- [2] PILTINGSRUD H V. CO₂ laser for lidar application, producing two narrowly spaced independently wavelength-selectable Q-switched output pulses [J]. *Appl. Opt.*, 1991, 30(27): 3952-3963.
- [3] PEARSON GRYE B J. Frequency fidelity of a compact CO₂ Doppler lidar transmitter [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(30): 6475-6484.
- [4] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
SUN C W. *Laser Irradiation Effect* [M]. Beijing: National Defence Press, 2002. (in Chinese)
- [5] 田兆硕, 成向阳, 王琪. 电光调 Q CO₂ 激光器进展 [J]. *激光技术*, 2003, 27(3): 208-213.
TIAN Z S, CHENG X Y, WANG Q. Developments of electric-optically Q-switched CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 208-213. (in Chinese)
- [6] WANG T J. Studies on mid-infrared tunable lasers [CB/OL]. (2007-09-12). <http://dlib.cnki.net/kns50/detail>.
- [7] 李军建, 王瑞峰, 陈文友. 声光调 Q 准波导 CO₂ 激光器[J]. *中国激光*, 1995, A22(3): 195-198.
LI J J, WANG R F, CHEN W Y. An acousto-optic Q-switched CO₂ quasi-waveguide laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1995, A22(3): 195-198. (in Chinese)
- [8] LETALICK D, RENHOM I. CO₂ waveguide laser with programmable pulse profile [J]. *Opt. Eng.*, 1989, 28(2): 172-179.
- [9] 蓝信锯. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 83-117.
LAN X J. *Laser Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2005: 83-117. (in Chinese)
- [10] BRIDGES T J, CHEO P K. Spontaneous self-pulsing and cavity dumping in a CO₂ laser with electro-optic Q-switching [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, 14(9): 262-264.
- [11] JACOBS R R, PETTI-PIECE K J. Rotational relaxation rate constants for CO₂ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, 24(8): 375-377.
- [12] CHEO P K, LEVINE A K, DEMARIN A J. *Relaxation Phenomena in Gases* [M]. New York: Maroel Dekker, 1971: 121-184.
- [13] SOUEIKH M, ABDUL GHAIN B. Mathematical modeling of TEA CO₂ laser [J]. *Opt. & Laser Tech.*, 1998 (30): 451-457.

作者简介:



谢冀江(1959—),男,江苏镇江人,副研究员,硕士生导师,主要从事激光器及其应用技术的研究。E-mail: Laserxj@163.com



张传胜(1966—),男,黑龙江牡丹江人,副研究员,硕士生导师,主要从事脉冲激光器技术、脉冲功率电源等方面的研究。E-mail: zhangchuansheng20031201@sina.com



李殿军(1957—)男,吉林长春人,研究员,主要从事激光器及其应用的研究。E-mail: lidj0906@163.com



郭汝海(1976—)男,辽宁铁岭人,助理研究员,博士,主要从事激光器的光学设计理论与工程化的研究。E-mail: hitgrh@163.com

●下期预告

引信 MEMS 静电探测器阵列设计

郝晓辉,徐立新,崔占忠,陈曦

(北京理工大学 宇航科学技术学院,北京,100081)

空中目标运动会产生不可消除的静电场,引信可以利用静电场信息对目标进行探测。MEMS 具有体积小、成本低、功耗低、集成度高等特点,非常适合于引信静电探测器的设计。在引信有限的体积内布设 MEMS 静电探测阵列,通过对目标静电场信息进行检测,可以获得目标的位置、速度信息。文中运用表面加工工艺设计了一种 MEMS 薄膜电极的垂直振动式电场传感器阵列。介绍了该电场传感器探测单元及阵列的结构、组成及工作原理,说明了该器件的加工工艺。通过 MEMS 静电探测单元的空间布阵,研究了引信 MEMS 静电探测阵列对目标定位的原理,推导了目标定位的公式,从而得出了可以利用 MEMS 静电探测阵列对目标进行定位的结论。