



·强激光物理与技术·

电光调 Q 脉冲 Ho: YLF 激光器实验研究*

赵莉莉^{1,2}, 田俊涛^{1,2}, 李志永^{1,2}, 王海^{1,2}

(1. 中国科学院 空天信息创新研究院, 激光工程技术研究中心, 北京 100094; 2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘 要: 2 μm 低重复频率高峰值功率高光束质量激光在中长波光参量非线性频率变换等领域具有较为广阔的应用前景。采用 L 型谐振腔结构, 使用 42 W 的掺 Tm 光纤激光器泵浦 Ho: YLF 晶体。基于磷酸钛氧铷 (RTP) 电光调 Q 技术, 实现了重复频率 50 Hz、脉冲宽度 18 ns、脉冲能量 13.5 mJ、峰值功率 0.75 MW 的 2.05 μm Ho: YLF 固体激光输出。光束的水平方向和竖直方向 M^2 因子分别为 1.4 和 1.1。该 Ho: YLF 固体激光器采用光纤激光器泵浦, 具有结构紧凑的特点, 为更高能量的 Ho 激光输出奠定了基础。

关键词: Tm 光纤激光器; Ho: YLF; 电光调 Q; 高峰值功率; 低重复频率

中图分类号: O439

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220368

Experimental research on electro-optical Q-switched pulse Ho: YLF laser

Zhao Lili^{1,2}, Tian Juntao^{1,2}, Li Zhiyong^{1,2}, Wang Hai^{1,2}

(1. Laser Engineering Technology Research Center, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. College of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The 2 μm laser with low repetition rate, high peak power and high beam quality has a wide application prospect for nonlinear frequency transformation of mid-infrared and long-infrared optical parameters. The Ho: YLF crystal is pumped by a 42W Tm doped fiber laser with an L-shaped resonator structure. Laser output with wavelength of 2.05 μm , repetition rate of 50 Hz, pulse width of 18 ns, pulse energy of 13.5 mJ, and peak power of 0.75 MW is realized based on the electro-optic Q-switching technology of rubidium titanate phosphate (RTP). And the beam quality M^2 factors in the horizontal and vertical directions are 1.4 and 1.1, respectively. The Ho: YLF solid state laser is pumped by a fiber laser and has a compact structure, and it will build the foundation for Ho laser with higher pulse energy.

Key words: Tm-fiber laser, Ho: YLF, electro-optical Q-switched, high peak power, low repetition rate

2 μm 波段的 Ho: YLF 固体激光器在激光医学^[1]、遥感^[2-3]、光参量振荡器^[4-5]和光参量放大器^[6]等领域中有着重要应用。其中, 以 2 μm 激光作为泵浦光的光参量振荡器是获得中波和长波固体激光的主要技术手段之一^[7]。Ho: YLF 晶体^[8-9]具有较长的上能级寿命(约为 14 ms)和较大的发射截面(π 方向上的最大发射截面约为 $1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, σ 方向上的最大发射截面约为 $1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$), 在实现 2 μm 低重频高峰值功率固体激光输出方面具有优势。Ho: YLF 晶体在 1.9 μm 波段附近有较高的吸收峰, 且近年来光纤激光器的输出功率也在不断提高^[10-11], 因此, 采用 1.9 μm 掺 Tm 光纤激光器作为泵浦源成为实现结构紧凑 2 μm 大能量激光光束的发展趋势^[12]。

2011 年, 法国的 Schellhorn^[13] 采用 82.8 W 的掺 Tm 光纤激光器作为泵浦源, 基于声光调 Q 方式实现了重复频率为 100 Hz、峰值功率为 1.1 MW 的激光输出。2022 年, 国内的 Yan 等人^[14] 报道了重复频率 100 Hz、峰值功率 0.84 MW 的 Ho: YLF 激光器, 其泵浦源为 78.6 W 的掺 Tm 光纤激光器。值得注意的是, 上述报道均是基于声光调 Q 技术实现。2 μm 的声光 Q 开关基于石英的声光布拉格效应实现, 其衍射效率、衍射角与注入射功率密切相关。为了实现较高的衍射效率和较大的衍射角, 石英晶体通常需要水冷散热, 增加了激光器的结构复杂性。另一方面, 受限于声光 Q 开关的衍射效率, 采用声光调 Q 技术时, 谐振腔的品质因数调控幅度有限, 限制了更高峰值功率激光脉冲

* 收稿日期: 2022-11-10; 修订日期: 2023-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61875198, 61775215); 脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金项目 (SKL2021KF04); 中国科学院仪器设备研制项目 (YJKYYQ20210045)

联系方式: 赵莉莉, 18255117200@qq.com。

通信作者: 李志永, zhiyongli@aircas.ac.cn。

的输出。

为了获得更高的激光振荡单脉冲峰值功率,电光调Q成为产生脉冲Ho:YLF激光的主要技术手段。2013年,挪威Fonnum等人^[15]使用功率为100 W的掺Tm光纤激光器泵浦Ho:YLF晶体,在液氮温度下实现了重频为1 Hz峰值功率为38.46 MW的激光输出,对应的脉冲宽度为14.3 ns,显示了电光调Q技术在Ho:YLF高峰值功率激光脉冲输出方面的优势和潜力。

本文报道了一种室温工作的电光调Q Ho:YLF激光器,在平均功率为42 W的光纤激光器泵浦下,获得了脉冲宽度18 ns、脉冲能量13.5 mJ、峰值功率0.75 MW的2.05 μm 激光光束。和上述报道中的指标进行对比,本实验在相对较低的泵浦功率下,在室温工作条件下实现了较高的峰值功率输出,且该技术路线具有结构紧凑的特点,本实验的激光器可为中长波光参量振荡器提供优质泵浦源。

1 实验装置

实验装置示意图如图1所示,谐振腔为L型平凹腔。

M_1 和 M_5 分别为谐振腔的高反镜和输出耦合镜。 M_1 在2.1 μm 处高反,在1.9 μm 处高透。 M_5 为平凹输出耦合镜,在2.05 μm 处的透射率为30%,曲率半径为300 mm。 M_2 为45°分光片,在1.94 μm 处高透,在2.05 μm 处对S偏振光高反。 M_3 为薄膜偏振片。 M_4 为四分之一波片。RTP(RbTiOPO₄,磷酸钛氧铷)晶体成对使用,由两块8 mm×8 mm×8 mm的晶体组成,在2.05 μm 处增透,该晶体具有电光系数大、不易潮解、插入损耗小等优点,是近年来常用的电光调Q晶体。Ho:YLF晶体的尺寸为6 mm×6 mm×40 mm,掺杂原子

分数为0.5%, a 轴切割。晶体两端镀有1.94 μm 和2.05 μm 的增透膜。实验中,用铝箔包裹Ho:YLF晶体后,将晶体放置在紫铜热沉中。热沉采用循环水冷却,冷却温度为18 $^{\circ}\text{C}$ 。泵浦源采用Tm光纤激光器,中心波长为1938 nm,水平方向和垂直方向的光束质量因子分别为1.8和2.0。光纤激光器输出的光束经透镜会聚后进入Ho:YLF晶体。谐振腔的物理腔长约为30.5 cm。

晶体前端面(靠近 M_2 端)泵浦光斑直径为3.2 mm,晶体后端面(靠近 M_1 端)泵浦光斑直径为2.9 mm。当激光为基横模时,根据实验中采用的谐振腔腔镜及参数,可计算出此谐振腔的激光振荡模式,在晶体前端面的光束直径为1.3 mm,晶体后端面光束直径为1.1 mm。可以看出,泵浦光光斑尺寸约是激光基横模光斑尺寸的2.6倍。选择该种匹配模式,主要是为了避免泵浦功率密度和激光功率密度过高引起的谐振腔内光学元件的损伤。

如图1所示放置Ho:YLF晶体,晶体的通光方向与晶体的 a 轴平行,谐振腔内光束的偏振方向与晶体的 c 轴平行。为了后文表述清晰,定义Ho晶体通光方向为 z 方向,平行于 c 轴方向(即竖直方向)为 y 方向。Ho激光的偏振方向与偏振片 M_3 的P偏振光平行。在1.94 μm 光束泵浦时,RTP晶体未加载四分之一波电压,谐振腔内线偏振Ho激光经过四分之一波片 M_4 后,变为圆偏振光,经过 M_5 反射后,再次经过四分之一波片 M_4 ,Ho激光光束的偏振方向变为与 M_3 的S偏振方向相同,谐振腔处于高损耗状态,在泵浦光的持续泵浦下,⁵I₇能级(Ho激光上能级)的粒子数持续增加。当RTP晶体上加载四分之一波电压时,Ho激光依次通过四分之一波片、RTP晶体、输出耦合镜 M_5 、RTP晶体、四分之一波片后,Ho激光仍为P偏振光(相对于偏振片 M_3),此时的谐振腔品质因子较大,输出巨脉冲。

2 实验结果与讨论

当泵浦功率为42 W时,泵浦吸收功率约为31.5 W(泵浦吸收率约为75%),输出连续激光的最高功率为4.4 W,静态光光转换效率为10.5%,相对于吸收光功率的光光转换效率为14.0%。在该泵浦功率下,采用连续泵浦的方式进行脉冲工作特性研究。

当重复频率分别为50 Hz、75 Hz、100 Hz、200 Hz和300 Hz时,对应的泵浦能量分别为840.0 mJ、560.0 mJ、420.0 mJ、210.0 mJ和140.0 mJ, Ho激光的输出能量分别为13.5 mJ、12.5 mJ、10.4 mJ、7.3 mJ和5.0 mJ。上述泵浦条件下,输出的脉冲能量和脉冲宽度的变化趋势如图2所示。实验中,能量计型号为Coherent J-50MB-HE;光电探测器型号为Newport 818-BB-51,带宽12.5 GHz;示波器型号为Agilent DSO7104B。

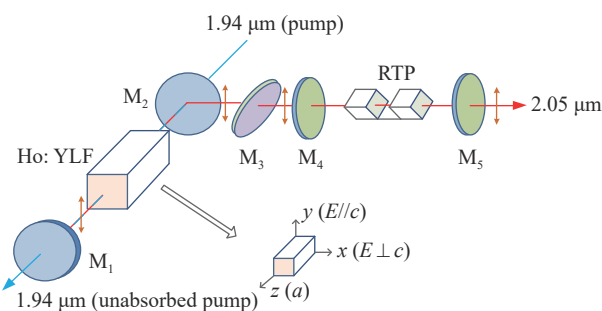


Fig. 1 Experimental setup diagram of Ho:YLF laser

图1 Ho:YLF激光器实验装置图

图2展示了Ho激光的脉冲能量、脉冲宽度随着泵浦能量变化关系,横坐标为泵浦能量(泵浦能量=泵浦平均功率/重复频率),纵坐标分别是Ho激光的脉冲能量和脉冲宽度。从图中可以看出, Ho激光的脉冲能量随着泵浦能量的增加而增加,脉冲宽度随着泵浦能量的增加而减小,且随着泵浦能量的继续增加,脉冲能量和脉冲宽度的变化趋势均趋于饱和。当泵浦能量为140.0 mJ时,脉冲宽度最大,脉冲能量为5.0 mJ,对应的峰值功率为0.096 MW;当泵浦能量为840.0 mJ时,脉冲宽度最窄,对应的脉冲能量为13.5 mJ,相应的峰值功率为0.75 MW。当泵浦能量从140.0 mJ提高到840.0 mJ时,峰值功率大约提高了8倍。

用光电探测器和示波器测得的脉冲波形如图3所示,横坐标表示时间,每一小格为25 ns,纵坐标表示归一化的信号强度。从图3可以看出,随着重频的增加,脉冲宽度也在逐渐增加,从18 ns增加至52 ns。

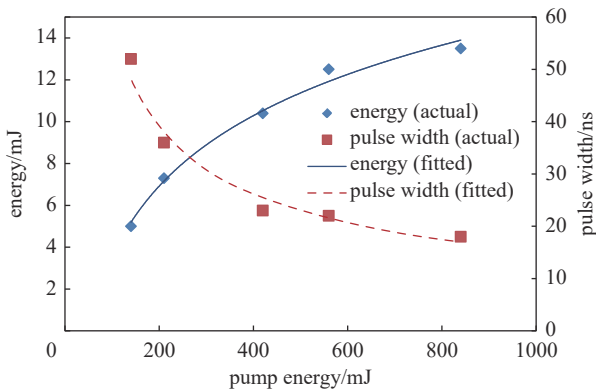


Fig. 2 Pulse energy and pulse width vs pump energy of Ho laser

图2 Ho激光的脉冲能量、脉冲宽度随着泵浦能量变化

用光谱仪测得的激光脉冲波长如图4所示,横坐标表示波长,纵坐标表示归一化的信号强度,中心波长为2049 nm。

在输出镜后放置聚焦透镜,采用刀口法测量聚焦透镜后的光斑尺寸,通过双曲线拟合计算得到激光光束的 M^2 因子。图5分别为激光器在连续工作状态和调Q工作状态下的 M^2 因子测量结果。在连续工作状态下, x 方向和 y 方向的 M^2 因子分别为1.8和1.6;在调Q工作状态下, x 方向和 y 方向的 M^2 因子分别为1.4和1.1。

当泵浦能量为420 mJ(重复频率为100 Hz)时,记录15 min内的脉冲能量,可得到脉冲能量曲线如图6所示。图中横坐

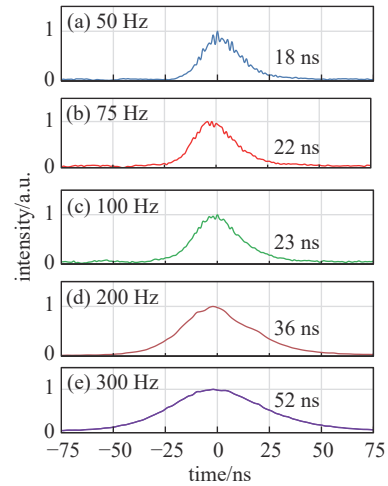


Fig. 3 Pulse waveform diagram

图3 脉冲波形图

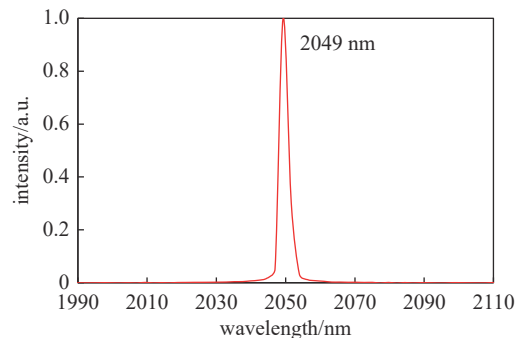


Fig. 4 Laser wavelength of pulse experiment

图4 脉冲实验的激光波长

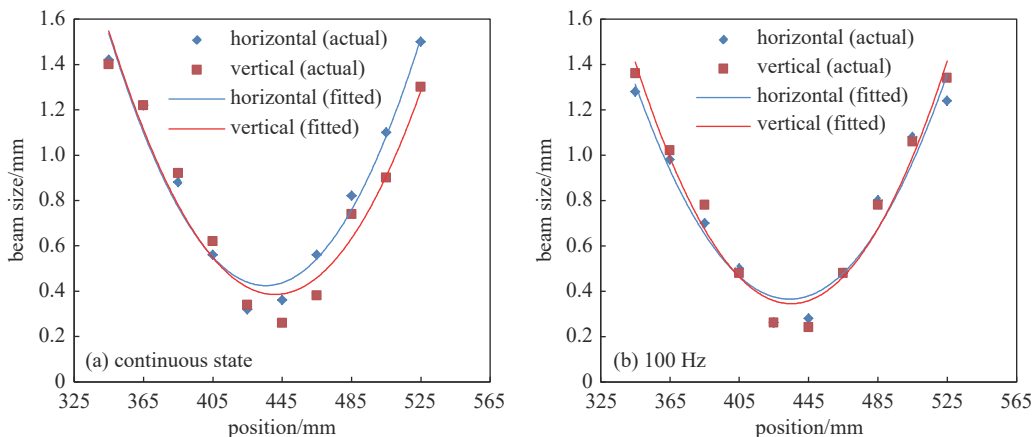


Fig. 5 Measurement results of beam quality factor

图5 光束质量因子测量结果

标表示时间,纵坐标表示脉冲能量。在 15 min 内的能量不稳定度的标准差为 2.1%,能量不稳定度为 4.6%。Tm 光纤激光器的非偏振光输出特性是影响该不稳定度的主要原因之一。实验中,Tm 光纤激光光束平行于 Ho:YLF 晶体 π 偏振分量的光功率占比在 69%~76% 之间波动。已知, Ho:YLF 晶体在 π 偏振方向和 σ 偏振方向的吸收截面^[1]分别约为 $1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 和 $0.57 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。两个偏振方向吸收截面的差距使得 Tm 光纤激光光束的偏振特性影响泵浦强度,进而影响激光输出的稳定度。为了进一步改善能量不稳定度,可使用线偏振的 Tm 光纤激光器作为 Ho:YLF 晶体的泵浦源。

3 结 论

综上所述,本文研究了连续泵浦模式下重复频率对 Ho:YLF 激光脉冲输出特性的影响。在室温工作条件下,基于电光调 Q 技术,获得了 18 ns/50 Hz 的 2.05 μm 脉冲激光输出,脉冲能量达到 13.5 mJ,峰值功率达到 0.75 MW。并分析了 Tm 光纤激光器的非偏振输出特性对 Ho:YLF 激光输出能量不稳定度有影响。

参考文献:

- [1] Fried N M. Recent advances in infrared laser lithotripsy[Invited][J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(9): 4552-4568.
- [2] Taczak T M, Killinger D K. Development of a tunable, narrow-linewidth, cw 2.066- μm Ho: YLF laser for remote sensing of atmospheric CO₂ and H₂O[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(36): 8460-8476.
- [3] Singh U N, Walsh B M, Yu Jirong, et al. Twenty years of Tm: Ho: YLF and LuLiF laser development for global wind and carbon dioxide active remote sensing[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(4): 827-837.
- [4] Haakestad M W, Fonnum H, Lippert E. Mid-infrared source with 0.2 J pulse energy based on nonlinear conversion of Q-switched pulses in ZnGeP₂[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8556-8564.
- [5] Eichhorn M, Schellhorn M, Haakestad M W, et al. High-pulse-energy mid-infrared fractional-image-rotation-enhancement ZnGeP₂ optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2596-2599.
- [6] Dergachev A, Armstrong D, Smith A, et al. High-power, high-energy ZGP OPA pumped by a 2.05- μm Ho: YLF MOPA system[C]//Proceedings of SPIE 6875, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications VII. 2008: 687507.
- [7] Tian Juntao, Li Zhiyong, Zhao Lili, et al. Long-wave infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator with improved tunability by use of a cavity compensation technique[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61: 076102.
- [8] Walsh B M. Spectroscopy and excitation dynamics of the trivalent lanthanides Tm³⁺ and Ho³⁺ in LiYF₄[D]. Massachusetts: Boston College, 1995: 70-72.
- [9] Koen W, Bollig C, Strauss H, et al. Compact fibre-laser-pumped Ho: YLF oscillator-amplifier system[J]. *Applied Physics B*, 2010, 99(1/2): 101-106.
- [10] 袁伟仪, 付敏, 李智贤, 等. 一体化光纤滤波器端帽实现 20 kW 激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 111001. (Yuan Weiyi, Fu Min, Li Zhixian, et al. Integrated fiber cladding power stripper and end-cap with 20 kW output power[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 111001)
- [11] 黄良金, 吴函烁, 李瑞显, 等. 用于 10 kW 级高光束质量激光输出的国产部分掺杂光纤[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 111002. (Huang Liangjin, Wu Hanshuo, Li Ruixian, et al. Homemade confined-doped fiber for 10 kW level fiber laser output with good beam quality[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 111002)
- [12] Mizutani K, Ishii S, Aoki M, et al. 2 μm Doppler wind lidar with a Tm: fiber-laser-pumped Ho: YLF laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 202-205.
- [13] Schellhorn M. A comparison of resonantly pumped Ho: YLF and Ho: LLF lasers in CW and Q-switched operation under identical pump conditions[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(4): 777-788.
- [14] Yan D, Li S N, Ju Y L, et al. 100 Hz, 39.6 mJ compact linear polarization Q-switched Ho: YLF oscillator[J]. *Applied Physics B*, 2022, 128: 70.
- [15] Fonnum H, Lippert E, Haakestad M W. 550 mJ Q-switched cryogenic Ho: YLF oscillator pumped with a 100 W Tm: fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1884-1886.

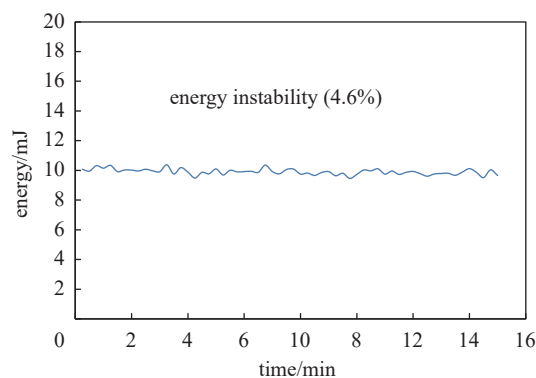


Fig. 6 Energy instability at 100 Hz

图 6 100 Hz 时能量不稳定度