

高重复频率人眼安全内腔式光参量振荡器

卢常勇 李 莉 刘 旭 陈 霞 王淑云 张 玺 付东浩 王 博 李 哲

武汉军械士官学校,湖北 武汉 430075

摘要 开展了连续激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率人眼安全内腔式 KTP 光参量振荡器(KTP-OPO)的实验研究,研究了在相同二极管抽运功率下,基频光和信号光输出功率和脉冲宽度随调制频率的变化关系,获得了平均功率为 1.6 W,脉冲宽度为 6~10 ns, M^2 因子为 5,重复频率为 5~20 kHz 的人眼安全激光输出,光光转换效率为 5.3%。

关键词 激光器;光参量振荡器;人眼安全;高重复频率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s214009

High-Repetition-Rate Eye-Safe Intracavity Optical Parametric Oscillator

Lu Changyong Li Li Liu Xu Chen Xia Wang Shuyun Zhang Xi

Fu Donghao Wang Bo Li Zhe

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

Abstract A high-repetition-rate eye-safe intracavity KTP optical parametric oscillator (KTP-OPO), pumped by an acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser, is studied experimentally. The average output power and pulse width of the pump wavelength and the signal wavelength with respect to the repetition rate are analyzed at the same diode pump power. The average output power of 1.6 W and the pulse width of 6~10 ns at the eye-safe wavelength are obtained with the repetition rate of 5~20 kHz, giving the optical-optical conversion efficiency of about 5.3% from diode power at 808 nm to OPO signal output, and the optical beam quality M^2 factor is 5.

Key words lasers; optical parametric oscillator; eye-safe; high-repetition-rate

OCIS codes 140.3410;140.3430;140.3518

1 引 言

高重复频率 $1.5\mu\text{m}$ 激光具有人眼安全和处于大气窗口对烟雾穿透能力强等优点,在激光成像雷达、激光地形测绘和光电对抗等领域有着广泛的应用前景^[1-2]。近年来,随着 KTP 等新型非线性晶体的出现,基于成熟掺 Nd 离子激光技术的光参量振荡器(OPO)是获得高平均功率、高重复频率人眼安全激光的有效途径^[3]。相比较于外腔式 OPO,内腔式 OPO 是将非线性晶体置于基频光谐振腔内,具有结构紧凑和可靠性好等优点,同时利用腔内基频光的高功率密度实现 OPO 的低阈值和高效率运转,已成为该领域的国内外研究热点^[4-8]。台湾国立交通大学的 Chen 等^[9]采用二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,声光调 Q 内腔式 KTP-OPO 技术获得了重复频率 80 kHz,平均功率近 2 W 的人眼安全激光输出;波兰 Zendian 等^[10]采用同样技术获得了重复频率 40 kHz,平均功率 1.5 W 的激光输出,光光转换效率达 11.4%;国内山东大学 Dong 等^[11]基于二极管侧面抽运 Nd:YAG 技术,采用新型 KTA 晶体作为 OPO 工作介质,得到了重复频率 18 kHz,平均功率 13.6W 的激光输出,光光转换效率 5.7%。

本文开展了基于二极管侧面抽运声光调 Q 的高重复频率人眼安全内腔式 KTP-OPO 实验研究,获得了平均功率为 1.6 W,脉冲宽度为 6~10 ns, M^2 因子为 5,重复频率为 5~20 kHz 的人眼安全激光输出,光光转换效率为 5.3%。

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-04-14

基金项目: 国防科技预研基金(51302010206)

作者简介: 卢常勇(1979—),男,硕士,讲师,主要从事激光技术研究方面的工作。E-mail: lu-changyong@126.com

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,激光器由自行研制的二极管侧面抽运 Nd:YAG 模块、声光 Q 开关和一体化 KTP-OPO 模块三部份组成。采用国产连续 808 nm 激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 晶体,最大抽运功率 30 W。Nd:YAG 晶体直径 2 mm,长度 25 mm,掺杂摩尔分数为 1%,其两端面镀 1064 nm 增透膜。M1 为半径 $R=1000$ mm 的凹面镜,内表面镀有 1064 nm 全反膜作为基频光谐振腔全反镜, OPO 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 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,其端面 M2 镀 1064 nm 增透膜和 1570 nm 全反膜作为 OPO 谐振腔的输入镜,另一端面 M3 镀 1064 nm 全反膜和 1570 nm 部份反射膜作为 OPO 谐振腔的输出镜,反射率 $R=75\%$ 。这样就由 M1、M2 和 M3 构成了一个 1064 nm 抽运的内腔式 OPO 结构,M1 和 M3 构成了 1064 nm 基频光谐振腔,腔长 150 mm;M2 和 M3 构成了 1570 nm 信号光谐振腔,腔长 20 mm。采用 QS041-10G-GH12 型小型声光 Q 开关调 Q,驱动频率 40.68 MHz,调制频率 1~20 kHz,两通光面镀 1064 nm 的增透膜。

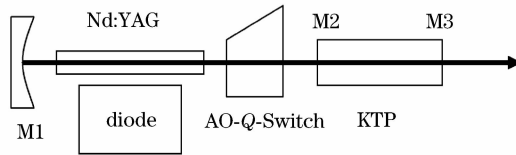


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

实验中 Nd:YAG 晶体、抽运二极管、声光 Q 开关和 KTP 晶体均固定在半导体主动制冷的金属热沉上,温度稳定在 20 ± 0.5 °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 500MHz 示波器进行测量,LBA-700PC-D 型光束质量分析仪监测输出光场分布。

3 实验结果与分析

实验研究了无 OPO 情况下基频光的动态输出性能,将图 1 中的 KTP 晶体更换为反射率 $R=85\%$ 的 1064 nm 平面输出镜,保持腔长 150 mm 不变,在二极管抽运功率 30 W 条件下分别测量了不同频率下基频光的输出功率和脉冲宽度,结果如图 2 所示。

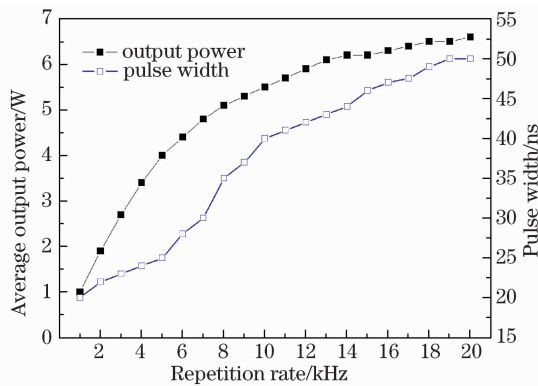


图 2 基频光输出功率和脉宽随重复频率的变化曲线

Fig. 2 Average output power at 1064 nm and corresponding pulse width with respect to the repetition rate

从图 2 可以看出,随着调制频率的增加,基频光输出平均功率逐渐增大并接近饱和,同时由于单脉冲能量逐渐减小引起其脉冲宽度逐渐变宽,在重复频率 20 kHz 时,基频光输出功率达 6.5 W,脉冲宽度 50 ns,光光转换效率 21.7%。图 3 为 20 kHz 下监测到的基频光远场光场分布,呈中心高度突起的基模高斯分布, M^2 因子为 1.5。

在腔内插入 KTP 晶体,如图 1 所示。保持二极管抽运功率 30 W 不变,分别测量了不同频率下信号光的输出功率和脉冲宽度,结果如图 4 所示。

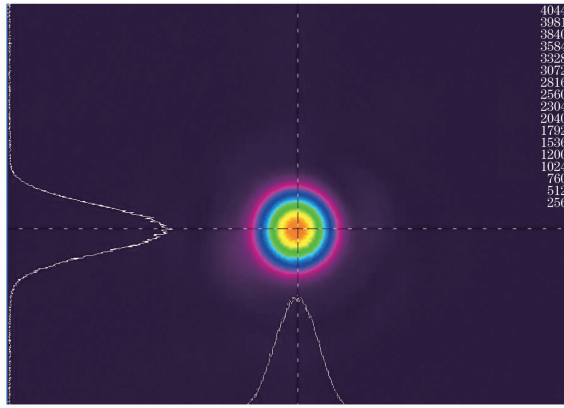


图 3 基频光远场的光场分布

Fig. 3 Far field distribution at 1064 nm

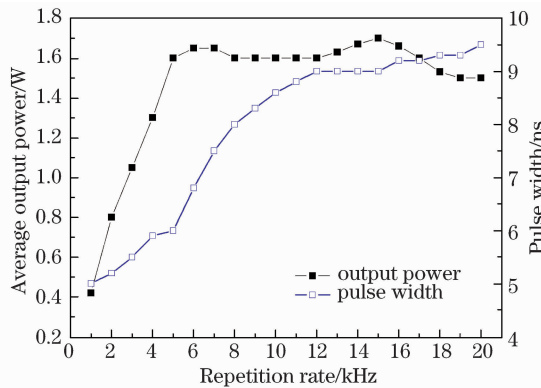


图 4 信号光输出功率和脉宽随重复频率的变化曲线

Fig. 4 Average output power at 1570 nm and corresponding pulse width with respect to the repetition rate

实验发现,在调制频率 1~5 kHz 范围内,信号光输出功率随频率变化较明显,从 1 kHz 的 0.4 W 增长到 5 kHz 下的 1.6 W。但在调制频率 5~20 kHz 范围内,信号光输出功率随频率变化不大,基本保持在 1.6 W 左右。出现这一现象的原因是由于 Nd:YAG 晶体的上能级寿命约为 200 μs 左右,因此当调制频率低于 5 kHz 时,基频光输出单脉冲能量与调制频率基本无关,从图 2 上看基本保持在 0.9 mJ 左右,故经 OPO 转换后该频率段内的信号光单脉冲能量也应基本保持不变,图 4 也验证了这一点,在 5 kHz 以内信号光单脉冲能量基本保持在 0.35 mJ 左右,因此其输出功率随调制频率线性增长。当调制频率大于 5 kHz 时,从图 2 可以看出抽运光到基频光的转换效率在逐渐提高,但由于基频光单脉冲能量呈下降趋势,导致 OPO 转换效率即基频光到信号光的转换效率随之降低,因此总的抽运光到信号光的转换效率基本保持不变,如图 4 所示,光光效率维持在 5.3% 上下。可以预见,通过优化 OPO 输出镜反射率可以进一步提高信号光输出功率。从图 4 中还可以看出,在频率 5 kHz 以内信号光脉宽变化相对平缓,基本在 5~6 ns 之间,当频率大于 5 kHz 时,信号光脉宽逐渐增加,20 kHz 时,其脉宽扩展至 9.5 ns 左右,该现象也与上述分析基本吻合。通过比较图 2 和图 4 可以发现,信号光脉宽明显小于基频光脉宽,这是由于腔式 OPO 的动态过程相当于一个腔倒空器^[11],一旦腔内基频光功率密度超过 OPO 的起振阈值,在其一个腔内往返周期内,信号光迅速建立起振荡并形成一脉冲输出,同时消耗掉腔内基频光功率密度,直至低于 OPO 起振阈值,因此相比于基频光脉宽,OPO 信号光脉宽得到了明显的压缩。

图 5 为 20 kHz 下监测到的信号光远场光场分布,可以看出其光束质量较基频光差, M^2 因子为 5。分析其原因主要有两个:1)是实验采用的一体化 OPO 结构导致 OPO 谐振腔较短,同时较大的基频光抽运光斑使得谐振腔菲涅耳数较大,引起其光束质量下降;2)是由于 KTP 晶体对 OPO 闲频光的高吸收引起的热效应也导致其光束质量进一步下降。

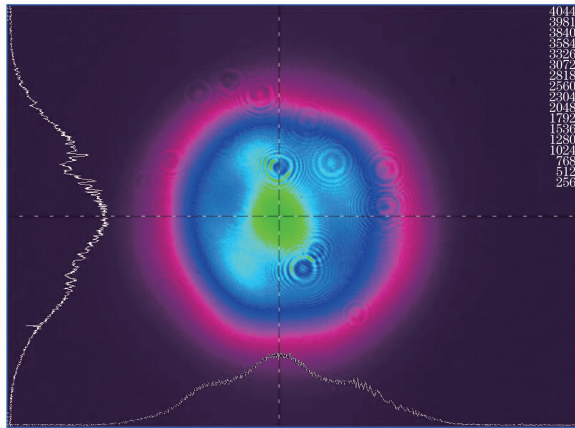


图 5 信号光远场的光场分布

Fig. 5 Far field distribution at 1570 nm

4 结 论

开展了二极管抽运声光调 Q 高重复频率人眼安全内腔式 KTP-OPO 的实验研究。研究了在相同二极管抽运功率下,基频光和信号光输出功率和脉冲宽度随调制频率的变化关系,分析讨论了 OPO 信号光脉冲宽度变小和光束质量下降的原因,获得了平均功率为 1.6 W,脉冲宽度为 6~10 ns, M^2 因子为 5,重复频率为 5~20 kHz 的人眼安全激光输出,光光转换效率为 5.3%。下一步工作将选用性能更优越的 KTA 晶体,同时优化腔结构和输出镜透射率来进一步提高 OPO 的输出性能。

参 考 文 献

- 1 Qu Yu, Li Yufei, Sun Yuming *et al.*. Diode-end-pumped 1.57 μm intracavity OPO[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 683-686.
曲 瑜,李宇飞,孙渝明,等. LD 端面泵浦的 1.57 μm 内腔式 OPO [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 683-686.
- 2 Jin Feng, Zhai Gang, Li Jing, *et al.*. Experimental study of high-repetition-rate eye-safe optical parametric oscillator[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 20-22.
金 锋,翟 刚,李 晶,等. 高重复频率人眼安全光参变振荡器实验研究[J]. *激光技术*, 2006, 30(1): 20-22.
- 3 Li Xiaomin, Zhuo Zhuang, Li Tao, *et al.*. Study on the parametric properties of KTA and KTP crystals[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1): 48-50.
李晓敏,卓 壮,李 涛,等. KTA 和 KTP 晶体参量激光特性研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(1): 48-50.
- 4 Liu Z J, Wang Q P, Zhang X Y, *et al.*. 2.54 W 1535 nm KTiOAsO₄ optical parametric oscillator within a diode-side-pumped acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41(13): 135112.
- 5 Wang Y Y, Xu D G, Yu Y Z, *et al.*. High-peak-power, high-repetition-rate intracavity optical parametric oscillator at 1.57 μm [J]. *Chin Opt Lett*, 2007, 5(2): 93-95.
- 6 Zeng Qinyong, Wan Yong, Zhang Qing, *et al.*. High-repetition-rate intracavity optical parametric oscillator at 1.57 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 673-678.
曾钦勇,万 勇,张 勃,等. 高重复 1.57 μm 内腔光学参量振荡器 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 673-678.
- 7 Chen Y F, Chen S W, Tsai S W, *et al.*. High-repetition-rate eye-safe optical parametric oscillator intracavity pumped by a diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Applied Physics B*, 2003, 76(3): 263-266.
- 8 Chen Y F, Chen S W, Chen Y C, *et al.*. Compact efficient intracavity optical parametric oscillator with a passively Q-switched Nd:YVO₄/Cr⁴⁺:YAG laser in a hemispherical cavity[J]. *Applied Physics B*, 2003, 77(5): 493-495.
- 9 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.
- 10 Zendian W, Jabczynski J K, Kwiatkowski J, *et al.*. High-peak-power intracavity OPO transmitter at 1572 nm[C]. *Proc of SPIE*, 2006, 2616: 26160T.
- 11 Dong X L, Zhang B T, He J L, *et al.*. High power 1.5 μm and 3.4 μm intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 1668-1670.

栏目编辑: 张浩佳