

新型高重复频率脉冲 CO₂ 激光器

郑义军, 谭荣清, 王东雷, 张阔海, 黄文武, 刘世明, 李能文, 孙 科, 卢远添, 刁伟伦

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

摘 要: 报道了一种新型高重复频率的脉冲 CO₂ 激光器。该型激光器结构紧凑, 激光器外型尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm, 工作气体放电增益体积为 12×10³ mm³, 谐振腔的长度为 310 mm。为了获得大体积均匀稳定的气体放电, 激光器采用了紫外电晕预电离方式。在激光器自由运转时, 单脉冲激光的输出能量达到 15 mJ, 输出脉冲的半高全宽为 70 ns。激光器采用紧凑型高速涡轮增压风机, 在一个大气压的条件下, 气流循环速度超过 100 m/s, 激光脉冲重复频率为 1.5 kHz, 采用大体积强迫冷却和气体主动置换技术, 可以获得较长时间激光稳定输出。在已有的实验基础上, 采用光栅调谐, 可快速准确地实现高重复频率脉冲 CO₂ 激光器的谱线选支输出。

关键词: 脉冲 CO₂ 激光器; 高重复频率; 紫外预电离

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2697-05

Novel high repetition-rate pulse CO₂ laser

Zheng Yijun, Tan Rongqing, Wang Donglei, Zhang Kuohai, Huang Wenwu,
Liu Shiming, Li Nengwen, Sun Ke, Lu Yuantian, Diao Weilun

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

Abstract: A novel transversely excited atmospheric (TEA) CO₂ laser with high repetition-rate was reported. The size of laser is 300 mm×300 mm×300 mm. The discharge volume is 12×10³ mm³, the length of cavity is 310 mm. The ultraviolet preionization makes the discharge even and stable, the output energy can be as high as 15 mJ under the circumstance of free oscillation, and the full width at half maximum of the light pulse is 70 ns. To acquire the high wind velocity, a turbocharger was used in the system of the fast-gas flow cycle. When the pressure in the cavity is 100 kPa, the wind speed is 100 m/s, and the repetition rate of the TEA CO₂ laser is up to 1.5 kHz. On the basis of preliminary experiment, the system of the grating tuning line selection can be applied to the high repetition-rate pulse laser to obtain the output of grating line selection accurately and fast.

Key words: pulse CO₂ laser; high repetition rate; ultraviolet preionization

0 引言

随着激光技术的迅速发展,激光正广泛应用于激光测距、激光制导、激光侦察、激光对抗、激光雷达等各个方面。TEA CO₂激光以其 10.6 μm 波长处于大气窗口,峰值功率高,以及穿透烟雾能力强,对人眼安全,同时还可与红外前视系统兼容等优点,受到各军事大国竞相关注^[1-7]。为了适应跟踪激光应用系统对 TEA CO₂激光器高重复频率,体积小,质量轻,便于架装的要求,研制高重复率小型化的激光源是 TEA CO₂激光器所要解决的关键技术。

高重复频率横向放电激励大气压的 CO₂激光器密封腔体内的气压高,脉冲宽度窄,采用脉冲重复频率的运转方式工作。为了在高重复频率条件下,实现激光脉冲的稳定输出,首先要在主放电电极间获得大体积、均匀稳定的脉冲辉光放电区。而激光器单位工作气体内注入的高密度能量以及气体在放电区的无序扰动都会导致气体的放电过程,由辉光放电向弧光放电转变^[8]。在横向激励大气压 CO₂激光器中,气体放电的电光能量转换效率约为 15%,其余 85%左右的电能将转化为热能残存在放电气体里,降低激光器的输出功率。同时,放电引发的气体分解和反应会产生不利于气体稳定放电和激光输出的成分。大量的实验研究表明,气体稳定的放电频率与气体的清洗系数成正比,采用气体循环系统可以在紧邻的两个脉冲间隔时间内,将放电后的气体迅速吹离放电区;匀化放电区内气体流场分布;冷却经历放电的高温气体。文中针对横向激励大气压的 CO₂激光器气体循环系统,就风机及散热器结构布局进行重新设计,采用紧凑型涡轮增压风机,使得流经主放电区内的循环风速超过 100 m/s,激光脉冲重复频率为 1.5 kHz,获得了较长时间的激光稳定输出。

1 激光器结构

高重复频率 CO₂激光器的主体包括:(一)主放电电极和预电离电极组成的气体放电系统,(二)由气体循环风机和热交换器等组成的气体循环冷却系统。这两个系统布放在激光器真空腔体内。激光器腔体采用不锈钢材料精密焊接而成,光学谐振腔等零件组合部位采用高真空硅橡胶圈密封连接。这样一

方面可以得到可靠的结构强度,另一方面也可以大幅度降低气体高压放电所产生的强烈电磁辐射,有利于激光器的控制系统和参数测量系统免受电磁辐射的干扰。

主放电电极采用改进后的张氏电极,为避免高重复频率条件下阴极表面溅射而引起的放电不稳定性,电极材料选用 45# 碳钢,主放电电极间距 10 mm,电极宽度 10 mm,电极长度 120 mm。为了有效提高放电增益体积的同时,减小激光器的体积,预电离组件采用石英玻璃管状紫外电晕预电离结构,紧固在主放电阴极的两侧。在主电极放电前,预电离先行非自持放电,位于主电极间的部分气体被电离,在阴阳两主电极之间形成均匀电场,电极间阻抗迅速下降,进而获得均匀稳定的主电极辉光放电。

激光谐振腔采用典型的平凹腔结构,后腔镜为曲率半径 4 m 的无氧铜基底的表面镀金全反镜,输出镜为部分透射的 ZnSe 平面镜。由于采用电晕预电离方式,谐振腔内的激光输出增益较低,输出镜采用双面镀膜的工艺,腔内侧的工作面镀以 10.6 μm 为中心波长且反射率为 60%的膜层,腔外侧膜面镀以 10.6 μm 为中心波长的增透膜。为了进一步提高输出激光的光束质量,在腔内靠近输出镜的位置加装限模光阑,以获得低阶模的激光输出。

在密闭的高重复频率横向激励大气压 CO₂激光器腔体内,循环系统的通道是由风机、放电区、热交换器和导流装置构成的闭环结构,图 1 给出了激光器的布局结构示意图。激光器件采用高速涡轮增压风机获得高速循环的气流,通过优化风道的结构,可以减小压力损失,使气流在流经放电区时稳定、均匀。热交换器可以有效地将气体放电产生的冗余热量沉积并释放到系统外部环境。受实际应用中

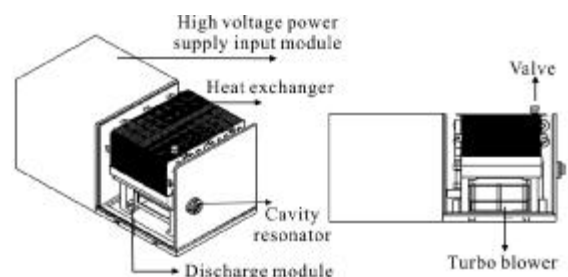


图 1 激光器主体结构图

Fig.1 Structure diagram of laser

激光器体积的限制,流场中的气流没有充分发展的空间,在有限的气流通道内,如何使放电区的气流更加均匀,是整个流场结构设计的难点。基于对系统整体的考虑,设计中,采用结构紧凑的新型涡轮增压式风机提供高速气流,在热交换器和导流装置的设计中采取整体结构,以管翅式散热器作为气体回流风道,最大限度地提高热交换截面。

气体放电过程中,CO₂分子会产生严重的分解:CO₂→CO+O。这种气体分解会不停地消耗CO₂分子的数量,使得激光输出增益降低。而在预电离过程中主电极间形成的大量自由电子,在脉冲放电时,会与放电区内的粒子发生碰撞。由于电子能量分布的不均匀性,电子在与CO₂分子碰撞时,一些能量较高的电子还会进一步加剧CO₂分子分解,其过程e+CO₂→CO+O+e。CO₂分子分解的数量随这种大能量电子的数量增加而增多。此外,由于CO₂气体在放电过程中,CO₂分子分解成了CO和O,而O与N₂气体又进一步化学反应:N₂+O₂→N₂O, N₂+O₂→2NO的过程会产生不利于稳定放电的杂质N₂O和NO,并伴随产生负离子O⁻和NO⁻,降低了放电区的电子密度,极易产生弧光放电。为便于激光器运转过程中气体主动置换,补偿放电过程造成的CO₂分子分解,在激光器密封腔体的顶端设计了一个流量气阀,配以充排气系统,腔内激光混合气体可以不间断更新,以实现激光的长时间稳定输出。

2 激光器电路及参数

如图2所示,激光器电路由激光器电极、高压电源、脉冲形成单元、脉冲调制触发电路和脉冲触发信号等几个单元构成。高速涡轮增压风机启动后,激光器腔体内的气体经风道出口急速通过主电极。高压开启后,脉冲形成单元内的储能电容迅速充电至设定电压。触发信号经升压后,触发高压闸流开关管栅极,使之迅速导通。在闸流管导通瞬间,预电离组件中的电容感应出高压,在阴极与预电离之间形成电晕,主放电电极之间的电子密度急剧增长,进而在主电极间形成气体辉光放电,构成均匀激励场。激光脉冲通过谐振腔的选择放大后振荡输出。

预电离组件为轴向管状紫外电晕预电离,总容量为150 pF。紫外光通过气体使气体电离,这种光致

电离的方式与火花针紫外光预电离相比较,最大的优点是结构简单可靠,气体预电离均匀稳定,可以有效提高激光腔体内工作气体的寿命,缺点是预电离强度弱,电光转化效率有限。

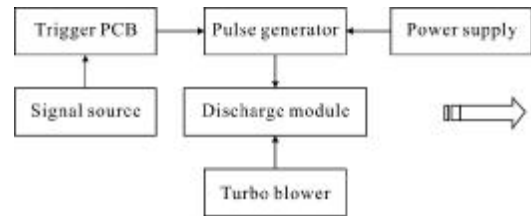


图2 激光器电路框图

Fig.2 Block diagram of compact TEA CO₂ laser system

储能电容为Cs=2 nF,激光电源采用高频开关直流电源,电压范围从0~30 kV连续可调。激光工作气体的混合体积比例选定为CO₂:N₂:He=1:1:4,在工作气压为1×10⁵ Pa条件下,改变输入电压,得到辉光放电电压的范围在15~23 kV。为了延长气体寿命,降低CO₂分子分解造成对气体的破坏,在激光混合气中,加入体积比0.7%的H₂和2.7%的CO作为还原气体。

3 激光器输出实验

3.1 单脉冲输出

激光器充入100 kPa激光混合气体。采用型号为P6015A的高压探头测量了激光器工作气体的辉光放电电压波形,用型号为A1500的罗斯科夫线圈同步测量了18 kV激励电压条件下,气体放电的电流波形。所测得的波形由型号为TEK3032B的数字示波器读取并存储,如图3所示。图中通道1所采集的信号为气体放电电压的波形,通道2所采集的信号为气体放电电流的波形。由图3可知,当高压开关导通约30 ns后,预电离组件中的电容在与主电极阴极之间的感应中迅速充电,这个过程大约为60 ns,电

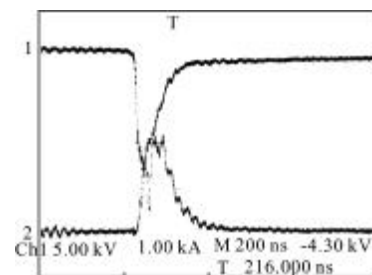


图3 气体辉光放电电流与电压同步波形图

Fig.3 Waveform of current and voltage of gas glow discharge

容充满电后,在约 40 ns 的时间间隔里,能量瞬间释放,预电离组件与主电极阴极之间形成紫外电晕电离空气而产生电子。随着电子密度的增加,主电极形成气体放电,放电电流的峰值约为 3 kA,持续时间近 400 ns。主放电过程中,脉冲形成单元储能电容所蓄积的大部分能量注入主电极之间的气体增益介质,在主电极之间形成气体放电均匀场,如图 3 所示。采用型号为 B74916 的光子牵引探测器测得激光脉冲的半高全宽为 70 ns,脉冲波形如图 4 所示。

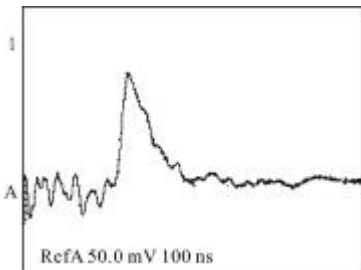


图 4 激光脉冲波形

Fig.4 Waveform of laser pulse

在高压电源输出电压为 20 kV,激光脉冲重复频率为 1 Hz 的条件下,用型号为 molelectron-100 的 CO₂ 激光脉冲能量计测得激光脉冲输出能量约为 15 mJ。调节高压电源的输出电压,分别测得不同放电电压条件下,激光脉冲输出能量的数值,激光脉冲能量与放电电压之间的对应关系及拟合曲线如图 5 所示。随着放电电压的增加,激光脉冲输出能量呈线性增加。在 16.5~21.5 kV 之间,激光脉冲输出能量增长较快。当高压电源输出电压低于 15 kV 时,主电极之间由于压降过低,未能建立气体放电过程。当高压电源输出电压超过 24 kV 时,主电极间的能量密度注入过大,气体放电不稳定,导致主电极局部出现弧光放电。

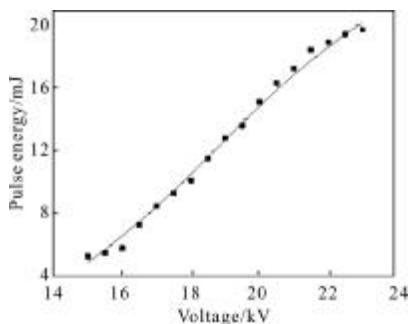


图 5 电压与脉冲输出能量的关系

Fig.5 Pulse energy versus voltage

3.2 重复频率脉冲输出

在放电电压为 20 kV 条件下,开启涡轮增压风机,激光器以 1 kHz 的重复频率运转并输出激光脉冲。为避免高压脉冲放电干扰引起的测量不准确性,实验中将激光光束导入电磁屏蔽测试室直接照射在漫反射靶面上。在距离靶面 150 mm,同时与法线呈 45°位置架设 molelectron-J50 光电探头接收漫反射激光脉冲,并由数字存储示波器 3032B 同步记录激光脉冲时间间隔,进而读取激光脉冲重复频率数据,实验结果如图 6 所示。

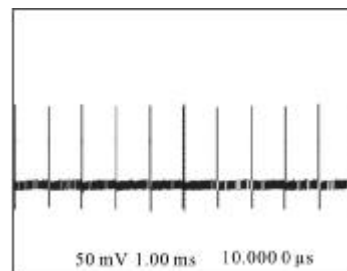


图 6 重复频率激光脉冲波形

Fig.6 Pulse wave shape of repetition rate

为了研究高重复频率气体放电条件下,紧凑腔体(300 mm×300 mm×300 mm)内,强迫冷却及气体置换对激光输出平均功率的影响,实验采用 molelectron-PM300F 型激光功率计分别测试了三种不同条件下的激光脉冲输出功率。条件 A:启动涡轮增压风机,关闭循环冷液机;条件 B:启动涡轮增压风机,开启循环冷液机,冷液机温度设置为 12℃;条件 C:启动涡轮增压风机,开启循环冷液机,冷液机温度设置为 12℃,启动激光混合气体置换系统,气体置换速率为 10 L/min。实验数据的采集的时间间隔为 5 s。三种条件下,激光平均输出功率与激光器运转时间的关系如图 7 所示。

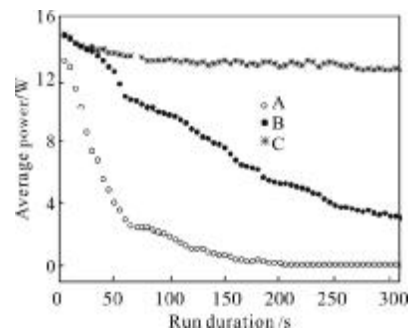


图 7 不同条件下激光输出功率与工作时间的关系

Fig.7 Average power versus run duration on different condition

由图 7 可知,在没有强迫冷却和气体置换条件 A 下,激光输出功率维持不到 10 s 左右,便由于腔内沉积温度过高,工作气体增益减弱而迅速下降,在 40 s 后激光输出功率下降到峰值的 50% 左右,在 60 s 后激光输出功率降至峰值的 20% 左右趋于稳定并持续了约 40 s,在激光器连续工作 100 s 后,CO₂ 分子的分解在不断升高的温度作用下进一步加剧,放电区电子密度减少,破坏了工作气体的放电均匀性而产生弧光放电,激光输出功率趋于 0。在开启了循环冷液机的条件 B 情况下,工作气体温度被强迫冷却,激光输出功率下降的趋势明显减缓,激光器连续工作 150 s 左右,激光输出功率降至峰值的 50%。在持续工作 310 s 后,激光器的输出功率降至峰值的 20%,此时循环冷却液的温度由 12 ℃ 上升到 15 ℃。尽管如此,强迫冷却也并未能消除由 CO₂ 分子的分解引起的激光增益下降。在同时采取强迫冷却和气体置换的条件后,激光器输出功率的稳定性有了明显的提升,在持续工作 310 s 后,激光输出的平均功率仅下降不到 20%。

在适当降低了密封腔体内激光混合气体的压强后,最高循环风速可达 100 m/s 以上,成功实现了重复频率 1.55 kHz 的稳定激光脉冲输出。

4 结 论

小型横向激励大气压 CO₂ 激光器对多种平台有很强的适应性,可以被广泛地应用到目标探测和红外干扰等技术领域。在体积为 300 mm×300 mm×300 mm 的横向激励大气压 CO₂ 激光器中,采用新型涡轮增压风机技术,在一个大气压条件下,最高循环风速超过 100 m/s,激光脉冲输出能量为 15 mJ,激光脉冲输出的半高全宽为 70 ns,激光脉冲的重复频率为 1.5 kHz。为进一步拓展该型激光器实用化前景,在研究中,采用大体积强迫冷却和气体主动置换技术,实现了小型千赫兹重复频率 CO₂ 激光的稳定脉冲输出,采用光栅调谐,可快速准确地实现高重复频

率脉冲 CO₂ 激光器的谱线选支输出。

参考文献:

- [1] Karapuzikov A I. TEA CO₂ laser for long range DIAL lidar [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2000, 41: 77-85.
- [2] Wouter Kiopper, Kalina Bagrova, Johan du Pisanie, et al. Short-cavity high-repetition-rate CO₂ laser [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(9): 2866-2869.
- [3] Katsumi Midorikawa, Hidekazu Hatanaka, Minoru Obarat S, et al. A 1 kHz repetition-rate 500 W CO₂ TEA laser employing solid-state pulse power conditioning [J]. *Meas Sci Technol*, 1993, 4: 388-391.
- [4] Levatter J I. High repetition rate, uniform volume transverse electric discharger laser with pulse triggered multi-arc channel switching [P]. US: 4498183, 1985-06-18.
- [5] Hou Tianjin, Jiang Dong, Zheng Congzong, et al. Study on mini high repetition frequency (HRF) TEA CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 1996, 20(6): 346-348. (in Chinese)
侯天晋, 江东, 郑从众, 等. 小型高重复频率 TEA CO₂ 激光器的研究[J]. *激光技术*, 1996, 20(6): 346-348.
- [6] Cheng Yongqiang, Tan Rongqing, Zheng Yijun, et al. Rapidly tunable experiment of grating line selectable TEA CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 635-638. (in Chinese)
程永强, 谭荣清, 郑义军, 等. 光栅选线 TEA CO₂ 激光快速调谐实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5): 635-638.
- [7] Liu Xiaoqin, Zhang Yinchao, Hu Huanling, et al. Remotmonitoring of sulfur dioxide using a mobile lidar system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 151-154. (in Chinese)
刘小勤, 张寅超, 胡欢陵, 等. 用车载差分吸收激光雷达系统遥测二氧化硫[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(2): 151-154.
- [8] Wang Ying, Huang Weilin. Research on stability and gas-exchange rate of TEA CO₂ laser [J]. *Laser Technology*, 1996, 20(1): 44-45. (in Chinese)
王英, 黄维玲. TEA CO₂ 激光器换气速率与稳定性研究[J]. *激光技术*, 1996, 20(1): 44-45.