

文章编号: 0258-7025(2007)09-1185-05

基于 Pulser/Sustainer 技术的可调谐 长脉冲 TE CO₂ 激光器

王云飞^{1,2}, 吴 谨¹, 刘世明¹, 汪训忠^{1,2}, 王东蕾¹, 张阔海¹, 卢远添^{1,2}

(¹ 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 采用光栅谐振腔,对一台基于 Pulser/sustainer 技术的紫外预电离长脉冲 TE CO₂ 激光器的调谐特性进行了实验研究。在增益体积为 1.17 L,激光混合气体体积比 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=1:5:19$,工作气压为 30 kPa 条件下,实验测量了 75 条激光谱线的输出脉冲能量和脉冲宽度(半高全宽,FWHM),结果表明,相同的激励条件下,不同的激光波长,激光输出脉冲宽度有所不同。通过仔细观察比较四条主要谱线(9R(20),9P(20),10R(20),10P(20))的激光输出脉冲波形随放电电压、放电脉宽以及气体成分配比等的变化情况,说明基于 pulser/sustainer 技术激励的长脉冲可调谐 TE CO₂ 激光器的激光输出脉冲宽度随调谐波长的不同而变化。简单实验分析表明,谱线增益的变化可能是引起谱线输出脉冲宽度不同的主要原因。

关键词 激光技术;长脉冲 TE CO₂ 激光器;Pulser/sustainer 技术;紫外预电离;可调谐;脉冲宽度

中图分类号 TN 248.2⁺2 文献标识码 A

Tunable Long Pulse TE CO₂ Laser with Pulser/Sustainer Excitation

WANG Yun-fei^{1,2}, WU Jin¹, LIU Shi-ming¹, WANG Xun-zhong^{1,2},

WANG Dong-lei¹, ZHANG Kuo-hai¹, LU Yuan-tian^{1,2}

(¹ Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A grating tuned long pulse ultraviolet (UV)-preionized TE CO₂ laser excited by pulser/sustainer discharge is demonstrated. With gas mixture volume fraction of $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=1:5:19$ and total gas pressure of 30 kPa, the laser output pulse energies and laser pulse widths (full-width at half-maximum, FWHM) of altogether 75 spectral lines are obtained. The measured results show that with the same pumping parameters the laser pulse width of each spectral line differs considerably as the grating is tuned from one line to another. Detailed measurement is carefully made on the laser output pulse widths of the four spectral lines 9R(20), 9P(20), 10R(20) and 10P(20) under different discharge voltage, discharge pulse width or gas mixture volume fraction, which strongly illustrate that the laser pulse width in a tunable long pulse TE CO₂ laser with pulser/sustainer discharge varies with the output laser wavelength. By simultaneously measuring the discharge current waveform and the output laser pulse profile, it is found that the variation of the laser pulse width at each spectral line is perhaps mainly due to the gain difference of each spectral line.

Key words laser technique; long pulse TE CO₂ laser; pulser/sustainer technique; ultraviolet-preionization; tunable; pulse width

1 引 言

长脉冲 TE CO₂ 激光器(包括基于 pulser/

sustainer 技术激励的长脉冲 TE CO₂ 激光器)可以输出脉宽达几微秒至上百微秒的长脉冲激光,与常规的脉冲 TE CO₂ 激光器相比,具有峰值功率较低、

收稿日期:2007-04-09;收到修改稿日期:2007-05-08

基金项目:国家自然科学基金(60678019)资助项目。

作者简介:王云飞(1981—),男,山西人,硕士研究生,主要从事可调谐长脉冲 TE CO₂ 激光器的研究。E-mail:feigge@126.com

导师简介:吴 谨(1965—),男,湖南人,研究员,主要从事高功率脉冲气体激光的产生与应用、激光雷达系统与技术的研
究。E-mail:jwu909@263.net

激光脉冲波形宽、拖尾占激光脉冲能量的主要部分等特点,在激光加工^[1]、激光雷达^[2]、激光推进^[3]、光电对抗等领域得到一定的应用。国内外对基于 pulser/sustainer 技术的长脉冲 TE CO₂ 激光器的研究已经有一些报道^[1,4~6]。其中,文献[5,6]中的长脉冲 TE CO₂ 激光器可以在不同脉冲宽度下稳定工作,且 90% 以上的脉冲能量集中在脉冲拖尾中,具有一定的特色。本文在此工作基础上,对这种激光器的调谐特性进行了实验研究。

关于长脉冲 TE CO₂ 激光器的可调谐特性已有报道^[7];然而,采用 pulser/sustainer 技术的长脉冲可调谐 TE CO₂ 激光器的报道却较少。虽然,调谐的手段与方法与常规的可调谐 TEA CO₂ 激光器^[8,9] 并无不同,但是,由于激励方式的变化,基于 pulser/sustainer 技术的长脉冲 TE CO₂ 激光器的可调谐特性也许会有新的特点。基于这样的考虑,本文对光栅调谐的、采用 pulser/sustainer 技术激励的、紫外预电离长脉冲 TE CO₂ 激光器的调谐特性进行了细致研究。

2 实验装置

2.1 光栅谐振腔

激光器采用了“Z”型折叠腔,主放电电极由一对 Ernst 面形均匀场电极构成,其中阳极以铝材料制成,阴极以钢材料制成,激光器总的增益体积约为 1.17 L。图 1 为光栅谐振腔的示意图,谐振腔由一级衍射效率达 93% 的闪耀光栅、中间两面平面转折全反射铜镜和输出端为 50% 反射率的 ZnSe 耦合镜构成,采用一级衍射耦合输出。采用 120 line/mm 闪耀光栅刻线,光栅尺寸为 80 mm × 50 mm × 15 mm,刻线面积为 75 mm × 40 mm,材质为金属(铜)基底镀铝的一级原刻光栅。

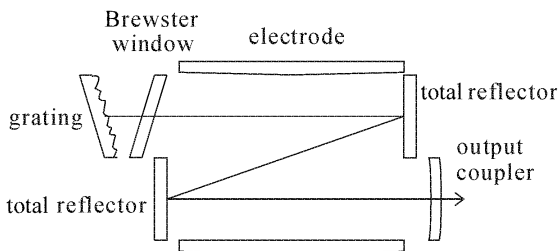


图 1 激光器谐振腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser resonator

2.2 激光器的激励电路

采用 pulser/sustainer 激励电路具有 pulser 放

电与 sustainer 放电独立可控、易于实现不同脉冲宽度的稳定辉光放电、可重复频率运转等特点^[6],如图 2 所示。高压电容充电电源 CCPS₂,高压开关 TH₂, 储能电容 C_s 和激光器组成 pulser 放电回路;高压开关 TH₁, PFN(若干个电感和电容构成的脉冲形成网络)和激光器组成 sustainer 放电回路;R 为 700 Ω 的旁路电阻, D 为充电用高压二极管。高压开关 TH₂ 导通时,电容 C_s 迅速向激光器放电,首先将气体击穿,在两主放电电极间产生大量的自由电子。紧接着 PFN 开始通过高压开关 TH₁ 对气体放电。PFN 中各电容贮存的大量能量在相对较长的时间里缓慢地注入气体中,调节电子温度,控制电子激发。

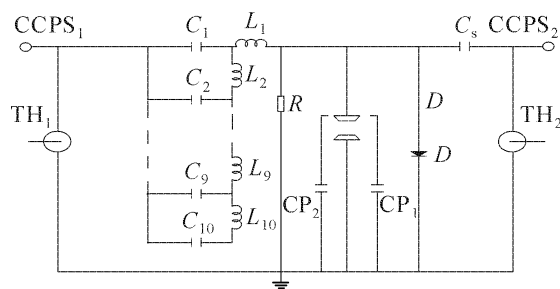


图 2 可调谐长脉冲 TE CO₂ 激光器抽运电路示意图

Fig. 2 Schematic pumping circuits of a tunable long pulse TE CO₂ laser

通过改变网络中的电感和电容的大小及级数可方便地改变输出长脉冲的宽度,放电脉冲宽度可近似计算为

$$\tau = 2 \sum_{i=1}^n \sqrt{L_i C_i} \tag{1}$$

实验中,放电电压采用美国 Tektronix 公司生产的 P6015A 高压探头测量;放电电流采用 Pearson Electronics 公司生产的 110 型电流线圈测量;激光脉冲能量采用加拿大 Gentec 公司生产的 ED-500LIR 能量探头(10.6 μm 波长标定)测量;激光脉冲波形采用光子牵引探测器测量;激光波长采用美国的 Optical Engineering 公司生产的 CO₂ 激光光谱仪观测。

3 实验结果

3.1 激光输出调谐谱

脉冲形成网络参量取为 L₁ = 210 μH, L_i = 155 μH (i = 2, 3, …, 10) 和电容 C_i = 10 nF (i = 1, 2, …, 10),根据(1)式,可以算出理论的放电脉宽约为 26 μs。激光混合气体体积比为 V(CO₂):V(N₂):V(He) = 1:5:19,气压 30 kPa 下,图 3 是在

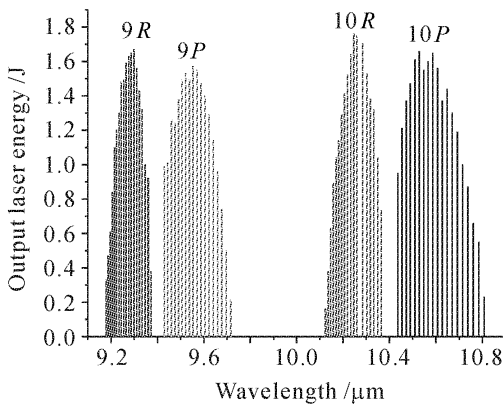


图 3 整个 CO₂ 激光可调谐区域的激光输出能量
Fig. 3 Spectrum of output energy in the tunable wavelength region of CO₂ laser

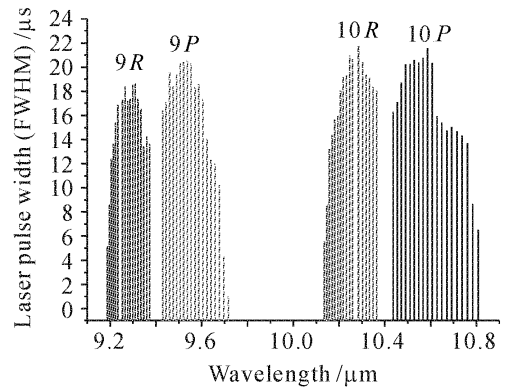


图 5 CO₂ 激光可调谐区域的激光脉冲宽度
Fig. 5 Pulse width of output laser pulse in the tunable wavelength region of CO₂ laser

sustainer 电路初始充电电压 V_{PFN} 为 22 kV, pulser 电容初始电压 V_{C_s} 为 32 kV 时获得的激光调谐谱线。

实验总共得到 75 条谱线, 分别为 9R 支的 19 条 (9R(4) ~ 9R(40)), 9P 支的 18 条 (9P(4) ~ 9P(38)), 10R 支的 19 条 (10R(4) ~ 10R(40)) 和 10P 支的 19 条 (10P(4) ~ 10P(40))。脉冲能量从弱线的 0.1 ~ 0.5 J 到强线的 1.0 ~ 1.5 J, 其中脉冲能量超过 1.0 J 的有 54 条, 脉冲能量超过 1.5 J 的有 21 条, 最大脉冲能量是 10R(20) 谱线的 1.74 J。

3.2 激光输出脉冲波形

实验观察了不同谱线的激光脉冲波形, 发现除脉冲宽度随波长变化而有所不同外, 其波形形状基本相同。图 4 是在与图 3 相同的实验条件下获得的 10R(20) 谱线的激光脉冲波形。这是这种长脉冲激光器输出的典型激光脉冲波形。可以看到, 由增益开关效应引起的脉冲尖峰很小, 激光绝大部分能量集中在拖尾中。

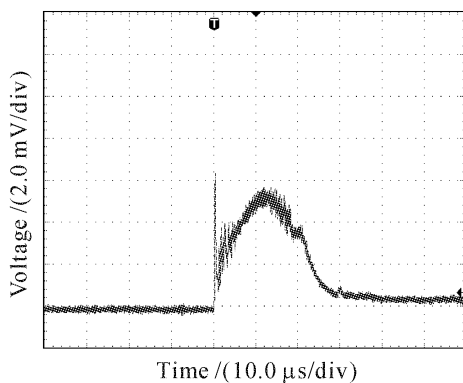


图 4 典型的激光脉冲波形
Fig. 4 Typical laser pulse profile

的图 3 中 75 条调谐谱线对应的激光脉冲宽度。

图 5 表明在相同的激励条件下, 激光脉冲宽度随着调谐波长而变化。激光脉冲宽度随波长的变化谱, 类似于激光脉冲能量随波长的变化谱。图 5 的脉冲宽度变化谱表明, 这种长脉冲 TE CO₂ 激光器的输出脉冲宽度是与调谐波长有关系的。

3.4 不同电路参数下波长对脉宽的影响

虽然, 在这种长脉冲 TE CO₂ 激光器中, 放电脉冲宽度是影响激光输出脉冲宽度的主要因素; 但是, 前面的实验结果表明, 即使激励条件相同, 不同波长激光输出脉宽并不相等。

在 sustainer 电路初始充电电压 22 kV, pulser 电容初始电压 32 kV, 改变脉冲形成网络参量取为 $L_i = 100 \mu\text{H}$ ($i = 1, 2, \dots, 5$), 电容 $C_i = 20 \text{ nF}$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 可以得到放电脉宽值约为 16 μs ; 当取 $L_i = 590 \mu\text{H}$ ($i = 1, 2, \dots, 10$), 电容 $C_i = 10 \text{ nF}$ ($i = 1, 2, \dots, 10$) 可以得到放电脉宽值约为 46 μs 。在理论放电脉宽分别为 16 μs , 26 μs , 46 μs 的情况下, 9R(20), 9P(20), 10R(20), 10P(20) 四条谱线分别得到相应的不同脉宽的长脉冲输出, 如表 1 所示。

表 1 不同放电脉宽下的激光脉冲宽度
Table 1 Laser pulse width at different discharge pulse width

FWHM of the discharge pulse / μs	Laser pulse width (FWHM) / μs			
	9R(20)	9P(20)	10R(20)	10P(20)
16.0	11.6	11.8	11.9	13.5
26.0	19.7	21.1	21.9	23.0
46.0	41.0	42.9	43.0	43.3

3.3 激光脉冲宽度 (FWHM) 与激光波长的关系

图 5 是在与图 3 相同的实验条件下, 测量得到

选取表 1 中放电脉宽值约为 16 μs 的脉冲形成

网络参量,分别研究 pulser 电容初始电压 V_{C_s} 和 sustainer 电路初始充电电压 V_{PFN} 对四条谱线脉冲宽度的影响。图 6 是 pulser 电容初始电压 V_{C_s} 为 32 kV 时,不同 sustainer 电路初始充电电压 V_{PFN} 条件下,9R(20),9P(20),10R(20),10P(20) 四条谱线输出激光脉冲宽度;图 7 是在 sustainer 电路初始充电电压 V_{PFN} 为 22 kV,不同 pulser 电容初始电压 V_{C_s} 为 32 kV 条件下,四条谱线输出的激光脉冲宽度。

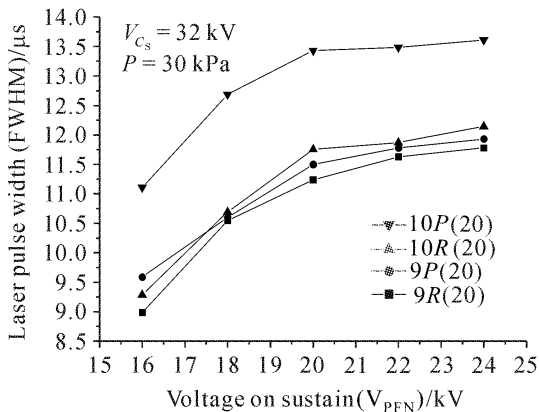


图 6 V_{C_s} 相同,不同 V_{PFN} 下的输出激光脉冲宽度

Fig. 6 Laser pulse width versus V_{PFN} with the same V_{C_s}

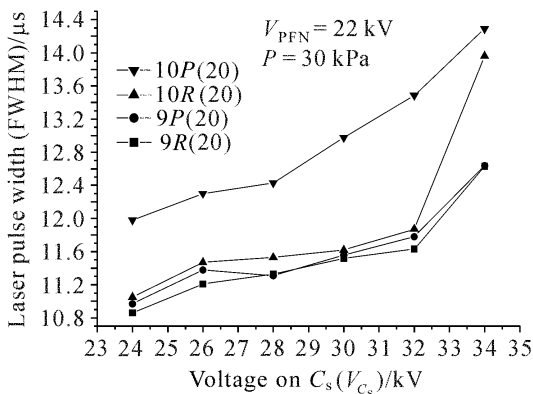


图 7 V_{PFN} 相同,不同 V_{C_s} 下的输出激光脉冲宽度

Fig. 7 Laser pulse width versus V_{C_s} with the same V_{PFN}

从表 1,图 6 和图 7 中可以看出,尽管 9R(20),9P(20),10R(20),10P(20) 四条谱线输出激光脉冲宽度随不同的激励电路条件发生变化,然而,在相同条件下,不同谱线的脉冲宽度有所不同;而且 10P(20) 谱线输出激光脉冲宽度最大,10R(20),9P(20) 输出激光脉冲宽度依次减小,9R(20) 输出激光脉冲宽度最小。

3.5 不同气体配比下波长对脉宽的影响

选取表 1 中放电脉宽值约为 26 μs 的脉冲形成

网络参量,sustainer 电路网络初始电压 22 kV,pulser 初始电压 32 kV。表 2 是在 30 kPa 的工作气压条件下, $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})$ 体积比分别为 1:5:19,1:5:14,1:4:13.8,1:2.58:9.93 的情况下测量的四条典型谱线的输出脉冲宽度。

表 2 不同气体体积比下的激光脉冲宽度

Table 2 Laser pulse width at different gas mixture volume fraction

Mixtures rate of $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})$	Laser pulse width (FWHM) / μs			
	9R(20)	9P(20)	10R(20)	10P(20)
1:5:19	19.7	21.1	21.9	23.0
1:5:14	19.7	20.9	21.7	22.8
1:4:13.8	19.7	21.0	21.3	22.5
1:2.58:9.93	19.8	21.3	21.9	22.3

从表 2 可见,不同气体配比对激光输出脉宽有一定影响,但是相同条件下,四个波长激光的脉冲宽度有所不同;而且 10P(20) 谱线输出激光脉冲宽度最大,10R(20),9P(20) 输出激光脉冲宽度依次减小,9R(20) 输出激光脉冲宽度最小。

4 激光脉冲宽度随波长变化的分析

实验结果表明,光栅调谐于不同的波长时,在同样激励和气体下,输出激光脉冲宽度有所不同。图 8 为相同条件下(激励电路、放电电压、气体配比、工作气压等),实现正常辉光放电,9P(32),9P(22) 两条谱线的放电电流和激光波形图。

从图 8 可以看出,同样的激励条件下,9P(32) 谱线的激光建立时间约 22 μs ,9P(22) 谱线的激光建立时间约 14 μs 。显然,这两者的差别主要来源于谱线增益的不同。由于激光建立时间不同,而激光结束时间点相同,最后形成的激光脉冲宽度也不同。

基于 pulser/sustainer 电路的长脉冲 TE CO_2 激光器放电时,输出激光波形由 pulser 电路产生的预脉冲和 sustainer 电路产生的长脉冲组成(如图 4 所示),其中 pulser 电路产生的预脉冲是激光脉冲的开始,它是一个由增益开关效应引起的尖峰脉冲。相同的激励条件下,放电注入激光介质能量相同,由于不同谱线的增益不同,形成激光振荡的阈值不同,因此造成长脉冲激励的 CO_2 激光器的输出脉冲的宽度会有所不同。

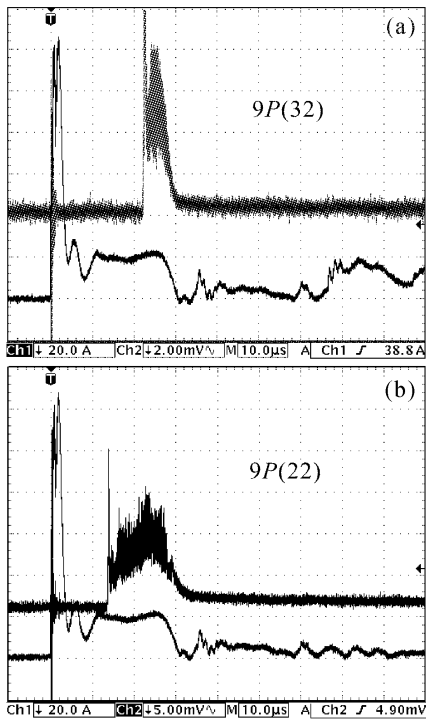


图 8 不同谱线的激光波形和放电电流对比图

Fig.8 Laser pulse profile (upper trace 2) and discharge current waveform (lower trace 1) of different spectral lines

5 结 论

对于基于 pulser/sustainer 技术的紫外预电离长脉冲 TE CO₂ 激光器来说,其调谐特性与常规 CO₂ 激光器的可调谐特性基本相同。实验发现,在相同激励条件下,这种激光器的输出脉冲形状随着激光调谐波长的不同而基本保持不变,但是,对应的激光脉冲宽度(FWHM)是随激光波长而变化的。引起这种变化的主要原因在于不同谱线的增益不

同。虽然,放电脉冲宽度是影响长脉冲 TE CO₂ 激光器输出脉冲宽度的主要因素,但是,对于可调谐激光器,由于不同谱线的增益不同,其激光输出脉冲宽度也有所不同。这一观察结果,对于这种可调谐激光器的应用有一定参考价值。

参 考 文 献

- 1 Y. Okita, K. Yasuoka, A. Ishii *et al.*. Long-pulse, high-repetition-rate transversely excited CO₂ laser for material processing [C]. *SPIE*, 1994, **2118**:22~28
- 2 Victor Hasson. Review of recent advancements in the development of compact high power pulsed CO₂ laser radar systems [C]. *SPIE*, 1999, **3707**:499~512
- 3 Zheng Yijun, Tan Rongqing, Zhang Kuohai *et al.*. Experiment of laser-propulsion free-flight [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):171~174
郑义军,谭荣清,张阔海等. 激光推进自由飞行实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):171~174
- 4 M. R. Harris, D. V. Willetts. Transversely excited CO₂ laser with long pulse duration discharge [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **83**(3,4):227~230
- 5 Zhang Zhao, Wu Jin, Wang Donglei *et al.*. Long pulse TE CO₂ laser with ultraviolet-preionization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1599~1604
张 昭,吴 谨,王东蕾等. 长脉冲紫外预电离 TE CO₂ 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12):1599~1604
- 6 Jin Wu, Zhao Zhang, Donglei Wang *et al.*. Novel long pulse TE CO₂ laser excited by pulser-sustainer discharge [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**:701~704
- 7 Tan Rongqing, Wan Chongyi, Wu Jin *et al.*. Investigation on tunable high repetition rate TEA CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):739~742
谭荣清,万重怡,吴 谨等. 高重复频率可调谐 TEA CO₂ 激光研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):739~742
- 8 A. Chakrabarti, J. Reid. Long-pulse transversely excited ¹²CO₂ and ¹³CO₂ lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(1):37~42
- 9 Wu Jin. Theoretical mode on calculating grating tuned TEA CO₂ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):472~476
吴 谨. 光栅调谐 TEA CO₂ 激光器理论计算模型[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):472~476