

脉冲 LD 泵浦千赫兹 1.57 μm 全固态激光器

岱 钦¹, 崔建丰², 李业秋¹, 张善春¹, 李 漫¹, 乌日娜¹, 姚 俊¹

(1. 沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 鞍山紫玉激光科技有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

摘 要: 采用非稳腔光参量振荡(OPO)研制了千赫兹重复频率人眼安全波段全固态激光器。激光器采用电光调 Q 方式、脉冲激光二极管(LD)侧面泵浦 Nd:YAG 激光晶体实现了高光束质量的 1.064 μm 基频激光。光参量振荡部分采用 II 类非临界相位匹配 KTP 晶体, 为了获得较好的光束质量, OPO 谐振腔采用平凸非稳定谐振腔结构, 实现了千赫兹重频、窄脉冲 1.57 μm 波段激光输出。在脉冲激光二极管泵浦电流为 125 A、电光调 Q 重复频率为 1 kHz 时, 1.57 μm 激光输出最大平均功率达到了 4.67 W, 激光脉冲宽度为 4.3 ns, 功率不稳定性为 3%, 激光泵浦阈值约为 45 A。

关键词: 人眼安全; 脉冲 LD 泵浦; 非稳腔; 全固态激光器

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0105003

Pulse LD pumped kilohertz 1.57 μm solid-state laser

Dai Qin¹, Cui Jianfeng², Li Yequi¹, Zhang Shanchun¹, Li Man¹, Wu Rina¹, Yao Jun¹

(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Anshan ZY Laser Technology Co., Ltd, Anshan 114000, China)

Abstract: The eye-safe kilohertz repetition rate solid-state laser was developed by using the OPO of unstable resonator. Using pulse LD side-pumping Nd:YAG laser crystal and electro-optical Q-switched techniques, the laser achieved high beam quality of 1.064 μm fundamental frequency light. The II type noncritical phase-matching KTP crystal was adopted in optical parametric oscillation. In order to get high beam quality, the OPO cavity made use of plane-convex unstable resonator structure. The laser system could operate stably at the wavelength of kilohertz repetition rate 1.57 μm . When the pumping current of LD was 125 A and the electro-optical Q-switched repetition rate was 1 kHz, the maximum average output power of 1.57 μm laser was 4.67 W and the pulse width of the output laser was 4.3 ns, the power instability of 1.57 μm was 3%. The laser pumping threshold was about 45 A.

Key words: eye-safe; pulse LD pump; unstable resonator; solid-state laser

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61378075, 61705145); 辽宁省高校杰出青年学者成长计划(LJQ2015093);

辽宁省自然科学基金(201602649); 科技部科技型中小企业技术创新基金(C262100678);

沈阳市科技计划项目(F17-33-6-00)

作者简介: 岱钦(1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: daiqin2003@126.com

0 引言

1.57 μm 波段 OPO 激光处于大气传输窗口,对云、烟、雾穿透能力强,并且该波段激光具有人眼安全特性,在激光雷达、精密制导武器、光通讯、遥感测量、生物医学等领域具有重要的应用^[1-7]。

国内外对人眼安全波段激光器进行了大量的研究,实现的途径主要是通过光参量振荡(OPO),拉曼频移和掺铒激光增益介质直接获得。K. Zhong 等^[8]采用 Nd:YLF 激光晶体和 KTA-OPO 方式获得了 1.506 μm 激光输出,最大输出功率为 570 mW @30 kHz 和 500 mW@10 kHz,斜效率分别为 14.6% 和 11.04%。V.I. Dashkevich 等^[9]采用拉曼频移技术获得了 1.496~1.562 μm 波段激光输出,输出能量 37~95 μJ ,重复频率 2~20 kHz,脉冲宽度 6~8 ns。Bai Fen 等^[10]采用声光调 Q YVO₄/Nd:YVO₄ 键合晶体和 KTA-OPO,在 25.9W 泵浦功率下,获得了 3.77W 的 1.535 μm 激光输出,重复频率为 50 kHz,脉冲宽度为 3.8 ns。龙启强等^[11]利用电光调 Q Nd:YAG 和环形腔 KTP-OPO 实现了 1.57 μm 激光输出,最大输出能量为 46 mJ,重复频率为 10 Hz,脉冲宽度为 6.9 ns。郭猛等^[12]采用 940nm LD 端面泵浦 Er³⁺/Yb³⁺共掺磷酸盐玻璃和被动调 Q 方式实现了微型 1.535 μm 波段激光器,激光单脉冲能量为 130 μJ ,重复频率为 10 Hz,脉冲宽度为 5.5 ns。

文中采用脉冲 LD 侧面泵浦方式、电光调 Q 技术以及非稳腔 KTP-OPO 实现了千赫兹、窄脉冲 1.57 μm 激光输出。当 LD 泵浦电流为 125 A 时,激光输出最大平均功率达到了 4.67 W,激光重复频率 1 kHz,脉冲宽度为 4.3 ns,功率不稳定性为 3%。

1 实验装置

研制激光器结构如图 1 所示,激光器采用脉冲 LD 侧面泵浦方式,采用 12 个 BAR 条(由 CEO 公司提供)均匀三角侧面泵浦 Nd:YAG 晶体,单个 BAR 功率为 150 W。LD 泵浦通过调制脉冲电源来驱动,脉冲宽度为 200 μs ,重复频率为 10~1 000 Hz 可调。Nd:YAG 尺寸为 $\phi 2\text{ mm}\times 78\text{ mm}$,增益介质的掺杂浓度为 0.9 at.%,两端面镀 1.064 μm 增透膜,激光模块采用循环水冷却方式,设置温度为 23 $^{\circ}\text{C}$ 。激光器采用电光 Q 开关(由 Crystech 公司提供),驱动通过同步机与脉冲 LD 驱动电源相连接,调 Q 延时设置为

100 μs 。KTP 晶体采用 II 类非临界相位匹配,两端面镀 1.064 μm 和 1.57 μm 增透膜,晶体尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 20 mm,对 OPO 晶体也进行循环水冷却。为得到较好的光束质量,谐振腔采用平凸腔结构,M1 镀 1.064 μm 高反膜,M2 为曲率半径为 5 m 的凸镜,镀 1.064 μm 的增透膜和 1.57 μm 高反膜,实际工程应用中,考虑到 KTP 抗损伤阈值较低以及腔内和腔外功率密度比例情况,M3 腔镜镀 1.064 μm 全反膜,1.57 μm 透过率设置为 50%,基频光谐振腔长为 300 mm,OPO 谐振腔长为 100 mm。

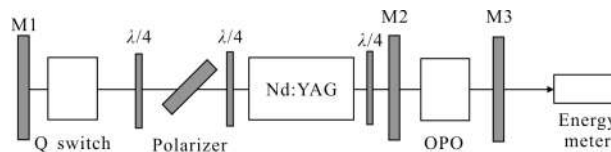


图 1 1.57 μm 激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of 1.57 μm lasers

2 实验测试及结果

实验中泵浦 LD 脉冲频率为 1 kHz,谐振腔中,将激光介质置于两块 $\lambda/4$ 波片之间,以消除空间烧孔,改善热致退偏效应。实验装置中,在 M2 镜后放置 1.064 μm 透过率 40% 的输出镜,调节谐振腔镜,LD 泵浦电流调至 125 A,此时 1.064 μm 激光输出平均功率为 19.6 W。移除 1.064 μm 输出镜,调节光路,将激光器运行在最佳状态。实验采用 FL250A 型激光功率计(Ophir 公司)测量了 1.57 μm 激光输出功率随泵浦电流变化情况,测量曲线如图 2 所示,可以看出,当泵浦电流为 125 A 时,1.57 μm 激光输出最大平均功率为 4.67 W,重复频率 1 kHz,激光阈值为 45 A。

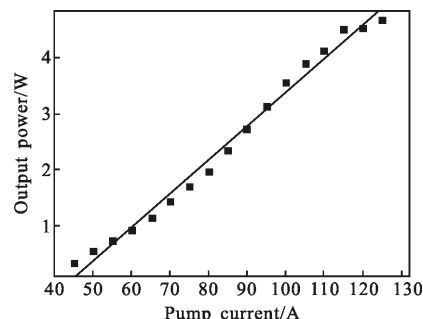


图 2 1.57 μm 激光平均功率随泵浦电流的变化曲线

Fig.2 Laser average power varies with pump current at 1.57 μm

由于采用的光纤光谱仪(Avantes, 200~1 100 nm)探测光谱范围的局限,实验利用倍频晶体对 1.57 μm

先进行倍频,再用光谱仪测量输出激光输出波长,测量结果如图 3 所示,可以看出,输出激光中心波长为 1 573.4 nm,谱线宽度小于 0.5 nm。

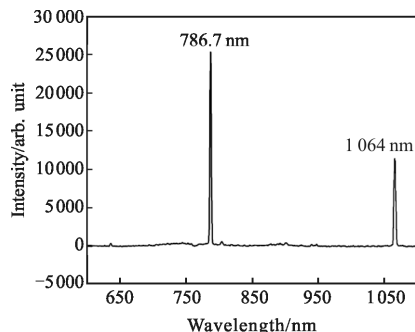


图 3 测量得到的激光谱线

Fig.3 Measured laser spectrum

采用的 DET08CFC 型探测器 (上升沿和下降沿均 <70 ps)(THORLABS 公司)和 TDS3032 存储示波器 (TeKtronix 公司)测量 1.57 μm 激光脉冲宽度。测量得到的激光脉冲波形如图 4 所示,1 kHz 重复频率下,最大输出功率为 4.67 W 时,1.57 μm 激光的脉冲宽度约为 4.3 ns。对应的激光单脉冲能量为 4.67 mJ,峰值功率为 1 086 kW。

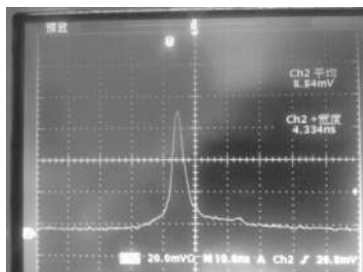


图 4 1.57 μm 激光输出脉冲宽度波形

Fig.4 Profile of 1.57 μm laser output pulse width

将激光光束成像到 CCD 上,测量激光光束截面 X 和 Y 方向的光强分布,如图 5 所示。激光器运行在 4 W 功率水平时,测试了连续 16 h 激光输出的稳定性,功率不稳定性为 3%。

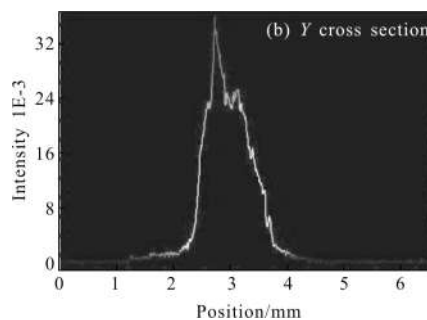
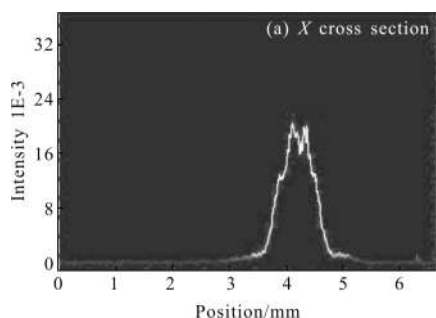


图 5 1.57 μm 激光光斑截面

Fig.5 1.57 μm laser spot cross section

3 结论

文中研制了千赫兹重频人眼安全全固态激光器,激光器采用脉冲 LD 侧面泵浦方式、电光调 Q 实现高光束质量的基频光基础上,利用 KTP-OPO 平凸非稳定谐振腔实现了千赫兹重频、窄脉冲 1.57 μm 激光输出。当 LD 泵浦电流为 125 A、1 kHz 重复频率时,激光输出最大平均功率达到了 4.67 W,脉冲宽度为 4.3 ns,功率不稳定性为 3%。

参考文献:

- [1] Zhang Xin, Liu Yuan, He Yan, et al. Characteristics of eye-safe high repetition frequency narrow pulse width single mode all fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1105-1109. (in Chinese)
张鑫, 刘源, 贺岩, 等. 人眼安全高重频窄脉宽单模全光纤激光器特性研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1105-1109.
- [2] Wang Hui, Zhang Huifeng, Guo Tao. Dual-wavelength eye-safe laser based on Nd:GYSGG/YVO₄ intracavity stimulated Raman conversion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3512-3516. (in Chinese)
王慧, 张会峰, 郭涛. Nd:GYSGG/YVO₄ 双波长人眼安全波段内腔拉曼激光器 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3512-3516.
- [3] Dai Qin, Mao Youming, Wu Kaixuan, et al. High speed and high precision time-interval measurement system in pulsed laser ranging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 83-87. (in Chinese)
岱钦, 毛有明, 吴凯旋, 等. 脉冲激光测距中高速精密时间间隔测量研究[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 83-87.
- [4] Duan Y M, Zhu H Y, Zhang G, et al. High-power eye-safe KTA-OPO driven by YVO₄/Nd:YVO₄ composite laser [J].

- Optics Communications*, 2012, 285: 3507–3509.
- [5] Zhang H N, Chen X H, Wang Q P, et al. High-efficiency diode-pumped actively Q-switched ceramic Nd:YAG/BaWO₄ raman laser operating at 1 666 nm [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2649–2651.
- [6] Su Hui, Li Zhiping, Duan Yanmin, et al. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1404–1409. (in Chinese)
苏辉, 李志平, 段延敏, 等. 基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1404–1409.
- [7] Zhang Jian, Zhang Lei, Zeng Fei, et al. Development status of airborne 3D imaging lidar systems [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 213–232. (in Chinese)
张健, 张雷, 曾飞, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的发展现状[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 213–232.
- [8] Zhong K, Yao J Q, Wang Y Y, et al. Comparison of eye-safe KTA OPOs pumped by Nd:YVO₄ and Nd:YLF lasers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43: 636–641.
- [9] Dashkevich V I, Shpak P V, Voitkov S V, et al. Eye-safe actively Q-switched diode-pumped lasers with intracavity Raman conversion in YVO₄, KGd(WO₄)₂, PbWO₄, and Ba(NO₃)₂ crystals[J]. *Optics Communications*, 2015, 351: 1–8.
- [10] Bai Fen, Wang Qingpu, Liu Zhaojun, et al. Theoretical and experimental studies on output characteristics of an intracavity KTA OPO[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 807–815.
- [11] Long Qiqiang, Zhong Kai, Hong Guanglie. Investigation on eye-safe ring-cavity KTP optical parametric oscillator with seed injection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0614003. (in Chinese)
龙启强, 钟凯, 洪光烈. 种子注入环形腔人眼安全 KTP 参变振荡器的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0614003.
- [12] Guo Meng, Hui Yongling, Zhang Yulu, et al. A wide temperature range miniaturization eye-safe laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 041019. (in Chinese)
郭猛, 惠勇凌, 张宇露, 等. 宽温度范围微型人眼安全激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(4): 041019.