

# 端面抽运人眼安全内腔式光参量振荡器

李 莉 卢常勇 刘 旭 陈 霞 朱孟真 张 玺 付东浩 王 博 李 哲

武汉军械士官学校,湖北 武汉 430075

**摘要** 采用脉冲激光二极管端面抽运技术开展了被动调 Q 人眼安全内腔式光参量振荡器的实验研究,研究了在浓度一定的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  调 Q 晶体下,基频光和信号光的输出能量和抽运阈值与输出镜透射率的关系,获得了输出能量 8.5 mJ,脉冲宽度 2 ns,发散角 8 mrad,重复频率 20 Hz 的人眼安全激光输出,光光转换效率 6%。

**关键词** 激光器;光参量振荡器;人眼安全;端面抽运

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s214011

## End-Pumped Eyesafe Intracavity Optical Parametric Oscillator

Li Li Lu Changyong Liu Xu Chen Xia Zhu Menzheng Zhang Xi

Fu Donghao Wang Bo Li Zhe

Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officer Academy, Wuhan, Hubei 430075, China

**Abstract** A passively Q-switched eye-safe intracavity optical parametric oscillator, end-pumped by a pulsed laser diode array, is studied experimentally. The output energy and threshold of the pump wavelength and the signal wavelength with respect to the transmission of output mirror are analyzed at the same  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  saturable absorber. The output energy of 8.5 mJ and the pulse width of 2 ns at the eye-safe wavelength are obtained with the repetition rate of 20 Hz, giving the optical-optical conversion efficiency of about 6% from diode power at 808 nm to optical parametric oscillator (OPO) signal output.

**Key words** lasers; optical parametric oscillator; eye-safe; end-pumped

**OCIS codes** 140.3518; 140.3430; 140.3410

## 1 引 言

1.5  $\mu\text{m}$  激光由于具有人眼安全和处于大气窗口等优点已经成为新一代固体激光测距机的首选波长<sup>[1-3]</sup>。对于激光测距机而言,通常要求其激光器输出峰值功率达兆瓦量级,同时要求体积小、重量轻、效率高、可靠性好。相比于传统氙灯抽运人眼安全固体激光器<sup>[4-7]</sup>,采用二极管抽运的内腔式光参量振荡器(KTP-OPO)具有效率高、全固态、结构紧凑和可靠性好等优点,特别适合作为新一代人眼安全激光测距机的激光发射器。

目前,该类型激光器主要采用脉冲激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 晶体,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体被动调 Q 和传导冷却结构<sup>[8-10]</sup>,该结构易获得较大能量激光输出,但输出光束质量通常较差。其次,考虑到晶体的实际散热问题,侧面抽运结构难以同时实现晶体的均匀抽运和均匀散热。再次,由于抽运源和激光晶体紧密耦合,造成维护更换困难。而在端面抽运结构中,由于抽运光是沿晶体轴线方向入射,因此只需选取一定长度的激光晶体并适当调节抽运光斑的大小就可以同时兼顾光束质量、输出能量和效率。同时由于抽运光是通过光纤耦合至晶体端面,故激光晶体可以实现侧面均匀散热,且这种抽运源和激光晶体分离的结构易于维修更换,更适合实际工程应用。但端面抽运内腔式 KTP-OPO 通常采用连续激光二极管作为抽运源,通过声光调 Q 技术获得高重频脉冲输出,存在输出单脉冲能量小,峰值功率低等问题<sup>[11-12]</sup>。

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改稿日期: 2015-05-29

基金项目: 国防科技预研基金(51302010206)

作者简介: 李 莉(1981—),女,硕士,讲师,主要从事光电技术工程应用方面的研究工作。E-mail:327349481@qq.com

为有效结合两种抽运方式各自的优点,本文在端面抽运内腔式 KTP-OPO 结构上创新采用高峰值功率脉冲激光二极管作为抽运源,通过  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体被动调 Q,获得了输出能量 8.5 mJ,脉冲宽度 2 ns,发散角 8 mrad,重复频率 20 Hz 的人眼安全激光输出,光光转换效率 6%。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,抽运源为 Dilas 公司生产的 808 nm 高功率光纤耦合脉冲激光二极管,光纤芯径 800  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.22,最大峰值功率 1000 W。在本实验中,抽运脉宽固定 250  $\mu\text{s}$ ,对应最大单脉冲抽运能量 250 mJ。抽运光通过 1:3 的耦合透镜组入射至 Nd:YAG 晶体端面,Nd:YAG 晶体直径 5 mm,长度 10 mm,掺杂摩尔分数为 1%,其端面  $M_1$  镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反膜作为 1064 nm 基频光的平面全反镜,另一端面镀 1064 nm 增透膜,OPO 的工作介质为 II 类非临界相位匹配的 KTP 晶体( $x$  轴切割, $\varphi=0^\circ,\theta=90^\circ$ ),尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 20 mm,两端面均镀有 1064 nm 和 1570 nm 双增透膜,OPO 平面输入镜  $M_2$  镀 1064 nm 增透膜和 1570 nm 全反膜,OPO 平面输出镜  $M_3$  镀 1064 nm 全反膜和 1570 nm 半反膜。这样就由  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$  构成了一个典型的内腔式 OPO 结构,其中, $M_1$  和  $M_3$  构成了 1064 nm 基频光谱谐振腔, $M_2$  和  $M_3$  构成了 1570 nm 信号光谱谐振腔。被动调 Q 晶体为初始透射率为 10% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  可饱和吸收体,两端面镀有 1064 nm 增透膜。

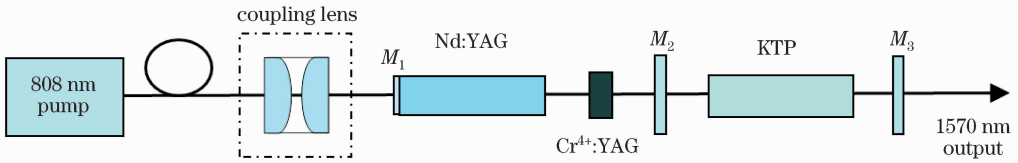


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

实验中 Nd:YAG 晶体和抽运二极管固定在半导体主动制冷的金属热沉上,温度稳定在  $20\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。采用 EPM1000 型激光功率/能量计监测激光能量输出,基频光及信号光脉宽分别采用 Si、Ge 光电探头和 TEK-TDS3052 型 500 MHz 示波器进行测量,LBA-700PC-D 型光束质量分析仪监测信号光光场分布。

## 3 实验结果与分析

实验研究了无 OPO 情况下基频光的被动调 Q 输出性能,将图 1 上的 OPO 组件( $M_2$ 、 $M_3$  和 KTP)更换为不同透射率的 1064 nm 平面输出镜,在腔长 50 mm 的条件分别测量了 1064 nm 基频光的动态输出能量和对应的阈值抽运能量,结果如图 2 所示。

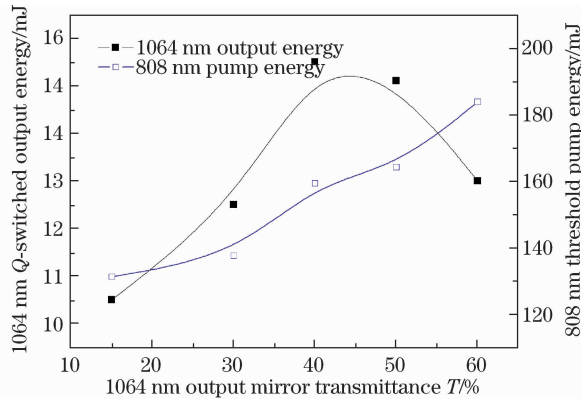


图 2 基频光输出能量和阈值随输出镜透射率的变化曲线

Fig. 2 Output energy at 1064 nm and corresponding threshold with respect to the transmission of output mirror

从图 2 可以看出,随着输出镜透射率的增加,谐振腔损耗变大,导致阈值能量逐渐增加。在透射率  $T=40\%$  左右时基频光输出能量达到最大,约为 15.5 mJ,此时对应 808 nm 抽运阈值能量约为 160 mJ,光光转换

效率 9.7%。图 3 为  $T=40\%$  时基频光的输出脉冲波形,半峰全宽为 3.8 ns,并未出现被动调 Q 激光器常见的横模拍频现象和多脉冲现象<sup>[13]</sup>,这是由于本实验采用光纤耦合端面抽运方式,相比于侧面抽运其增益分布相对均匀,这就很大程度上避免了由于增益分布不均匀引起被动 Q 开关横截面内各点打开时间不尽相同带来的多脉冲现象。同时由于腔菲涅耳数较小,激光器工作于低阶模状态,进一步减少了不同横模间的拍频现象。

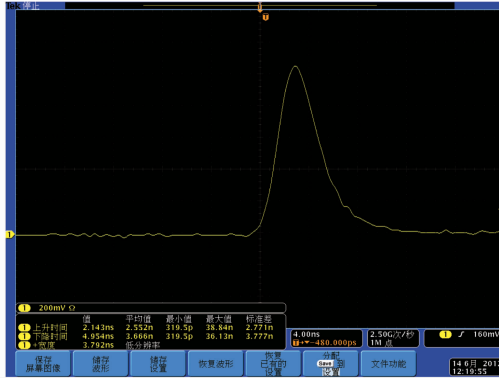


图 3 1064 nm 基频光输出脉冲波形

Fig. 3 Waveform of the pump pulse at 1064 nm

在腔内插入 OPO 组件,如图 1 所示,基频光腔长 100 mm,OPO 腔长 50 mm。通过改变 OPO 平面输出镜 M3 的信号光透射率,分别测量了在不同透射率下 1570 nm 信号光的输出能量及抽运阈值,结果如图 4 所示。

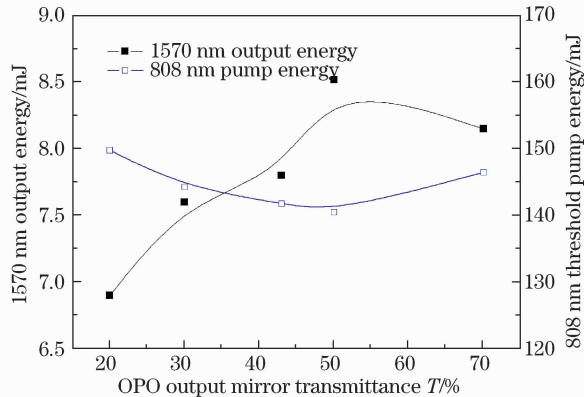


图 4 信号光输出能量和阈值随输出镜透射率的变化曲线

Fig. 4 Output energy at 1570 nm and corresponding threshold with respect to the transmission of output mirror

实验发现,随着输出镜 M3 透射率的增加,1570 nm 信号光的阈值变化不大,这主要是由于在被动调 Q 内腔式 OPO 中,信号光振荡是建立在基频光振荡的基础上,由于输出镜 M3 镀的是 1064 nm 全反膜,因此在腔长一定条件下谐振腔阈值主要取决于  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的初始透射率,而与 1570 nm 信号光的透射率关系不大。但信号光输出能量随其透射率变化较明显,在  $T=50\%$  附近时输出能量达到最大,约为 8.52 mJ,此时对应 808 nm 阈值抽运能量约为 140 mJ,光光转换效率达 6%,从 1064 nm 基频光到 1570 信号光的转换效率为 55%。图 5 为  $T=50\%$  时信号光的输出脉冲波形,半峰全宽约为 2 ns 左右。

从图 5 上可以明显看到,信号光波形在主脉冲后出现了一个明显的尾脉冲,该现象在被动调 Q 内腔 OPO 中比较常见,有不少的文献论述<sup>[14-15]</sup>,理论和实验都表明,通过增加信号光透射率或降低腔内基频光功率密度都可以有效改善该现象。这是因为在内腔 OPO 中,对于一定浓度的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ,腔内基频光功率密度是确定的,而信号光起振阈值主要由输出镜反射率决定,反射率越高,阈值越低。当腔内基频光功率密度高于信号光起振阈值时,在形成一个信号光主脉冲后,腔内剩余基频光功率密度有可能再次超过信号光起振阈值,导致再次产生信号脉冲,形成尾脉冲现象。此外,由于  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体属于慢恢复可饱和吸收体,

漂白后激发态寿命较长,也易于导致该现象。

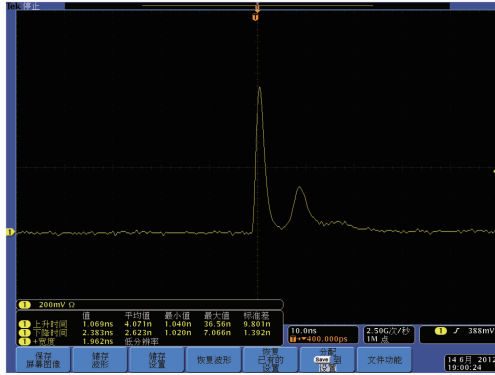


图 5 1570 nm 信号光输出脉冲波形

Fig. 5 Waveform of the signal pulse at 1570 nm

图 6 为监测到的信号光远场光场分布,可以看出远场只有一个主峰,近似高斯分布,能量较集中,通过套孔法测得的信号光发散角约为 8 mrad。

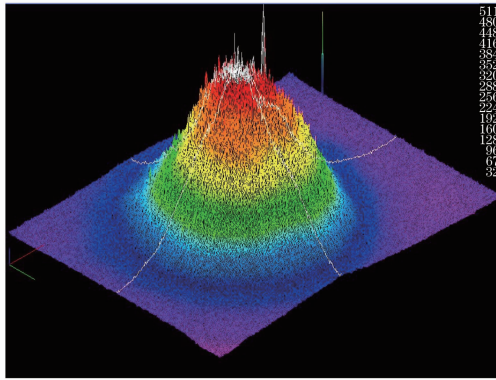


图 6 信号光脉冲远场的光场分布

Fig. 6 Far field distribution of the signal output pulse

激光器以 20 Hz 的重复频率连续工作 50 s,用能量计记录下每个脉冲的能量,以考察信号光输出能量的稳定性,结果如图 7 所示。图 7 中的能量最大值为 8.76 mJ,最小 8.14 mJ,平均 8.43 mJ,能量稳定性优于  $\pm 5\%$ 。

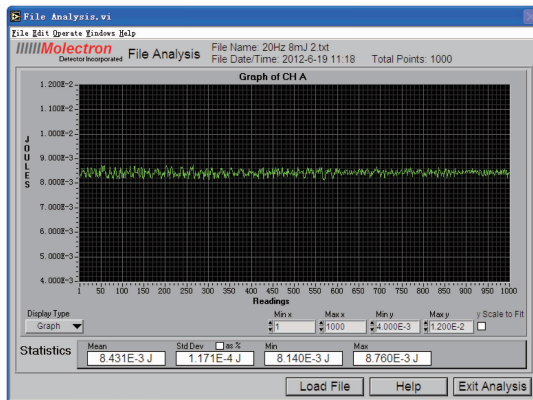


图 7 信号光输出能量稳定性

Fig. 7 Stability of signal output pulse energy at 20 Hz

## 4 结 论

开展了脉冲激光二极管端面抽运 Nd:YAG 被动调 Q 人眼安全内腔式 OPO 的实验研究。研究了在浓度一定的  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 调 Q 晶体下,基频光和信号光的输出能量和抽运阈值与输出镜透射率的关系,分析讨论了信号光出现尾脉冲现象的原因,获得了输出能量 8.5 mJ,脉冲宽度 2 ns,发散角 8 mrad,重复频率 20 Hz 的人眼安全激光输出,光光转换效率 6%。下一步工作将着重开展尾脉冲现象的相关研究,进行进一步优化设计。

## 参 考 文 献

- Huo Yujing, Yang Chengwei, Chen Qiansong, *et al.*. Review on development of laser sources in pulsed rangefinder[J]. Laser and Infrared, 2002, 32(3): 131-134.  
霍玉晶,杨成伟,陈千颂,等. 脉冲激光测距光源进展[J]. 激光与红外,2002, 32(3): 131-134.
- Liu Liping. Military prospect of 1.57  $\mu\text{m}$  OPO eye-safe laser[J]. Laser and Infrared, 2003, 33(4): 300-304.  
刘莉萍. 1.57  $\mu\text{m}$  人眼安全激光技术的军事应用前景分析[J]. 激光与红外,2003, 33(4): 300-304.
- Lu Changyong, Wang Xiaobing, Guo Yanlong, *et al.*. The principle and evolution of 1.5  $\times$   $\mu\text{m}$  wavelength eye-safe military laser rangefinder [J]. Laser & optoelectronics progress, 2005, 42(8): 32-35.  
卢常勇,王小兵,郭延龙,等. 1.5  $\times$   $\mu\text{m}$  波长人眼安全的军用激光测距机及其进展[J]. 激光与光电子学进展,2005, 42(8): 32-35.
- Zhong Ming, Wang Qi, Zhai Gang, *et al.*. Compact OPO laser at 1.57  $\mu\text{m}$  [J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 192-194.  
钟鸣,王 琪,翟 刚,等. 紧凑型 1.57  $\mu\text{m}$  OPO 激光器[J]. 激光技术,2006, 30(2): 192-194.
- Bao Zhao-ri-ge-tu, Wang Bo, He Lijie, *et al.*. Compact eye safe OPO lasers[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(8): 639-640.  
包照日格图,王 博,何利杰,等. 紧凑型人眼安全 OPO 激光器[J]. 激光与红外,2006, 36(8): 639-640.
- Bao Zhao-ri-ge-tu, Gou Tao, Han Long, *et al.*. Eye safe minitype OPO lasers[J]. Laser and Infrared, 2003, 33(3): 190-191.  
包照日格图,苟 涛,韩 隆,等. 小型人眼安全 OPO 激光器[J]. 激光与红外,2003, 33(3): 190-191.
- Wan Y, Zhu D Y, Zeng Q Y, *et al.*. Brewster-oriented passive Q-switched intracavity optical parametric oscillator[J]. Chinese Physics, 2005, 14(4): 714-719.
- Xiao G H, Michael B, Madhu A, *et al.*. Passive Q-switched solid-state lasers with intracavity optical parametric oscillators[J]. Quantum Electronics, 1998, 34(11): 2241-2245.
- Yuri Y, Henry M V D. Passive Q-switched 1.57  $\mu\text{m}$  intracavity optical parametric oscillator[J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2554-2559.
- Zendzian W, Jabczynski J K, Kwiatkowi J. Intracavity optical parametric oscillator at 1572 nm wavelength pumped by passively Q-switched diode-pumped Nd:YAG laser[J]. Applied Physics B, 2003, 76(4): 355-358.
- Chen Y F, Chen S W, Tsai S W, *et al.*. Output optimization of a high-repetition-rate diode-pumped Q-switched intracavity optical parametric oscillator[J]. Applied Physics B, 2003, 77(5): 505-508.
- Zendzian W, Jabczynski J K, Kwiatkowi J. High-peak-power intracavity OPO transmitter at 1572 nm[C]. Proc of SPIE, 2006; 26160T.
- Wen Wuqi, Fu Rulian, Sun Jiantang, *et al.*. Short cavity passive Q-switched Nd:YAG laser end-pumped by QCW-LDA[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2002, 13(9): 900-903.  
温午麒,付汝廉,孙建堂,等. LDA 端泵浦短腔  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J]. 光电子·激光, 2002, 13(9): 900-903.
- Liu Qiang, Gong Mali, Yan Ping, *et al.*. Passive Q-switched laser with intracavity optical parametric oscillator for eyesafe output[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 113-116.  
柳 强,巩马理,闫 平,等. 被动调 Q 人眼安全内腔光学参量振荡器[J]. 中国激光,2003, 30(2): 113-116.
- Wang Xiaobin, Lu Changyong, Liu Xu, *et al.*. Anisotropic of  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG affects to output characteristic in compact IOPO laser[J]. Laser Journal, 2010, 31(2): 9-10.  
王小兵,卢常勇,刘 旭,等.  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 极化特性对于小型 IOPO 输出性能的影响[J]. 激光杂志,2010, 31(2): 9-10.

栏目编辑: 张浩佳