

文章编号: 0258-7025(2009)05-1062-06

基于 Pulser/Sustainer 技术的高重复频率长脉冲 紫外预电离 TE CO₂ 激光器

吴 谨 王东蕾 刘世明 唐永新

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

摘要 详细研究了一台增益体积为 1.17 L, 采用 pulser/sustainer 技术激励的高重复频率长脉冲紫外预电离 TE CO₂ 激光器的运转特性。激光器最高脉冲重复频率 100 Hz, 输出激光脉冲半峰全宽(FWHM)约 23.0 μs。实验记录了稳定辉光放电与有起弧的辉光放电时激光器的放电电压/电流波形; 测量得到当 sustainer 充电电压从 12 kV 到 30 kV 时, 激光器输出脉冲能量从约 0.40 J 变化上升至约 4.0 J, 观察到在同一 sustainer 充电电压下, 激光器输出平均功率随脉冲重复频率线性变化; 监测到激光器以 sustainer 充电电压 22 kV, 重复频率 100 Hz 连续工作 10 min 时, 输出平均功率仅从最大 257 W 下降至 247 W。实验数据表明, 与采用低感快脉冲放电激励相比, 这种新型的长脉冲 TE CO₂ 激光器具有增益开关效应小、输出动态范围大、“起弧适应性”好、输出平均功率下降慢等特点。

关键词 激光技术; 长脉冲 TE CO₂ 激光器; 紫外预电离; pulser/sustainer 技术; 高重复频率

中图分类号 TN248.2⁺2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1062

Performance Investigation on Repetition-Rate Long-Pulse UV-Preionized TE CO₂ Laser Utilizing Pulser/Sustainer Technique

Wu Jin Wang Donglei Liu Shiming Tang Yongxin

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Performance of a high repetition-rate long-pulse UV-preionized TE CO₂ laser with an active volume of 1.17 L utilizing pulser/sustainer discharge technique is investigated in detail. The laser operates with a high repetition-rate of 100 Hz and output laser pulse full width at half maximum (FWHM) of 23.0 μs. The voltage/current waveforms under stable glow discharge and arc discharge are given respectively. The laser output pulse energy varies from about 0.40 J to 4.0 J as the charging voltage on the sustainer circuits rises from 12 kV to 30 kV. Under the same sustainer charging voltage, the laser output power increases linearly with the pulse repetition rate. With sustainer charging voltage of 22 kV and repetition rate of 100 Hz, the laser output power only decreases from the highest 257 W at the beginning to 247 W at the end of 10-min continuous operation. All the experimental data show that, compared with the conventional TE CO₂ laser with low inductance quick discharge, it generates a long laser pulse profile containing greatly suppressed initial gain-switch spike, tolerates arcing discharge in repetition rate operation, and decreases more slowly under high repetition-rate long-time operation.

Key words laser technique; long pulse TE CO₂ laser; UV-preionization; pulser/sustainer technique; high repetition rate

1 引 言

1970 年 Beaulieu^[1] 首先实现 TEA CO₂ 激光器运转, 此后这种采用低感快脉冲放电激励的常规

TEA CO₂ 激光器得到了广泛研究。某种意义上说, 建造 100 kW 功率级的常规 TEA CO₂ 激光器已不存在技术障碍^[2]。不过, 基于应用需求, 国内还陆续

收稿日期: 2008-08-05; 收到修改稿日期: 2008-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(60678019)资助课题。

作者简介: 吴 谨(1965—), 男, 侗族, 研究员, 博士, 主要从事激光技术、激光雷达系统等方面的研究。

E-mail: jwu909@263.net

有工作报道^[3~6]。与常规 TEA CO₂ 激光器输出高峰值功率短脉冲不同,长脉冲 TE CO₂ 激光器的输出激光脉冲半峰全宽(FWHM)可达数十微秒。

在紫外预电离 TE CO₂ 激光器中采用 pulser/sustainer 技术^[7]获得长脉冲激光输出,国外在上世纪 90 年代前后有较多报道^[8~13]。这些工作中,M. R. Harris 等^[9]在约 0.4 L 的放电体积内,分别实现脉冲半峰全宽(FWHM)为 16.5 μs 和 28.5 μs 的长脉冲运转;Y. Okita 等^[13]通过预电离电路的特殊设计,采用一个高压放电开关在 0.29 L 放电体积内实现了 16 μs/1.1 J, 500 Hz 的长脉冲激光运转。国内相关研究滞后许多,2005 年才有张昭等^[14]在 1.17 L 的放电体积内获得 6.5 J/20 μs 的激光输出。其工作有如下特点^[14,15]:1) 长脉冲放电稳定性好,相同条件下,不同脉冲宽度均能稳定放电;2) 激光脉冲拖尾比重大,增益开关效应引起的尖峰脉冲大大减弱;3) sustainer 充电电压动态范围大,可远高于 pulser 充电电压。

鉴于重复频率长脉冲 CO₂ 激光器在材料处理^[13,16]、激光推进^[17]、激光雷达^[18]等方面得到应用,而国内外关于这种激光器的研究报道并不深入,进一步揭示长脉冲 TE CO₂ 激光器的运转特性是有意义的。

2 激光器设计

激光器基本结构如文献^[14,15]所述,主放电电极、预电离电极、热交换器、切向风机、导流风道等安装在一个直径 420 mm 的密封不锈钢腔体内。主放电电极由一对近似 Ernst 面型均匀场电极组成,放电横截面积为 52 mm×25 mm,有效放电长度为 900 mm,形成的有效放电体积约 1.17 L。预电离采用电容耦合的双边火花针预电离,在主放电阴极两侧各有一排针状火花隙,每根针与一个小电容相连,火花针与阴极边缘之间距离约为 4 mm。切向风机转速约 3000 r/m。为保证流经放电区的气流均匀,气体进入放电区前经过适当的整流。激光气体混合比约为 V(CO₂):V(N₂):V(He)=1:2.5:13,考虑到重复频率运转,还掺有少许 H₂ 和 CO,总气压 30 kPa。

激光谐振腔采用“Z”形的折叠腔,全反端为 R=20 m 的凹面铜镜,输出端是反射率为 50% 的镀膜 ZnSe 凹镜,光路中间转折镜是铜制平面反射镜。整个谐振腔安装在由 3 根钢管支撑的光桥结构上。通过真空隔离的方法使光桥完全处于大气中,一定程度上减少了因密封腔内外压力而造成谐振腔的变化。另外,3 根光桥管还通过循环水冷却,进一步减

少激光器在高重复频率长时间运转时,3 根光桥管温度变化不一致导致谐振腔的变化。

激励电路是典型的 pulser/sustainer 放电电路,如图 1 所示,其中 CCPS1 和 CCPS2 分别是两台高压电容充电电源的输出,V₁ 和 V₂ 是两个高压放电开关,L_i,C_i(i=1,2,⋯,10)为 10 个电感和 10 个电容构成的脉冲形成网络(PFN)。C_s=6 nF 为 Pulser 快放电储能电容,R 为充放电电阻,L_p 为充放电电感,D 为充电回路高压二极管,L_s 为激光器的串联电感。当激光器以高重复频率运转时,充电回路消耗的功率是不可忽视的,高压二极管 D 有助于减小充电阶段的无用功耗,提高整个激光器系统的插头效率(Plug efficiency)。

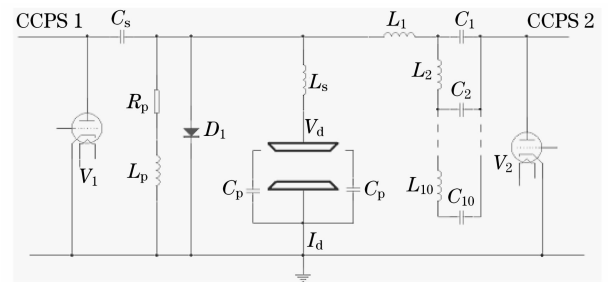


图 1 长脉冲 TE-CO₂ 激光器激励电路

Fig. 1 Excitation scheme of long pulse TE-CO₂ laser

在图 1 中,高压开关 V₁, 储能电容 C_s 和激光器组成 pulser 快放电电路;高压开关 V₂, PFN 和激光器组成 sustainer 放电电路。高压开关 V₁ 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 V₂ 对气体放电。PFN 各电容贮存的能量在相对较长的时间里缓慢地注入激光工作气体中,控制电子温度,产生长脉冲激光输出。

对于激光器光电参数的测量,采用的是常规 TE CO₂ 激光器实验中常用的测量设备:放电电流采用 Pearson Electronics 生产的 110 型线圈;放电电压采用 Tektronics 公司生产的 P6015A 高压探头;激光脉冲波形采用 Ge 单晶光子牵引探测器;激光脉冲能量/平均功率分别采用 Coherent 公司的 J100 能量探头和 PM5K 功率探头。由于激光器高压脉冲放电时存在严重电磁干扰,有些测量需要在屏蔽室进行。

3 实验结果

3.1 长脉冲放电特性

选择 sustainer 电路的 PFN 参数约为 L_i=155 μH(i=1,2,⋯,10),C₁=C₂=C₁₀=4 nF,C₃=

$C_7 = C_8 = C_9 = 10 \text{ nF}$, $C_4 = C_5 = C_6 = 16 \text{ nF}$, 即 PFN 总电容为 100 nF 。根据表达式

$$T = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{L_i \cdot C_i}, \quad (1)$$

可计算得到这组 PFN 参数对应的 sustainer 放电脉冲宽度 T 约为 $24.1 \mu\text{s}$ 。图 2(a)和(b)为 pulser 电容 C_s 充电电压 30 kV , sustainer 充电电压 24 kV 时典型的长脉冲放电波形。图 2(a)中,在 sustainer 放电阶段,电流幅值小于 50 A ,且逐渐衰减; sustainer 主放电结束后,放电电压的较大波动并没有引起放电电流的急剧变化。这是因为激光主放电结束,气体已基本完成消电离。图 2(b)中,可以看出辉光放电到起弧放电的转换时间约 $1 \mu\text{s}$,起弧时电流突然变大,但最大电流值也没有超过 100 A 。原因是起弧放电只是主放电电极间局部电子数密度异常升高,由于 PFN 中电感的限制,并不导致总的放电电流的无限制升高。但是,局部电子数密度的聚集仍然破坏了整个主放电电极间的阻抗特性,致使大量的注入能量流过局部的弧光放电通道,注入辉光放电区域的能量受到大大的削弱,从而抑制了均匀、稳定的大体积辉光放电。从图 2(b)还可以看出,起弧放电发生在 sustainer 放电正常持续了近 $20 \mu\text{s}$ 后,且发生起弧放电后,放电电流振荡,电流峰峰值不过 100 A 。这种长脉冲 TE CO_2 激光器具有不同于采用低感快脉冲激励电路的常规 TE CO_2 激光器的显著特点是:在长脉冲 TE CO_2 激光器中,由于 PFN 中电感的限流作用,即使起弧,也不会导致放电电流的无限制增长,而且, pulser 放电注入能量很小,起弧放电不会紧接着 pulser 放电产生,而是 sustainer 放电发生一段时间后。因此,即使放电起弧,也会有一定能量的激光脉冲输出。可以说,在这种长脉冲 TE CO_2 激光器中,起弧是有限制的起弧,弧光放电导致的气体分子电离也是有限的,因而,下一个放电脉冲到来前很容易实现完全的消电离。这个特点使这种长脉冲激光器在高重复频率运转时表现出良好的“起弧适应性”:起弧一般不会导致连续起弧,激光器可以带弧长时间运转。

3.2 单脉冲激光输出特性

图 3 给出了激光器输出脉冲能量随 sustainer 充电电压变化的曲线。两条曲线体现的是串联电感 L_s 的作用,可以看出,加入串联电感 L_s ,激光输出脉冲能量比没有串联电感时有大约 0.5 J 的提高。原因是合适的串联电感 L_s ,有增强预电离的作用,有利于 sustainer 放电^[19]。其实,在采用低感快脉冲

电路激励的常规 TE CO_2 激光器中,合适的串联电感也有提高激光输出效率的作用^[20]。

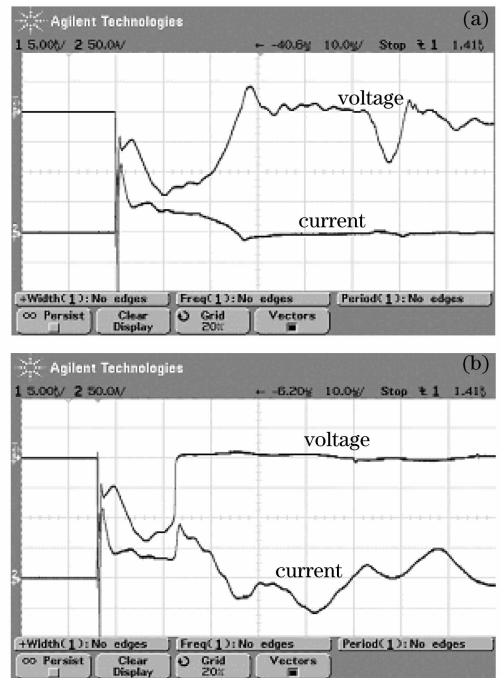


图 2 放电电压/电流波形。(a)正常放电;(b)有起弧放电
Fig. 2 Discharge voltage/current waveforms. (a) stable glow discharge; (b) glow discharge flowed by arc discharge

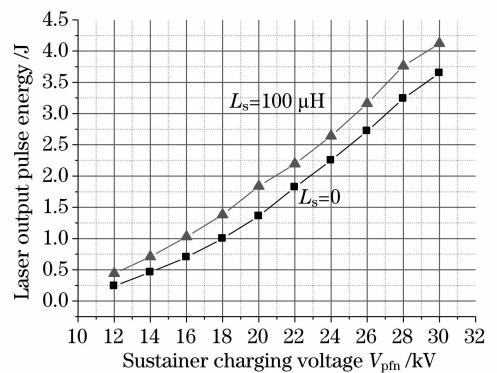


图 3 激光器输出脉冲能量与 sustainer 充电电压 V_{pfn} 的关系
Fig. 3 Laser output pulse energy versus sustainer charging voltage V_{pfn}

图 3 中两条曲线几乎平行,这说明串联电感 L_s 的作用主要体现在 pulser 放电过程中,而对 sustainer 放电影响不大。这是因为, pulser 放电是快脉冲放电, L_s 的串入减缓了 pulser 放电电流的上升和下降过程,展宽了 pulser 放电电流脉冲,使气体分子得到充分的电离;而对于 sustainer 电路, PFN 本身就包含 10 个比 L_s 还大的电感, L_s 的串入对 sustainer 放电过程影响有限。图 3 的结果也表明,在这种长脉冲 TE CO_2 激光器的激励电路中,不

必像常规 TEA CO₂ 激光器那样,经常要采用宽铜带连接以减少连线电感。这就降低了工程要求,有利于高压绝缘处理。

从图 3 还可以看出,这种长脉冲 TE CO₂ 激光器有相当宽的输出动态范围。在 sustainer 充电电压只有 12 kV 时,还有激光输出。在这时,sustainer 放电主要是非自持放电。当串联电感 $L_s = 100 \mu\text{H}$ 时,从 sustainer 充电电压 12 kV 到 30 kV,激光器输出脉冲能量近似线性地从 0.44 J 上升至 4.1 J,变化将近 10 倍。这样大的动态范围使这种激光器在使用时,可以通过调节 sustainer 充电电压来方便地调节激光器输出脉冲能量,而不会影响激光放电的稳定性。

作为比较,不改变激光器其他参数,仅将图 1 中的激励电路改为常规的低感快脉冲激励电路,储能电容与图 1 中的 pulser/sustainer 电路中总电容量相同,即 106 nF。图 4 是激光器输出的脉冲能量与储能电容充电电压的关系。从图 4 可见,激光输出脉冲能量随着充电电压从 22 kV(电压低于 22 kV 时,放电不稳定)开始呈近似线性增大,在充电电压 30 kV 时,输出脉冲能量为 3.74 J,比图 3 中 $L_s = 100 \mu\text{H}$ 时的 4.16 J 略小。对比图 3 与图 4 可见,这种激光器采用 pulser/sustainer 放电激励比采用低感快脉冲放电激励具有更大的输出动态范围。

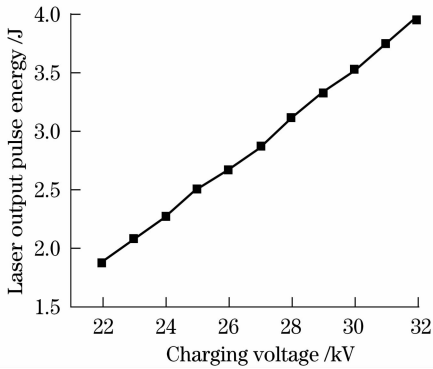


图 4 采用低感快脉冲激励时激光输出脉冲能量与电容充电电压的关系

fig. 4 Laser output pulse energies versus charging voltages on the storage capacitor with conventional low inductance quick discharge excitation

3.3 重复频率运转特性

图 5 是在 $L_s = 100 \mu\text{H}$ 时,激光器输出平均功率与 sustainer 工作电压和脉冲重复频率的关系图。可以看到,在同一个 sustainer 充电电压 V_{pfn} 下,激光器输出平均功率随脉冲重复频率的升高而线性升

高。这表明,重复频率运转时,每个激光脉冲输出能量稳定,不随重复频率变化而变化;在 100 Hz 脉冲重复频率和 $V_{\text{pfn}} = 24 \text{ kV}$ 时,激光平均输出功率 315 W,即每个激光脉冲的能量为 3.15 J。这个能量值比图 3 中测量得到的数值略高,这主要来源于功率探头和能量探头的标定误差。根据表达式

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{\left(\frac{1}{2} \cdot C_s \cdot V_s^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{10} C_i \cdot V_{\text{pfn}}^2\right) \cdot f} \quad (2)$$

可得到 100 Hz 脉冲重复频率和 $V_{\text{pfn}} = 24 \text{ kV}$ 时激光器相应的电光转换效率约为 10%。(2)式中, P_{out} 为激光输出平均功率, f 为脉冲重复频率。

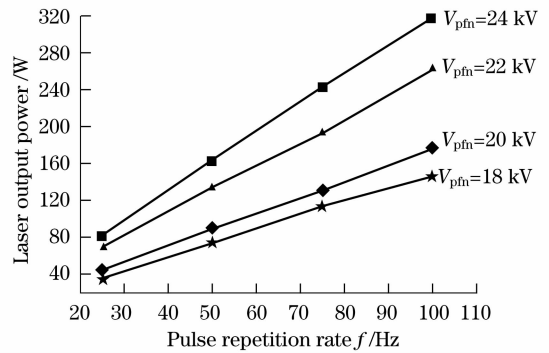


图 5 长脉冲 TE CO₂ 激光器重复频率输出特性
Fig. 5 Laser output power under various pulse repetition rates

重复频率运转时,图 5 中最高只给出 $V_{\text{pfn}} = 24 \text{ kV}$ 时的结果。实验观察到,在更高的 V_{pfn} 下运转时,激光器虽然仍有可观的平均功率输出,但是,放电起弧较多。这可能是因为随着激光器注入能量增加,sustainer 放电电流增大,对放电脉冲宽度远大于辉光放电向弧光放电转换时间的长脉冲 TE CO₂ 激光器而言,放电、气流循环等因素引起的扰动更容易导致放电的不稳定。

图 6 是 $V_{\text{pfn}} = 24 \text{ kV}$ 时激光器输出的长脉冲激光波形。图中,横向坐标为 $20 \mu\text{s}/\text{div}$,起始的竖线为放电开始引入的干扰信号,激光出现在放电开始约 $6 \mu\text{s}$ 之后;激光脉冲半峰全宽 (FWHM) 约 $23.0 \mu\text{s}$,增益开关效应引起的尖峰脉冲依然可见,但与整个激光脉冲相比可以忽略。从图 1 的激励电路可以看出,在 pulser/sustainer 技术激励的长脉冲 TE CO₂ 激光器中,增益开关效应来源于 pulser 快放电。根据表达式

$$\beta = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_s \cdot V_s^2}{\left(\frac{1}{2} \cdot C_s \cdot V_s^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{10} C_i \cdot V_{\text{pfn}}^2\right)} \quad (3)$$

可计算得到图 6 放电情况下 pulser 放电注入能量只占总注入能量的 $\beta=8.57\%$; 考虑到预电离放电会消耗相当部分的 pulser 放电注入能量, 因此, 增益开关效应得到大大削弱。这种削弱增益开关效应产生的激光脉冲波形, 是本文设计的长脉冲 TE CO₂ 激光器的特点。

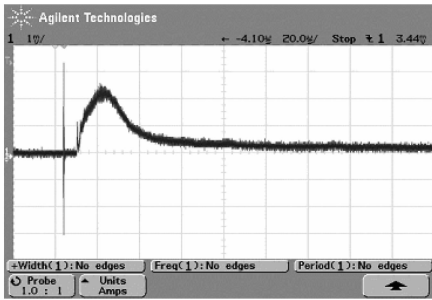
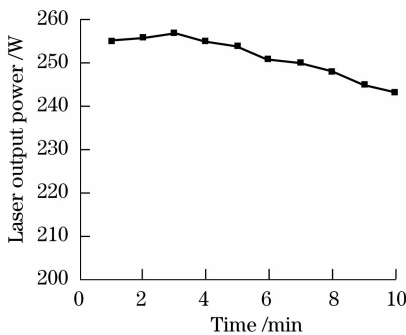


图 6 $V_{pfn}=24$ kV 时激光器输出的长脉冲激光波形

Fig. 6 Laser output pulse profile at $V_{pfn}=24$ kV

图 7 给出了 $V_{pfn}=22$ kV 时, 激光器以 100 Hz 重复频率连续工作 10 min 所记录的平均输出功率。因为功率探头需要一个稳定时间, 所以数据是从第 1 min 开始记录的。可以看出, 连续工作 10 min, 激光输出比较稳定, 到第 10 min 工作结束时, 激光输出平均功率仍然有最高输出功率 (257 W) 的 94.6%, 仅下降了 5.4%。



7 $V_{pfn}=22$ kV, 重复频率 100 Hz 连续工作输出平均功率

Fig. 7 Laser output average power at $V_{pfn}=22$ kV and repetition rate of 100 Hz

作为对比, 也实验了让激光器以图 4 中的低感快脉冲激励, 在充电电压为 24 kV 下以 100 Hz 重复频率放电, 工作不到 1 min, 激光器就发生不可逆转的起弧放电。这个“失败”的实验也从另一个角度说明了长脉冲 TE CO₂ 激光器比常规 TE CO₂ 激光器具有更为良好的“起弧适应性”。

4 结 论

从实验数据可以看出, 新型的采用 pulser/sustainer 技术激励的紫外预电离长脉冲 TE CO₂ 激

光器, 具有一些新的特点。与采用常规低感快脉冲电路激励相比, 激光输出具有更大的动态范围, 输出脉冲波形中由增益开关效应引起的高峰值功率尖峰脉冲受到大大抑制; 高重复频率运转时, 因为激励电路中, pulser 放电注入能量占总注入能量比重小且 sustainer 放电中存在电感的限流作用, 这种激光器具有良好的“起弧适应性”, 长时间工作激光输出平均功率下降小。具有这种特点的激光器, 比较适合用于工业加工。

致谢 衷心感谢朱森华同志在实验过程中的大力协助。

参 考 文 献

- 1 A. J. Beaulieu. Transversely excited atmospheric pressure CO₂ lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**:504~505
- 2 Victor Hasson. Review of design concepts and diagnostics for 100 kW-class repetitively pulsed CO₂ lasers[C]. *SPIE*, 2003, **5120**: 717~730
- 3 Zuo Duluo, Lu Hong, Cheng Zhuhai. Studies on a 100 J class UV-preionized TEA CO₂ laser [C]. *SPIE*, 2005, **5777**:442~445
- 4 Ke Changjun, Tan Rongqing, Zheng Yijun *et al.*. 100 J TE CO₂ laser with side-sliding discharge preionization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1009~1012
- 柯常军, 谭荣清, 郑义军 等. 100 焦耳侧面滑闪预电离 TE CO₂ 激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1009~1012
- 5 Ren Deming, Wang Yuanhu, Qu Yanchen *et al.*. Research tuned TEA CO₂ laser by a scanning mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1027~1031
- 任德明, 王元虎, 曲彦臣 等. 采用振镜扫描方式的快调谐 TEA CO₂ 激光器. [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1027~1031
- 6 Wang Yuanhu, Qu Yanchen, Zhao Weijiang *et al.*. Tunable TEA CO₂ laser by a two-dimensional scanning system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):359~362
- 王元虎, 曲彦臣, 赵卫疆 等. 二维振镜调谐 TEA CO₂ 激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):359~362
- 7 James P. Reilly. Pulser/sustainer electric-discharge laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(8):3411~3416
- 8 A. Chakrabarti, J. Reid. Long pulse transversely excited ¹²CO₂ and ¹³CO₂ lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(1):37~42
- 9 M. R. Harris, D. V. Willetts. Transversely excited CO₂ laser with long pulse duration discharge [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **83**(3~4): 227~230
- 10 P. K. Bhadani, A. Sylvan, R. G. Harrison. Efficient switchless multi-joule TE-CO₂ laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(6): 1404~1407
- 11 A. Sylvan, P. K. Bhadani, R. G. Harrison. Small solid-state switched pulser-sustainer TEA CO₂ laser [J]. *Meas. Sci. Tech.*, 1991, **2**(2): 49~53
- 12 P. K. Bhadani, R. G. Harrison. Efficient long pulse TE CO₂ laser using magnetic-spiker sustainer excitation [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(12):5543~5545
- 13 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
- 14 Zhang Zhao, Wu Jin, Wang Donglei *et al.*. Long pulse TE CO₂ laser with UV-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

- 15 Jin Wu, Zhao Zhang, Donglei Wang *et al.*. Novel long pulse TE CO₂ laser excited by pulser-sustainer discharge[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(4):701~704
- 16 H. Arenz, G. Sipos, P. Bickel *et al.*. Pulse lengthening of a TE-CO₂-Laser for materials processing [C]. *SPIE*, 1996, **2788**: 74~82
- 17 L. N. Myrabo, M. A. Libeau, E. D. Meloney *et al.*. Pulsed laser propulsion performance of 11-cm parabolic 'bell' engines within the atmosphere [C]. *SPIE*, 2004, **5448**: 450~464
- 18 Victor Hasson. Review of recent advancements in the development of compact high power pulsed CO₂ laser radar systems [C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 499~512
- 19 Wang Xunzhong, Wu Jin, Wang Donglei *et al.*. Long pulse TE CO₂ laser with a novel excitation scheme[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(6):746~750
汪训忠,吴 谨,王东蕾等. 采用新型激励方式的长脉冲 TE CO₂ 激光器[J]. *光电子 • 激光*, 2008, **19**(6):746~750
- 20 Li Dianjun, Yang Guilong. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO₂ laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5):807~810
李殿军,杨贵龙. TEA CO₂ 激光器主放电延迟时间对效率的影响 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 807~810