

高重频声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器 2.1 μm 光参量振荡器

王子健, 金光勇, 于永吉, 翟睿智

(长春理工大学 理学院 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器, 在声光 Q 开关重复频率为 50 kHz、LD 最大泵浦功率 50 W 时, 获得输出功率 26.37 W、脉冲宽度 26.28 ns 的 1 064 nm 激光输出。通过该系统抽运键合 KTP 外腔式光参量振荡器(OPO), 当 LD 泵浦电流 24 A、对应 1 064 nm 泵浦功率 7.36 W 时, 实现了重频 50 kHz 的 2.174 μm 脉冲激光输出, 激光平均输出功率为 324 mW, 激光脉宽为 17.8 ns。同时, 通过实验分析了不同输出镜透过率和声光调 Q 激光重频对 1.064 μm 和 2.1 μm 激光输出功率、脉宽的影响。最后通过理论值与实验测量值的对比得出, 两组数据基本吻合, 且 2.1 μm 输出功率未出现饱和。

关键词: 声光调 Q; 光参量振荡器; 高重频; 窄脉宽

中图分类号: O437.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2638-05

2.1 μm optical parametric oscillator based on high-repetition Q-switch Nd:YVO₄ laser

Wang Zijian, Jin Guangyong, Yu Yongji, Zhai Ruizhi

(Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Apply, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: A Nd:YVO₄ laser end-pumped by laser diode was designed, when the repetition frequency of acousto-optical Q-switch was 50 kHz, LD pump power was 50 W, the output power of 26.37 W and pulse width of 26.28 ns was obtained. And with this arrangements, by pumping external cavity OPO with bonding KTP crystal, when the LD pump current was 24 W, corresponding to the 1 064 nm laser power of 7.36 W, the wavelength of 2.174 μm pulse laser was achieved, the average power was 324 mW and pulse width was 17.8 ns. Meanwhile, the laser output power and pulse width of 1.064 μm and 2.1 μm under different output transmission and repetition frequency was analyzed in experiment. At last, by comparing the calculated date and measured date in experiment, the results show that the measured date is consistent with the calculated date, and the output power is not saturated.

Key words: acousto-optical Q-switch; OPO; high-repetition; narrow pulse width

收稿日期: 2015-01-12; 修订日期: 2015-02-19

作者简介: 王子健(1987-), 男, 博士生, 主要从事非线性光学频率变换研究。Email: wzej6177979@sina.com

导师简介: 金光勇(1971-), 男, 教授, 研究员, 博士, 主要从事固体激光器研究。Email: jgycom@163.com

0 引言

2 μm 激光对大气和烟雾的穿透能力强,在激光测距、激光雷达、遥控传感及医学诊断方面显示出越来越广泛的应用前景,而且它覆盖了水分子和 CO₂ 分子的吸收带,较易被生物组织吸收,在生物医学领域中也开始崭露头角,并逐渐发挥重要作用^[1-2]。同时,2 μm 激光还是获得 3~5 μm 光学参量振荡器的激光输出的理想泵浦源^[3-4]。因此,2 μm 激光逐渐成为研究热点。

目前通过固体激光技术获得 2 μm 波段激光输出的方法主要有两种:(1)通过掺 Tm 和 Ho 激光晶体直接产生 2 μm 波段激光输出^[5];(2)由掺钕离子激光晶体的 ⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2} 跃迁产生的 1 μm 波段激光泵浦非线性光学晶体,通过简并态光参量振荡(OPO)产生 2 μm 波段激光输出^[6]。前者由于掺 Tm 和 Ho 激光晶体为准三能级,其阈值较高,通常需要通过制冷的办法获得 2 μm 波段激光,室温下较难获得,且成本较为昂贵。由于受调 Q 技术的限制,获得较大能量的脉冲激光器较为困难,目前报道的主要为连续工作方式。后者选用合适的非线性晶体进行光参量振荡,无需制冷,室温下就可以实现。可通过对泵浦光的调 Q 实现脉冲的激光输出。目前较常用的主动调 Q 方式包括电光调 Q 和声光调 Q 两种。电光调 Q 具有消光比高、开关门速度快以及输出脉宽较窄等优点。声光调 Q 具有调制电压低、腔内插入损耗小以及在较高重复频率下仍然能够实现窄脉宽高功率输出等优势。激光二极管(LD)端面抽运高重频调 Q 激光器有着较窄的脉冲宽度、较高的峰值功率和较好的光束质量,随着调 Q 器件的新型化和多样化,在激光精细微加工、自由空间激光通信、空载激光雷达和激光测距等科学研究和工业加工诸多领域有着重要的应用价值。近年来,随着新型 Q 开关材料的出现以及调 Q 技术的不断提高,在窄脉宽高功率激光输出方面的报道层出不穷^[7-8]。2009 年,中国科学院光电子工程学院激光与光电子研究所的刘欢等人实现了 LD 端面抽运 KTP 2.1 μm 波长激光输出,在重复频率 50 kHz 时,激光准连续输出功率最高可以达到 4.75 W^[9]。2010 年,中国科学院物理研究所的魏星斌等人报道了一台单脉冲光参量振荡器,激光重频 30 kHz 时,2 μm 激光可以达到 10.5%

的总转换效率^[10]。

文中通过实验分析了 1 064 nm 连续、脉冲激光和 2.1 μm KTP-OPO 的输出特性。采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器,在声光 Q 开关重复频率为 50 kHz 时,获得输出功率 7.36 W、脉冲宽度 26.28 ns 的 1 064 nm 激光输出,进而抽运键合 KTP 外腔式 OPO,实现了重频 50 kHz 的 2.174 μm 脉冲激光输出,激光平均输出功率为 324 mW,激光脉宽 17.8 ns。同时,还在更高重频下获得了窄脉冲、高效率的激光输出。

1 实验装置

高重频声光调 Q 2.1 μm KTP-OPO 系统由高重频声光调 Q 1 064 nm Nd:YVO₄ 激光器和红外键合 KTP-OPO 系统组成。采用 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,利用声光调 Q 实验装置,获得高重复频率、高光束质量的窄脉冲 1.06 μm 激光输出,并将该激光作为 KTP-OPO 的泵浦源,以获得高效、高功率 2.1 μm 激光。图 1 为实验装置图。抽运源为 808 nm LD 光纤耦合模块,透镜组为焦距比 1:2 的耦合镜筒,1 064 nm 激光谐振腔采用平平腔结构,腔长 120 mm,全反镜 M1 对 808 nm 全反、对 1 064 nm 高反,输出镜 M2 镀 808 nm 全反和 1 064 nm 增透膜,对 1 064 nm 激光透过率为 32%,激光晶体为 Nd:YVO₄ 单端复合晶体,掺杂浓度 0.25%,尺寸为 3×3×(4+16) mm³,将其用铝箔包裹,放入特制加工好的卡槽内,通过水冷方式降低热沉。声光调 Q 晶体采用英国 GOOCH&HOUSEG 公司 QS041-10G-SO3 型 41 MHz 风冷声光 Q 开关,射频功率为 20 W。M3 和 M4 构成 OPO 谐振腔,全反镜 M3 上镀 1.06 μm 增透膜和 2.1 μm 激光全反膜,输出镜 M4 上镀 1.06 μm 全反膜和 2.1 μm 激光部分透过膜。KTP 晶体为尺寸 6×6×40 mm³ 的键合晶体。为了减少 OPO 谐振腔的阈值和提高 OPO 的转换效率,将 KTP 晶体放置在临近聚焦透镜焦点的位置。KTP 晶体用铝箔包好放置在特制的镜盒之中。

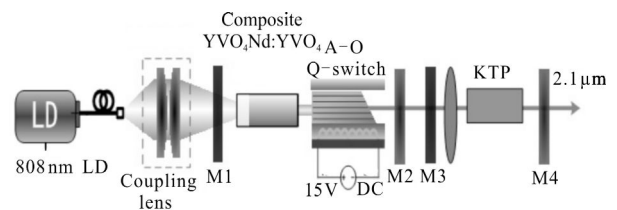


图 1 2.1 μm 外腔式光参量振荡器装置图

Fig.1 Experimental setup of 2.1 μm external cavity OPO

2 实验结果和分析

2.1 高重频声光调 Q 1 064 nm 激光器输出特性

2.1.1 连续 1 064 nm Nd:YVO₄ 激光器输出特性

图 2 (a)、(b) 为在 1 064 nm 激光谐振腔输出镜 M2 透过率分别为 20%、32% 的情况下, LD 端泵 Nd:YVO₄ 连续 1 064 nm 激光输出功率与 808 nm LD 泵浦功率的关系。当 LD 泵浦功率为 50.5 W 时, 1 064 nm 连续激光最大输出功率达到 26.37 W。由图中可以看出, 不同的输出镜透过率对 1 064 nm 连续激光的输出功率影响不大, 同时考虑到谐振腔的热效应和 KTP 晶体较低损伤阈值的影响, 因此选择对 1 064 nm 激光透过率为 32% 的输出镜更为合适。

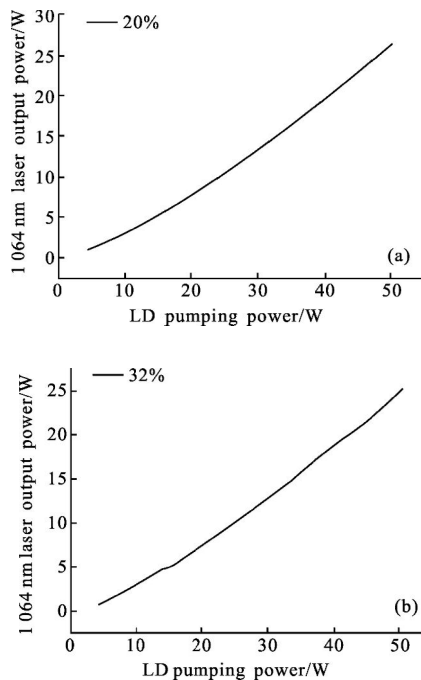


图 2 不同输出镜透过率下 LD 泵浦功率与连续激光输出功率关系

Fig.2 Continuous laser output power versus LD pumping power under different transmittances

2.1.2 高重频声光调 Q 1 064 nm Nd:YVO₄ 激光器输出特性

基于前文连续激光输出特性实验结果, 在激光器谐振腔内输出镜端中加入声光调 Q 系统实现高重频脉冲激光输出, 并对不同重频下激光器输出特性进行研究。图 3 为激光重频分别为 50、100、200、500 kHz 情况下 1 064 nm 激光的平均功率曲线。从图

中可以看出, 激光平均输出功率与重频成正比, 较低重频时平均功率增长趋势较为明显, 随着重频增加, 功率增长逐渐平缓。图 4 为不同重频下 1 064 nm 激光的脉冲宽度, 所用脉宽探测器型号为 THROLABS DET10A/M, 示波器型号为 tektronix DPO3054。由图对比可知, 脉冲宽度随着重复频率的增大而增大; 在较低重复频率阶段, 脉冲宽度随之迅速增大, 变化很明显; 但是当重复频率高到一定程度以后, 这种变化趋于缓和直至相差不多。

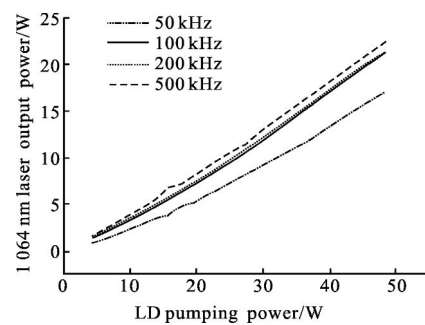
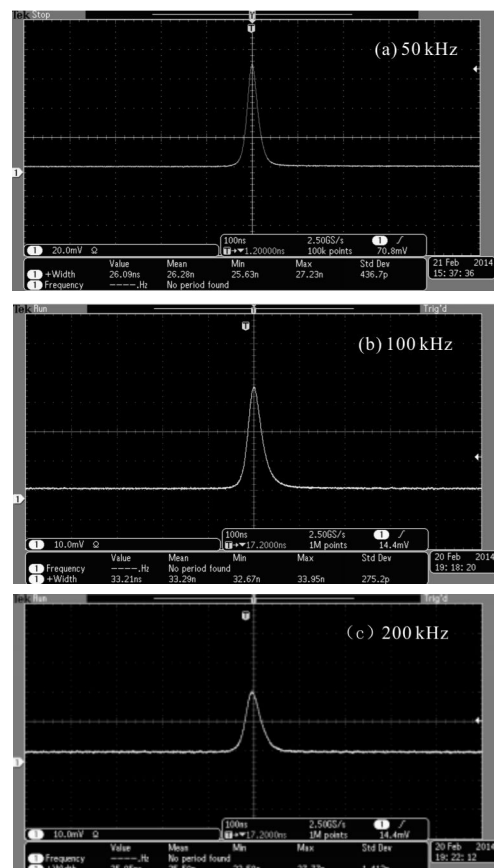


图 3 不同重频下 1 064 nm 激光输出功率曲线

Fig.3 1 064 nm laser output power curve under different repetition frequency



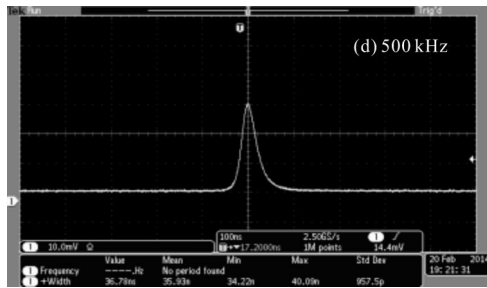


图 4 不同重频下 1 064 nm 激光脉冲宽度

Fig.4 1 064 nm laser pulse width under different repetition frequency

2.2 高重频声光调 Q 2.1 μm KTP-OPO 输出特性

当 OPO 腔长为 80 mm, 1 064 nm 激光谐振腔输出镜 M2 透过率选择 20%, 声光 Q 开关重复频率为 50 kHz 时, 展开 2.1 μm KTP-OPO 输出特性研究。考虑 KTP 晶体损伤阈值和腔镜膜系的限制, 抽运源注入最大电流 24 A, 对应 1 064 nm 激光泵浦功率 7.36 W, 实验获得平均功率 324 mW 的 2.1 μm 激光输出。图 5 为 2.1 μm 激光输出功率随 1 064 nm 激光泵浦功率的关系曲线。由图可知 KTP-OPO 起振阈值约 1.1 W, 随着 1 064 nm 泵浦功率的增加, 2.1 μm 激光输出功率并未出现饱和。

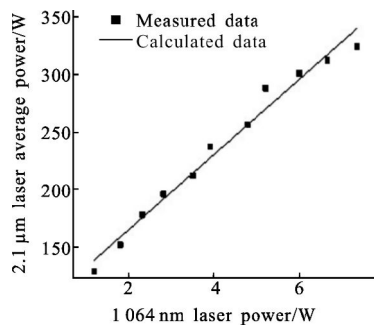


图 5 2.1 μm 激光输出功率与 1 064 nm 激光泵浦功率关系曲线

Fig.5 2.1 μm laser output power versus 1 064 nm pumping power

接下来, 实验通过改变激光重复频率研究 2.1 μm 激光脉冲宽度的变化关系。图 6 为测量得到激光重频分别为 50、200、500 kHz 时 2.1 μm 激光的脉冲宽度。与 1 064 nm 激光相同, 2.1 μm 激光脉宽随着重频的增加而增大, 在高频时脉宽增加幅度逐渐缓慢。利用日本横河 AQ6375 型号光谱仪对激光输出波长进行测量, 结果如图 7 所示, 得到中心波长为 2 174.2 nm 的激光输出。

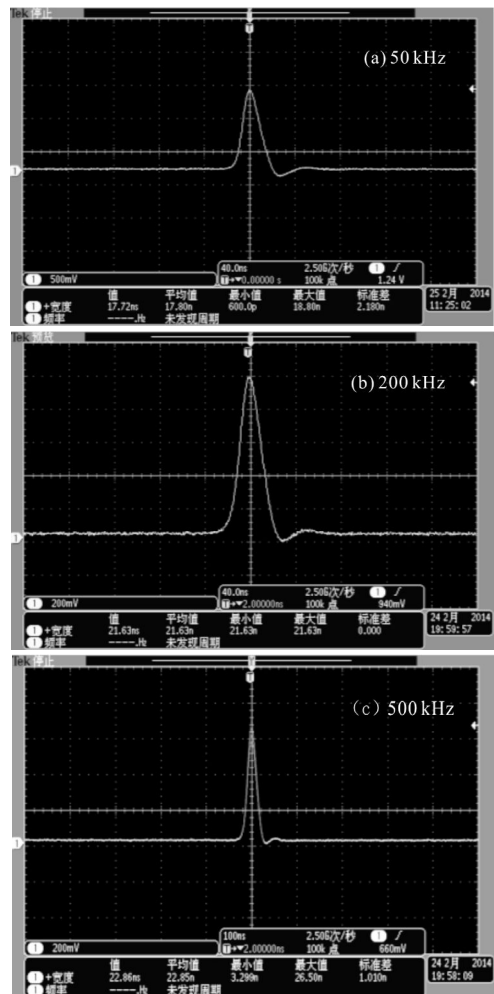


图 6 不同重频下 2.1 μm 激光输出脉冲宽度

Fig.6 2.1 μm laser pulse width under different repetition frequency



图 7 2.1 μm 激光波长示意图

Fig.7 2.1 μm laser wavelength

3 结论

文中通过对国内外高峰值功率 2.1 μm OPO 发

展现况的分析,光参量振荡器采用声光调 Q 这一参考点出发,对高峰值功率 2.1 μm OPO 进行合理的设计首先分析了。采用 1 064 nm Nd:YVO₄ 激光器抽运键合 KTP 外腔式 OPO,在泵浦功率 7.36 W、声光调 Q 重复频率 50 kHz 时实现了的 2.174 μm 脉冲激光输出,激光平均输出功率为 324 mW,激光脉宽 17.8 ns。对应光光转换效率 4.4%。由于 OPO 输出镜膜系加工工艺的限制,实验中并未采用最大功率泵浦 OPO 腔。同时实验分析了不同调 Q 激光重频对 1.064 μm 和 2.1 μm 激光输出功率、脉宽的影响,在高重复频率下获得了窄脉宽输出。

参考文献:

- [1] Wu Yue. Research and design on 2.1 μm optical parametric oscillator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
吴月. 2.1 μm 光学参量振荡激光器的研究与设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [2] Kieleck C, Hirth A. Investigations of a Q-switched Ho:YAG laser-intracavity-pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser [C]//SPIE, 2004, 5460: 56-63.
- [3] Yao Baoquan, He Wanjuan. Technical study of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a 2 μm Tm, Ho:YLF laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 39-42. (in Chinese)
姚宝权, 贺万骏. 2 μm Tm, Ho:YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光参量振荡技术研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 39-42.
- [4] Henrisson M, Tiihonen M, Pasiskevicius V, et al. ZnGeP₂ parametric oscillator pumped by a linewidth-narrowed parametric 2 microm source [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1878-1880.
- [5] Jackson S D, Sabella A, Hemming A, et al. High-power 83 Wholmium-doped silica fiber laser operating with high beam quality[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(3): 241-243.
- [6] Xie Gang, Peng Yuefeng, Lu Yanhua, et al. High efficiency 23.6 W 2 μm laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(11): 1488-1491. (in Chinese)
谢刚, 彭跃峰, 鲁燕华, 等. 23.6 W 高效率 2 μm 激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1488-1491.
- [7] Yu Jirong, Trieu B C, Modlinetal E A. Pulse-switched 2 μm solid-state laser[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(4): 462-464.
- [8] Yu Yongji, Chen Xinyu, Wang Chao, et al. A 200 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO₄ laser using a double-crystal RTP electro-optic modulator [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(2): 024206-1-4.
- [9] Poh Boon Phua, Kin Seng Lai, Wu Ruifen. Multiwatt high-repetition-rate 2 μm output from an intracavity KTP optical parametric oscillator[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1435-1439.
- [10] Wei Xingbin, Peng Yuefeng, Wang Weimin, et al. 2 μm pulsed laser with 100 mJ intracavity KTP optical parametric oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2762-2765. (in Chinese)
魏星斌, 彭跃峰, 王卫民, 等. 百毫焦腔内 KTP 光参量振荡 2 μm 脉冲激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2762-2765.