

紧凑型波长自动调谐脉冲CO₂激光器

潘其坤 苗昉晨 司红利 沈辉 高飞 于德洋 张阔 张冉冉 赵崇霄 陈飞 郭劲

Compact pulsed CO₂ laser with wavelength automatic tuning

PAN Qi-kun, MIAO Fang-chen, SI Hong-Li, SHEN Hui, GAO Fei, YU De-Yang, ZHANG Kuo, ZHANG Ran-ran, ZHAO Chong-Xiao, CHEN Fei, GUO Jin

引用本文:

潘其坤, 苗昉晨, 司红利, 沈辉, 高飞, 于德洋, 张阔, 张冉冉, 赵崇霄, 陈飞, 郭劲. 紧凑型波长自动调谐脉冲CO₂激光器[J]. *中国光学*, 2022, 15(5): 1007–1012. doi: 10.37188/CO.2022-0107

PAN Qi-kun, MIAO Fang-chen, SI Hong-Li, SHEN Hui, GAO Fei, YU De-Yang, ZHANG Kuo, ZHANG Ran-ran, ZHAO Chong-Xiao, CHEN Fei, GUO Jin. Compact pulsed CO₂ laser with wavelength automatic tuning[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1007-1012. doi: 10.37188/CO.2022-0107

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声光偏转快调谐脉冲CO₂激光器实验研究

Experimental research on acousto-optic deflection rapid tuning pulsed CO₂ lasers

中国光学. 2019, 12(2): 355 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0355>

紧凑型准连续泵浦调Q Nd:YAG激光器

Compact quasi continuous pumped Nd: YAG Q-switched solid laser

中国光学. 2019, 12(2): 413 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0413>

结构紧凑的双波长连续波掺铒光纤激光器

Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser

中国光学. 2019, 12(4): 810 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0810>

基于SESAM被动调Q的激光二极管泵浦Yb:CaYAlO₄脉冲激光器

Output characteristics of diode-pumped passively Q-switched Yb: CaYAlO₄ pulsed laser based on a SESAM

中国光学. 2019, 12(1): 167 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0167>

高功率激光装备小型化轻量化技术

Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment

中国光学. 2017, 10(3): 321 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0321>

连续激光辐照下的TiO₂薄膜热传导性质

Heat conduction properties of TiO₂ films irradiated by a continuous laser

中国光学. 2019, 12(3): 628 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0628>

文章编号 2097-1842(2022)05-1007-06

紧凑型波长自动调谐脉冲 CO₂ 激光器

潘其坤^{1*}, 苗昉晨², 司红利³, 沈 辉¹, 高 飞⁴, 于德洋¹,
张 阔¹, 张冉冉¹, 赵崇霄¹, 陈 飞¹, 郭 劲¹

(1. 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;

2. 工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510000;

3. 火箭军装备部驻哈尔滨地区军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150028;

4. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原, 030006)

摘要:面向机载激光差分吸收雷达对小型轻量化激光光源的应用需求, 研制了紧凑型自动调谐脉冲 CO₂ 激光器。首先, 研究了射频波导腔内光束和自由空间光学斩波光束孔径匹配关系, 设计了具有实焦点的腔内光束变换系统, 实验验证了斩波器通光孔径对激光脉冲波形的影响。其次, 研究了 CO₂ 激光器的波长调谐特性, 分析了相邻激光谱线光栅衍射角度差, 并基于高精度电动转台和金属闪耀光栅, 实现了 CO₂ 激光器波长自动调谐输出。最后, 基于小型轻量化模块设计, 完成了紧凑型自动调谐脉冲 CO₂ 激光器集成。实验结果表明, 该激光器在 1 kHz 条件下运转稳定, 脉冲宽度为 350 ns, 峰值功率为 3.7 kW, 在 9.2~10.7 μm 范围内测试到 30 条激光谱线, 重量为 18 kg, 本文研究为机载激光差分吸收雷达提供了一种小型化探测光源。

关键词: CO₂ 激光器; 机械调 Q; 波长自动调谐; 小型化集成

中图分类号: TN248.5 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0107

Compact pulsed CO₂ laser with wavelength automatic tuning

PAN Qi-kun^{1*}, MIAO Fang-chen², SI Hong-Li³, SHEN Hui¹, GAO Fei⁴, YU De-Yang¹, ZHANG Kuo¹,
ZHANG Ran-ran¹, ZHAO Chong-Xiao¹, CHEN Fei¹, GUO Jin¹

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and
Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *The Fifth Electronic Research Institute of MIIT, Guangzhou 510000, China;*

3. *Rocket Army Equipment Department Military Representative Office in Harbin, Harbin 150028, China;*

4. *North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)*

* *Corresponding author, E-mail: panqikun2005@163.com*

Abstract: In order to meet the application requirements of airborne laser differential absorption lidar for

收稿日期: 2022-05-28; 修订日期: 2022-06-27

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2018YFE0203200); 吉林省与中科院科技合作项目 (No. 2021SYHZ0028); 激光与物质相互作用国家重点实验室基金项目 (No. SKLLIM1914, SKLLIM2114); 中国科学院青年创新促进会 (No. 2021216)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFE0203200); Science and Technology Cooperation Project between Jilin Province and Chinese Academy of Sciences (No. 2021SYHZ0028); State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter Project (No. SKLLIM1914, SKLLIM2114); Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. 2021216)

small and lightweight light sources, a compact pulsed CO₂ laser is developed with automatic wavelength tuning. First, the aperture matching relationship between an RF waveguide intracavity beam and a free space optical chopper beam was studied, and a beam conversion system was designed with real focus on the intracavity. The influence of the chopper aperture on a laser pulse waveform was verified experimentally. Secondly, the wavelength tuning characteristics of CO₂ laser were studied, and the diffraction angle difference between adjacent laser spectral lines was analyzed. Tunable operation in the CO₂ laser was realized using a high-precision electric turntable and metal blazed grating. Finally, the integration of a compact automatic tuning pulsed CO₂ laser was completed using small lightweight modules. Experimental results indicate that the laser operates stably at 1 kHz with a pulse width of 350 ns and a peak power of 3.7 kW. There are 30 lines within 9.2~10.7 μm waveband. The total weight of the laser is 18 kg. It provides a miniaturized detection light source for airborne laser differential absorption lidar.

Key words: CO₂ laser; mechanical *Q*-switch; wavelength automatic tuning; miniaturization integration

1 引言

脉冲 CO₂ 激光器具有输出功率高、光谱纯度高、脉宽易调制等优点,在超精密光学材料加工、激光刻蚀、强场激光物理等领域发挥重要作用^[1-6]。同时 CO₂ 激光器在 9~11 μm 范围内拥有极为丰富的谱线输出,覆盖了多种气体的吸收峰,可调谐脉冲 CO₂ 激光器在激光差分吸收雷达领域备受关注^[7-11]。

应用于激光差分吸收雷达的激光器要求同轴输出两个不同波长的激光,一个波长的激光与待测气体吸收峰一致,另一个波长的激光偏离待测气体吸收区,通过差分处理双波长激光的回波信号,获得待测气体的浓度信息。Ruan 等报道了一种基于双声光调制器的快调谐脉冲 CO₂ 激光器,获得了调谐时间小于 1 ms 的双波长 CO₂ 激光输出^[8]。Tehrani 等基于两台波长调谐范围为 9.2~10.8 μm 的可调谐脉冲 TEA CO₂ 激光器,搭建了车载探测化学战剂的激光雷达系统,体积为 7 m×2.5 m×3 m,探测距离达到了 1 km^[9]。Avishekh 等基于平均功率为 1 W 的连续 CO₂ 激光器,实现了 9.7~11.2 μm 的波长调谐范围,搭建了探测三过氧化三丙酮气体的激光雷达装置,工作距离为 0.1 km^[10]。Karapuzikov 等基于可调谐 TEA CO₂ 激光器,搭建了直升机搭载的激光差分吸收雷达探测设备,系统体积为 500 mm×600 mm×700 mm,功耗为 1 kW,实现了 1 km 的探测距离^[11]。

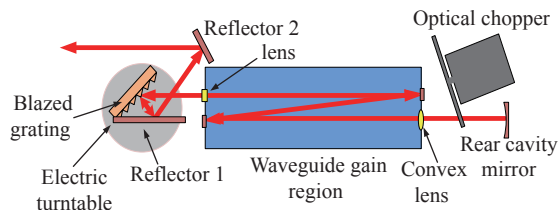
运用 CO₂ 激光差分吸收雷达探测有毒害气

体时,稍有不慎就会对操作人员造成伤害^[12]。无人机搭载激光雷达系统避免了人员接触,被广泛应用于复杂环境下的探测作业^[13-14],无人机载 CO₂ 激光差分吸收雷达是远程探测有毒害气体的最佳方法之一。目前已报道的 CO₂ 激光差分吸收雷达系统受 CO₂ 激光器体积大、功耗高、峰值功率低等条件限制,难以满足无人机载应用需求。紧凑型、低功耗、自动调谐脉冲 CO₂ 激光器在新应用需求牵引下将成为研究热点。

本文基于低功耗机械调 *Q* 技术和小型化高精度转台驱动光栅调谐技术,研制了一台小型轻量化的自动调谐脉冲 CO₂ 激光器样机,实现了射频波导腔和自由空间光学斩波器的光束匹配,有效提升了 CO₂ 激光器的输出性能。

2 实验装置

面向应用需求,本文设计的自动调谐脉冲 CO₂ 激光器在考虑系统体积、重量和功耗的同时兼顾激光器脉冲输出特性。实验装置原理示意如图 1 所示,其由波长自动调谐、波导增益、脉冲调制 3 个模块组成。金属原刻光栅为波长自动调谐核心元件,光栅常数为 10 μm,光栅闪耀角为 31.97°,闪耀波长为 10.59 μm。光栅工作在一级振荡,零级输出的工作模式,1 级衍射效率为 70%。在旋转光栅调谐激光波长过程中,光栅零级输出角度随之改变,为此,采用了角反射器原理,即金属闪耀光栅与反射镜 1 构成角反射器随电动转台一起旋转,确保在激光器波长自动调谐过程中输

图1 可调谐脉冲 CO₂ 激光器原理示意图Fig. 1 Schematic diagram of a tunable pulsed CO₂ laser

出激光角度恒定。

相比于直流激励 CO₂ 激光管,射频激励波导 CO₂ 激光管工作气压高、增益大、可风冷散热,电光效率高,为激光器系统小型化提供了条件。本文采用了平均功率为 30 W 的射频波导 CO₂ 激光管,射频调制频率为 100 kHz。为了适应全外腔应用,对其两端的谐振腔镜进行改造,靠近光栅端的输出镜更换为高透的 ZnSe 平面窗口镜,靠近光学斩波器的后反射镜更换为高透的 ZnSe 凸透镜。

脉冲调制模块用于对激光器 Q 值进行调控,实现激光器高峰值功率、短脉冲宽度输出。声光调制^[15]和电光调制^[16]具有良好的脉冲调制效果,但其功耗高、驱动电压高、散热困难,不利于系统小型化设计。本项目采用了低功耗的光学斩波器作为脉冲调制器件。由于光学斩波器的斩波扇转动速度低,因此,如何优化光束直径,提升斩波扇在腔内光束上的渡越时间至关重要。本文用于密封射频波导激光器的凸透镜和后反射镜组成光束变换系统,凸透镜的焦距与后反射镜球心重合,斩波扇位于凸透镜焦平面上,既提升了自由空间光束与射频波导腔的匹配度,保障了光束的自再现传输,又压缩了斩波扇在光束上的渡越时间,改善了激光器脉冲调制特性。由后反射镜、凸透镜、光栅组成稳定的光学谐振腔系统,有效提升了复杂环境下激光器系统的功率稳定性。

3 实验结果

首先研究了射频激励波导 CO₂ 激光器的机械调 Q 性能,此时采用了透射率为 30% 的 ZnSe 平面镜代替金属闪耀光栅作为激光器输出镜,其透射率与金属闪耀光栅的零级衍射效率接近。光学斩波器的电机最大转速为 100 r/s,斩波扇面上的开孔数量为 10,此时光学斩波器的最

大调制频率为 1 kHz。斩波扇面上的通光直径对激光器调 Q 性能影响显著。为了研究斩波扇上通光直径与腔内光束直径的匹配关系,加工了通光孔径分别为 0.4 mm、0.8 mm、1.2 mm 的斩波扇叶,实验研究了它们的脉冲调制特性。不同通光孔径下的激光输出平均功率如图 2 所示,射频调制频率设定为 20 kHz,斩波器工作频率为 1 kHz。

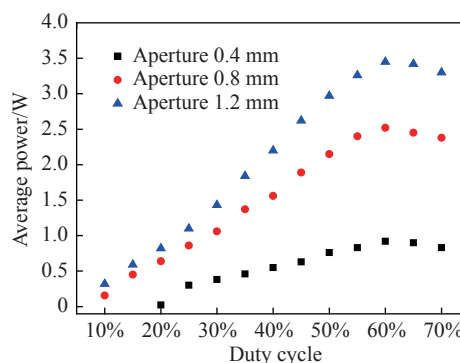


图2 脉冲 CO₂ 激光平均功率随射频激励占空比变化关系
Fig. 2 Relationship between the average power of a pulsed CO₂ laser and the RF excitation duty cycle

如图 2 所示,在相同斩波扇孔径条件下,随着射频调制占空比的增加,激光平均功率先呈线性增加,即注入射频功率越高,激光输出平均功率越高。但当射频占空比大于 60% 以后,激光器平均功率开始略微下降,这是由于激光上能级寿命与斩波器工作频率不匹配造成的。由于光学斩波器的重复频率偏低,更多的注入功率也无法积累更多的激光增益,这决定了 1 kHz 条件下激光平均功率不会随着占空比的增加无限增加。同时,随着占空比的提升,风冷的射频放电管的热效应逐渐显著,也将导致激光器的平均输出功率下降。在相同的射频占空比和激光重复频率条件下,随着通光孔径的增加,激光平均功率显著增加,导致这一情况最直接的原因是随着通光孔径的增大,插入损耗逐渐降低。斩波扇的通光孔径还将显著影响激光脉冲波形,采用 HgCdTe 光电探测器测试不同通光孔径下的激光脉冲波形,如图 3 所示。

由图 3 可知,由于斩波扇转速相同,获得的激光脉冲具有相似的陡峭的前沿波形。在通光孔径分别为 0.4 mm、0.8 mm、1.2 mm 时,测试的激光脉冲全波半高宽分别为 330 ns, 350 ns, 380 ns。

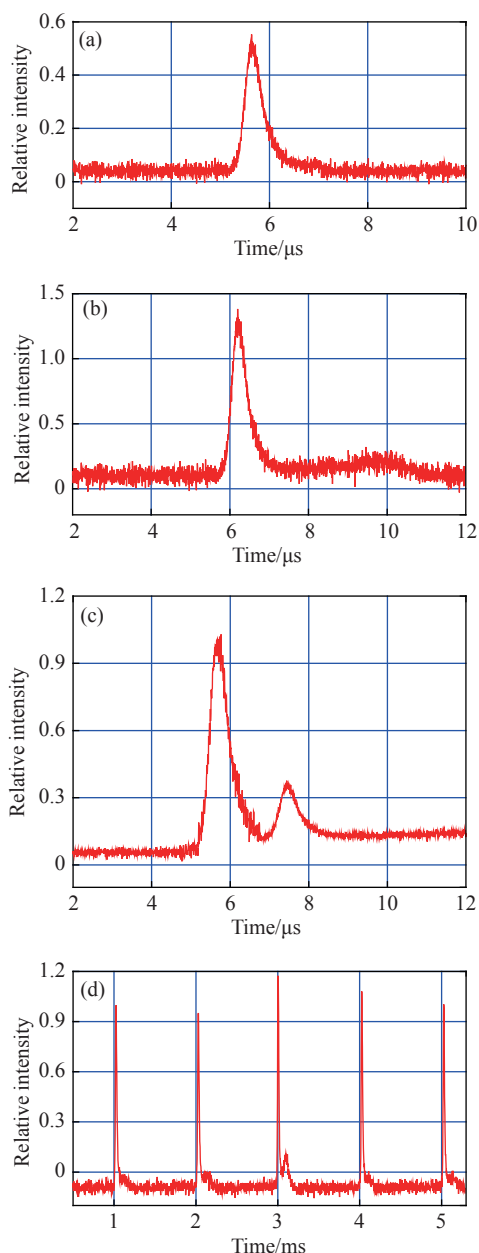


图 3 采用不同通光孔径斩波扇机械调 Q 获得的 CO_2 激光脉冲波形: (a) 0.4 mm, (b) 0.8 mm, (c) 1.2 mm。 (d) 0.8 mm 孔径 1 kHz 脉冲串波形

Fig. 3 CO_2 pulse waveforms obtained by mechanical Q -switching of chopper fans with different optical apertures. (a) 0.4 mm, (b) 0.8 mm, (c) 1.2 mm. (d) Pulse train at 1 kHz with slits width of 0.8 mm

随着斩波扇通光孔径的增大, 激光脉冲后沿拖尾越发的严重, 在通光孔径为 1.2 mm 时, 激光脉冲不仅拖尾严重、还出现了二次峰, 这是 CO_2 激光器调 Q 器件响应慢的典型特征。综合分析机械调 Q CO_2 激光器输出平均功率和脉冲波形可知, 当斩波扇的通光孔径为 0.8 mm 时与腔内光束匹配较好, CO_2 激光器的脉冲峰值功率达到 6.6 kW。

在通光孔径为 0.8 mm、重复频率为 1 kHz 时的多重脉冲波形如图 3(d) 所示。由图 3(d) 可知机械斩波扇在高速旋转过程中的机械振动是引发脉冲幅值抖动的主要因素。

在机械调 Q 脉冲 CO_2 激光器研究基础上, 基于通光孔径为 0.8 mm 的斩波扇叶进行腔内激光脉冲调制, 对 CO_2 激光器波长自动调谐性能进行了研究。依据光栅方程^[7], 计算可得 CO_2 激光器相邻工作波长的入射角相差约 0.07° 。据此, 选择了小型轻量化、高精度的电动转台作为驱动光栅旋转器件, 如图 4 所示。电动转台闭环分辨率为 0.001° , 闭环重复定位精度为 $\pm 0.002^\circ$, 尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 电动转台开机具有自动寻找物理零点的功能。

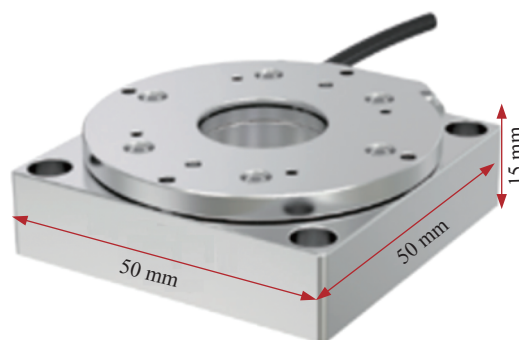


图 4 小型、轻量化高精度电动转台

Fig. 4 Small lightweight high precision electric turntable

采用 CO_2 激光谱线分析仪测试了机械调 Q 脉冲 CO_2 激光器的输出谱线, 结果如图 5 所示。在 $9.2 \sim 10.7 \mu\text{m}$ 范围内共测试到 30 条激光谱线, 其中, 10P 支激光谱线为 10 条, 最高平均功率为 $1.3 \text{ W}@10.59 \mu\text{m}$, 峰值功率为 3.7 kW。值得关注的是, 从 10P 支谱线到 9R 支谱线, 激光平均功率呈近似线性下降, 明显与 CO_2 激光增益谱分布不匹配, 导致该现象的主要原因有: (1) 金属闪耀光栅、射频波导管密封窗设计的最佳工作波长为 $10.59 \mu\text{m}$, 谐振腔光学元件在其他波段的插入损耗较大; (2) 激光器在波长 $10.59 \mu\text{m}$ 处进行装调, 转台的重复定位偏差将引入方位方向谐振腔失调, 转台旋转平台平行度偏差将引入俯仰方向谐振腔失调, 且谐振腔失调量将随电动转台旋转角度增大而逐渐累积。通过优化设计闪耀光栅和射频波导管密封窗口工作波长, 并引入俯仰、方位角度闭环校正装置补偿转台旋转导致的谐振腔

失调,有望获得更多的 CO₂ 激光输出谱线,并提升 9P、9R 支激光谱线输出功率。

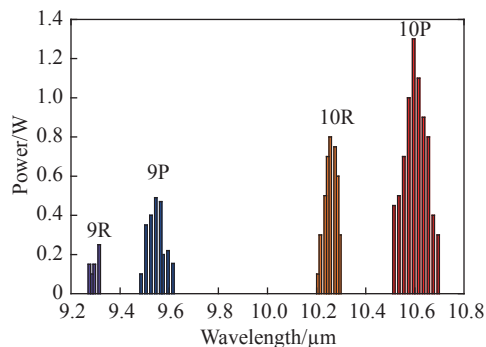


图5 机械调 Q 脉冲 CO₂ 激光器输出谱线

Fig. 5 Output spectrum of mechanical Q-switched pulsed CO₂ lasers

面向无人机载激光差分雷达应用需求,在波长自动调谐、射频波导管和脉冲调制 3 个模块方案设计和器件选型时兼顾小型轻量化需求,提升了自动调谐脉冲 CO₂ 激光器的小型化系统集成潜力。激光器一体化底板采用镂空的高硬度铝合金材料,加强底板强度有利于提升激光器在复杂环境条件下的工作稳定性。激光器内光学元件均采用了轻质铝合金材料的一体化镜架,实现了光学元件的稳定、可靠支撑。紧凑型自动调谐脉冲 CO₂ 激光器实物如图 6 所示,重量为 18 kg,耗电功率 ≤ 200 W。

参考文献:

- [1] CAO ZH, WEI CH Y, CHENG X, *et al.*. Ground fused silica processed by combined chemical etching and CO₂ laser polishing with super-smooth surface and high damage resistance[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(21): 6014-6017.
- [2] 高月娟, 陈飞, 潘其坤, 等. 用于超短脉冲 CO₂ 激光的半导体光开关理论建模与数值分析[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 577-585.
GAO Y J, CHEN F, PAN Q K, *et al.*. Modeling and numerical simulation of a semiconductor switching device applied in an ultra-short pulse CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 577-585. (in Chinese)
- [3] 袁志国, 马修真, 刘晓楠, 等. 利用可调谐激光吸收光谱技术的柴油机排放温度测试研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 281-289.
YUAN ZH G, MA X ZH, LIU X N, *et al.*. Testing on diesel engine emission temperature using tunable laser absorption spectroscopy technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 281-289. (in Chinese)
- [4] FAN S Y, HEALY N. CO₂ laser-based side-polishing of silica optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(15): 4128-4131.
- [5] HE T, WEI CH Y, JIANG ZH G, *et al.*. Numerical model and experimental demonstration of high precision ablation of pulse CO₂ laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(4): 041401.
- [6] POLYANSKIY M N, POGORELSKY I V, BABZIEN M, *et al.*. Demonstration of a 2 ps, 5 TW peak power, long-wave infrared laser based on chirped-pulse amplification with mixed-isotope CO₂ amplifiers[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(3): 459-472.

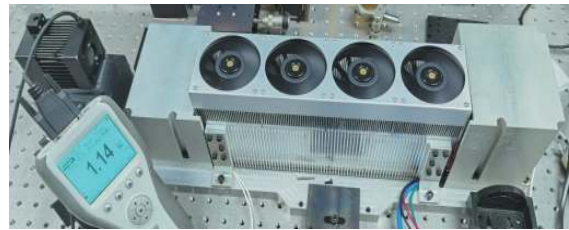


图6 紧凑型波长自动调谐脉冲 CO₂ 激光器实物图

Fig. 6 Photo of compact pulsed CO₂ laser with wavelength automatic tuning

4 结 论

本文面向机载激光差分吸收雷达对可调谐脉冲 CO₂ 激光器的应用需求,研制了机械调 Q、电动转台驱动光栅旋转波长自动调谐的脉冲 CO₂ 激光器,介绍了可自动调谐脉冲 CO₂ 激光器的结构和工作原理。其次,研究了不同通光孔径斩波扇对激光脉冲波形的影响,获得了脉冲波形良好的短脉冲激光输出。然后,研究了激光器自动波长调谐特性,分析了 9P、9R 支激光谱线功率偏低的原因和后续提升 9P、9R 支激光谱线功率的方法。最后,进行了紧凑型波长自动调谐脉冲 CO₂ 激光器系统集成。实验结果显示:激光器脉冲宽度为 350 ns,峰值功率为 3.7 kW,波长调谐范围为 9.2~10.7 μm,重量为 18 kg,电功耗为 200 W,基本满足机载激光差分吸收雷达的应用要求。

- [7] 曾庆栋, 袁梦甜, 朱志恒, 等. 便携式激光诱导击穿光谱最新研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 470-486.
ZENG Q D, YUAN M T, ZHU ZH H, *et al.*. Research progress on portable laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 470-486. (in Chinese)
- [8] RUAN P, PAN Q K, XIE J J, *et al.*. Rapidly tunable pulsed CO₂ laser based on acoustic-optic modulator[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 92: 299-303.
- [9] TEHRANI M K, MOHAMMAD M M, JAAFARI E, *et al.*. Setting up a mobile Lidar (DIAL) system for detecting chemical warfare agents[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(3): 035701.
- [10] PAL A, CLARK C D, SIGMAN M, *et al.*. Differential absorption lidar CO₂ laser system for remote sensing of TATP related gases[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): B145-B150.
- [11] KARAPUZIKOV A I, PTASHNIK I V, SHERSTOV I V, *et al.*. Modeling of helicopter-borne tunable TEA CO₂ DIAL system employment for detection of methane and ammonia leakages[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2000, 41(2): 87-96.
- [12] SZINICZ L. History of chemical and biological warfare agents[J]. *Toxicology*, 2005, 214(3): 167-181.
- [13] BANDINI F, SUNDING T P, LINDE J, *et al.*. Unmanned Aerial System (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: comparison of radar altimetry, LIDAR and photogrammetry techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111487.
- [14] PODOSKI J H, SMITH T D, FINNEGAN D C, *et al.*. Unmanned aerial system lidar survey of two breakwaters in the Hawaiian islands[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2018, 1(36): 23.
- [15] XIE J J, PAN Q K, GUO R H, *et al.*. Dynamical analysis of acousto-optically Q-switched CO₂ laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2): 159-164.
- [16] ZHANG Y CH, TIAN ZH SH, SUN ZH H, *et al.*. Study of frequency stabilization for electro-optical Q-switched radio-frequency-excited waveguide CO₂ laser using build-up time method[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(16): 3732-3736.
- [17] 潘其坤, 陈飞, 石宁宁, 等. 声光调Q CO₂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 CO₂ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0705002. (in Chinese)

作者简介:



潘其坤(1985—),男,河南开封人,博士,副研究员,中国科学院青年创新促进会会员,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事中长波激光器及激光等离子体极紫外光源方面的研究。E-mail: panqikun2005@163.com