

Tm:YAP 泵浦的窄脉宽高功率 Ho:YLF 激光器

赵莉莉^{1,2}, 田俊涛^{1,2}, 王海^{1,2}, 李志永^{1,2*}, 谭荣清^{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 高功率激光在中长波光参量振荡器泵浦和光电对抗领域具有重要应用。采用线偏振 Tm:YAP 激光泵浦 Ho:YLF 晶体的技术路线, 基于电光调 Q 技术, 通过泵浦光的偏振方向优化, 在泵浦功率为 15.4 W 时, 实现了脉冲能量为 9.5 mJ、重复频率为 100 Hz、脉冲宽度为 13.0 ns 的 2.05 μm 激光输出, 水平和垂直方向上的光束质量因子分别为 1.2 和 1.3, 对应的峰值功率为 0.73 MW。该激光器具有峰值功率高、结构简单紧凑的优点, 为将来实现更高能量和更高功率的 Ho:YLF 激光输出提供了实验参考数据。

关键词 激光器; Ho:YLF 激光器; 高功率; 电光调 Q

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221571

1 引言

2 μm Ho 固体激光器在遥感^[1-2]、生物医学^[3]、多普勒风雷达^[4]、光参量振荡器^[5-6]和光参量放大器^[7]等领域中均具有重要应用。Ho 固体激光器常见基质有氟化钇锂 (YLF)、钇铝石榴石 (YAG) 和氟化锂铈 (LLF), Ho:YLF 相较于其他两者, 具有发射截面大、上能级寿命长和负折射率梯度的特点^[8], 在高功率激光输出应用中更具有优势。

Ho:YLF 晶体在 1.94 μm 处具有较强的吸收峰, 常用的泵浦源有 Tm:YAP 固体激光器和 Tm 光纤激光器^[9]。Tm:YAP 固体激光器不需要额外添加偏振保持器件即可直接输出线偏振光, 且其相比于光纤激光器具有更加不受反馈光干扰的特性^[10]。近年来, 有许多学者用 Tm:YAP 激光器泵浦 Ho:YLF 晶体。2021 年, Wang 等^[11]用 245 W 的板条 Tm:YAP 激光器泵浦 Ho:YLF 晶体, 得到功率为 125 W 的连续激光输出, 实现了 51% 的光光转换效率, 但是其在水平方向和垂直方向的光束质量因子相差过大, 分别是 475 和 1.59。2022 年, Mi 等^[10]采用 202 W 的板条 Tm:YAP 激光器作为泵浦源, 得到功率为 113 W 的 Ho:YLF 激光输出, 光束质量有所提高, 水平方向和垂直方向的光束质量因子均约为 1.5。上述文献报道展现了 Tm:YAP 激光泵浦 Ho:YLF 晶体在高功率高效率激光输出方面的应用潜力。然而, 目前 Tm:YAP 激光泵浦 Ho:YLF 晶体进行调 Q 脉冲光输出时, 通常工作于高重复频率模式, 对应

的峰值功率较小。2013 年, Zhao 等^[12]用 20.8 W 的 Tm:YAP 激光器泵浦, 采用声光调 Q 的方式, 在重复频率为 10 kHz 时, 获得脉宽为 175 ns、峰值功率为 3.9 kW 的脉冲激光输出。2022 年, Mi 等^[13]用 97.3 W 的 Tm:YAP 激光器泵浦 Ho:YLF 的主振荡功率放大系统, 通过声光调 Q 的方式, 在重复频率为 10 kHz 时, 获得脉冲宽度为 22 ns、峰值功率为 0.27 MW 的脉冲激光输出。

本文用 15.4 W 的 Tm:YAP 激光器泵浦 Ho:YLF 晶体, 采用电光调 Q 的方式, 可获得脉冲宽度为 13.0 ns、峰值功率为 0.73 MW 的百赫兹脉冲激光输出, 以较低的泵浦功率实现了高功率激光输出, 且在光放大和级间泵浦时无需光隔离, 具有结构紧凑的特点。

2 基本原理与实验装置

Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 的能级跃迁示意图如图 1 所示, 用波长为 792 nm 的半导体激光器 (LD) 泵浦 Tm:YAP 晶体, 可以输出 1.94 μm 的激光。目前, 792 nm 的 LD 已经商用, 且 Tm:YAP 晶体在该波段附近有吸收峰。用 LD 泵浦 Tm:YAP 晶体, 采用直腔结构, 即可搭建结构简单紧凑的 Tm:YAP 激光器。Ho:YLF 晶体在 1.94 μm 处有偏振吸收峰, 且 Tm:YAP 晶体具有自然双折射特性, 输出的光为线偏振光^[10], 因此用 1.94 μm 线偏振 Tm:YAP 激光器泵浦 Ho:YLF 晶体, 可以实现 2 μm 波段激光输出。

Tm:YAP 激光器的输出中心波长取决于晶体的切割方向。当晶体采用 a 切时, 输出的中心波长是

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-02-09; 录用日期: 2023-03-08; 网络首发日期: 2023-03-13

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

通信作者: *zhiyongli@aircas.ac.cn

1.98 μm , 当晶体采用 b 切时, 输出的中心波长是 1.94 μm ^[14]。Ho:YLF 晶体在 1.94 μm 处的 π 偏振方向最大吸收截面约为 $1.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 而在 1.98 μm 处的 π 偏振方向最大吸收截面约为 $0.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ^[15]。因此, 选用尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 12 mm、掺杂浓度(原子数分数)为 3.0% 的 b 切 Tm:YAP 晶体。

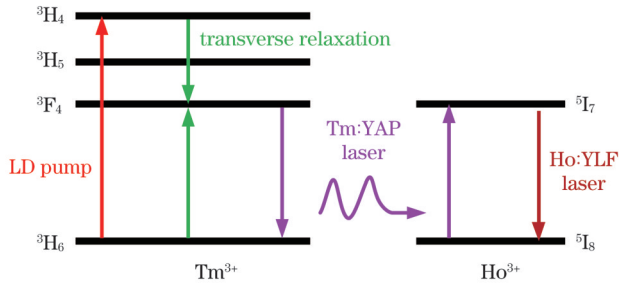


图 1 Tm³⁺ 和 Ho³⁺ 的能级跃迁示意图

Fig. 1 Schematics of energy level transitions of Tm³⁺ and Ho³⁺

对于 Ho:YLF 激光谐振腔, 根据 ABCD 矩阵理论和图 2 中的谐振腔参数, 可计算出此谐振腔内各个位置处的激光振荡模式尺寸。Ho:YLF 晶体前端面(靠近 M₅ 端)的基模光束直径约为 1.1 mm, 晶体后端面(靠近 M₉ 端)的基模光束直径约为 0.8 mm。为了获得较好的模式匹配, 实验中调节泵浦光聚焦元件, 使得泵浦光在 Ho:YLF 晶体前端面、后端面的光斑直径分别约为 1.3 mm 和 1.1 mm, 约是 Ho:YLF 激光基模光斑尺寸的 1.2 倍和 1.4 倍。

在图 2 中, Tm:YAP 激光器采用直形平凹腔, Ho:YLF 激光器采用 L 形平凹腔。M₁ 和 M₂ 为 Tm:YAP 谐振腔的腔镜。其中: M₁ 为平镜, 在 1.94 μm 处高反, 在 792 nm 处高透; M₂ 为平凹输出耦合镜, 在 792 nm 处高透, 在 1.94 μm 处的透射率为 20%, 曲率半径为 400 mm。M₃ 为聚焦透镜。M₄ 为半波片, 用于调整 Tm:YAP 激光的偏振方向, 实现 Ho:YLF 激光的高效泵浦。Tm:YAP 晶体的两端镀有 792 nm 和 1.94 μm 的增透膜。实验中, 用铝箔包裹 Tm:YAP 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 20 $^{\circ}\text{C}$ 。谐振腔的腔长约为 6 cm。

M₅、M₈ 和 M₉ 为 Ho:YLF 谐振腔的腔镜。其中: M₅ 为 45 $^{\circ}$ 分光片, 在 1.94 μm 处高透, 在 2 μm 处对 S 偏振光高反; M₈ 为平凹输出耦合镜, 在 2 μm 处的透射率为 30%, 曲率半径为 300 mm; M₉ 为平镜, 在 2 μm 处高反, 在 1.94 μm 处高透。M₆ 为薄膜偏振片。M₇ 是四分之一波片。磷酸钛氧铷(RTP)晶体成对使用, 由两块 8 mm \times 8 mm \times 8 mm 的晶体组成, 在 2 μm 处增透。Ho:YLF 晶体的尺寸为 6 mm \times 6 mm \times 40 mm, 掺杂浓度(原子数分数)为 0.5%, a 切。晶体两端镀有 1.94 μm 和 2 μm 的增透膜。实验中, Ho:YLF 晶体和上述 Tm:YAP 晶体采用相同的冷却方式, 冷却温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。谐振腔的腔长约为 30.5 cm。

如图 2 所示, Ho:YLF 晶体的通光方向与晶体的 a 轴平行, c 轴与竖直方向(y 方向)平行, 谐振腔内光束的偏振方向与 Ho 晶体的 c 轴平行。偏振片 M₆ 对 S 偏振光高反, 对 P 偏振光高透。当 RTP 晶体未加载四分之一波电压时, Ho 激光在腔内相对于偏振片 M₆ 而言是 P 偏振方向的入射光。当 1.94 μm 光束泵浦时, 谐振腔内线偏振 Ho 激光经过四分之一波片 M₇ 后变为圆偏振光, 经 M₈ 反射后再次经过四分之一波片 M₇, Ho 激光光束由圆偏振光再次变为线偏振光, 但在腔内的偏振方向旋转了 90 $^{\circ}$, 此时 Ho 激光相对于偏振片 M₆ 而言是 S 偏振方向的入射光, Ho 激光被反射出谐振腔外, 谐振腔处于高损耗状态。在泵浦光的持续泵浦下, Ho 激光上能级的粒子数持续增加, 谐振腔此时处于储能状态。当在 RTP 晶体上加载四分之一波电压时, Ho 激光依次经过四分之一波片、RTP 晶体、输出耦合镜 M₈、RTP 晶体、四分之一波片, Ho 激光相对于偏振片 M₆ 而言是 P 偏振方向的入射光, 激光可通过偏振片 M₆, 此时谐振腔品质因子较大, 输出巨脉冲。

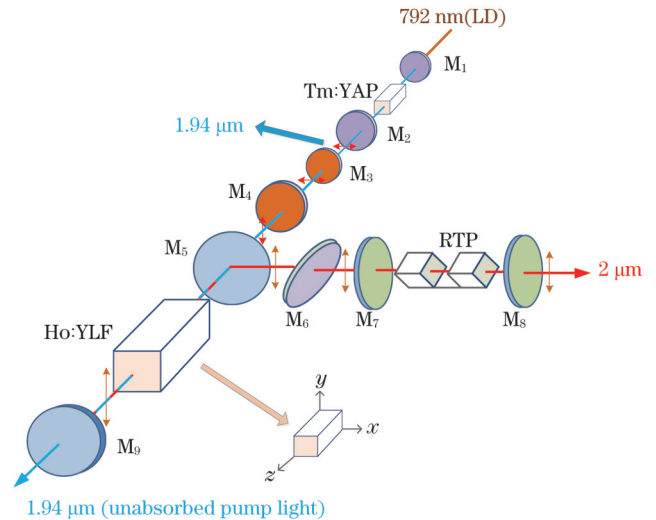


图 2 Tm:YAP 激光泵浦 Ho:YLF 的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram of Ho:YLF pumped by Tm:YAP laser

3 实验结果与分析

3.1 Tm:YAP 激光器

当 LD 的输出功率为 90.3 W 时, 可以得到中心波长为 1.94 μm 、最高功率为 30.2 W 的 Tm:YAP 激光输出。Tm:YAP 激光功率随着 LD 功率的变化曲线如图 3 所示, 横坐标为 LD 功率, 纵坐标为 Tm:YAP 激光功率, 斜率效率为 44.5%, 光光效率为 33.5%。

采用刀口法测量 Tm:YAP 激光光束的光束质量因子(M^2), 测量结果如图 4 所示。在连续工作状态下, x 方向和 y 方向的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 3.3 和 2.8。

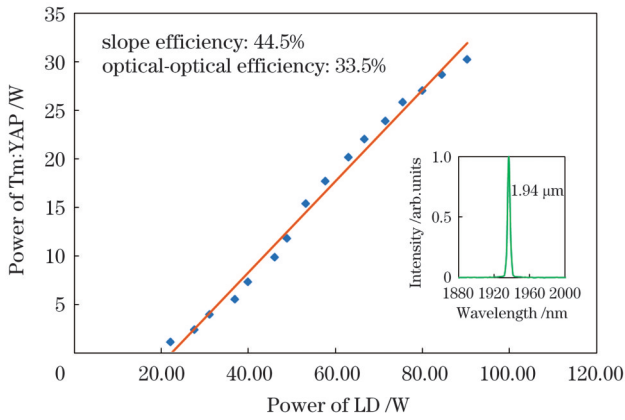


图 3 Tm:YAP 功率与 LD 功率的关系
Fig. 3 Tm:YAP power versus LD power

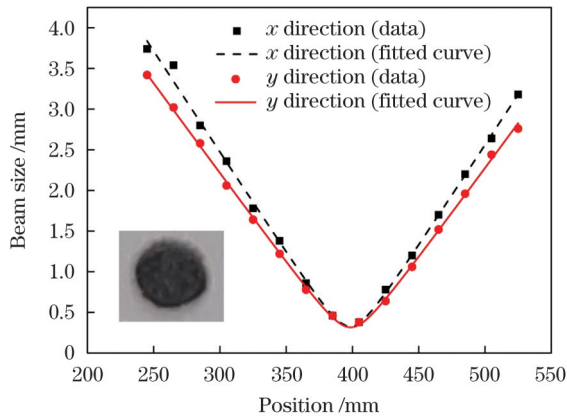


图 4 光束质量因子测量结果(连续操作)
Fig. 4 Measurement results of beam quality factor (continuous-wave operation)

3.2 Ho:YLF 连续激光

采用 3.1 节所述的 Tm:YAP 激光泵浦 Ho:YLF 晶体。当 Tm:YAP 的功率 30.2 W 时,在连续模式下获得中心波长为 2.06 μm、最高功率为 9.2 W 的 Ho:YLF 激光输出。Ho:YLF 激光功率随着 Tm:YAP 激光功率的增大呈线性增长趋势,关系曲线如图 5 所示,横坐标为 Tm:YAP 激光功率,纵坐标为 Ho:YLF 激光功率。Ho:YLF 激光器的斜率效率为 34.9%,最高光光效率为 30.4%。

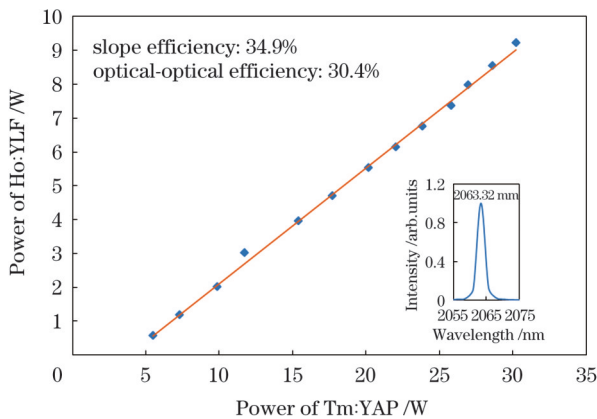


图 5 Ho:YLF 功率与 Tm:YAP 功率的关系
Fig. 5 Ho:YLF power versus Tm:YAP power

如图 6 所示,在 Ho:YLF 激光最高输出功率下,测得的 x 方向和 y 方向的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.3 和 1.2。该实验结果表明,在该谐振腔结构下,获得了高光束质量的连续 Ho:YLF 激光输出。

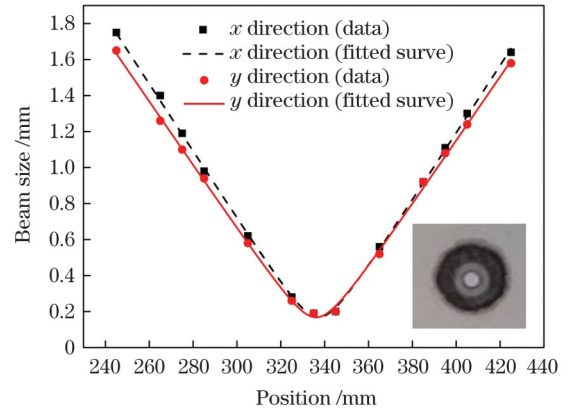


图 6 光束质量因子测量结果(调 Q 操作)
Fig. 6 Measurement results of beam quality factor (Q-switching operation)

Ho:YLF 晶体具有偏振吸收特性,在 π 偏振方向 (y 方向)上的最大吸收截面约为 $1.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,对应波长约为 1.94 μm,在 σ 偏振方向 (x 方向)上的最大吸收截面约为 $0.57 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,对应波长约为 1.95 μm^[15]。实验中,当 Tm:YAP 泵浦功率为 25.8 W 时,通过旋转半波片 M_4 ,改变线偏振泵浦光的偏振方向,从而改变 Tm:YAP 泵浦光偏振分量在 π 偏振方向上的占比。Ho:YLF 输出功率及光光转换效率随着 π 偏振方向上泵浦光偏振分量占比的变化如图 7 所示。可以看出,随着 π 偏振方向上的泵浦光偏振分量占比的不断增加, Ho:YLF 输出功率和光光效率也在不断增加。当偏振分量占比为 1 时,即泵浦光全部为 y 方向上的线偏振光时, Ho:YLF 输出功率最高,为 7.47 W,光光转换效率也最高,约为 28.9%;当偏振分量占比为 0 时, Ho:YLF 输出功率最低,为 1.84 W,光光转换效率最低,约为 7.1%。前者相比于后者,输出功率和光光转换效率

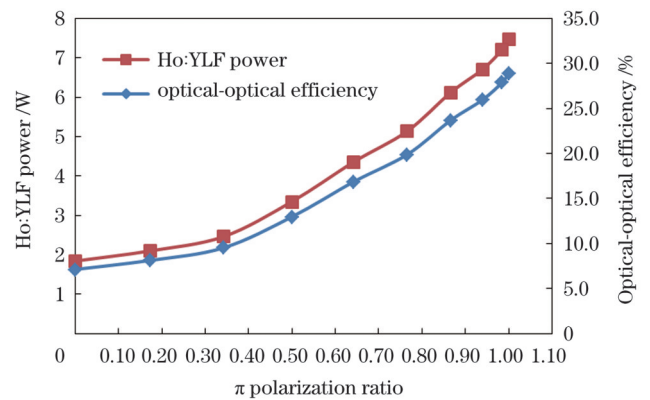


图 7 π 方向偏振占比对功率和光光效率的影响
Fig. 7 Influence of π polarization ratio on power and optical-optical efficiency

均提高了 3 倍左右。该实验现象表明线偏振光泵浦是实现 Ho:YLF 高效率激光输出的有效手段。

3.3 电光调 Q Ho:YLF 实验结果

在上述连续实验的基础上,进行电光调 Q 实验,可获得高功率窄脉宽的 2.05 μm 脉冲 Ho:YLF 激光输出。

已知 Ho:YLF 晶体的激光上能级寿命约为 14 ms^[13],可采用长脉冲泵浦的方式^[16]。当 Q 开关的重复频率为 100 Hz 时,通过改变 Tm:YAP 泵浦光调制信号的占空比(即改变泵浦光脉冲宽度),改变 Tm:YAP 泵浦脉冲能量。在不同泵浦脉冲能量条件下,测得的 Ho:YLF 的脉冲能量和脉冲宽度随着 Tm:YAP 脉冲能量的变化如图 8 所示。可以看出, Ho:YLF 激光的脉冲能量随着 Tm:YAP 脉冲能量的增加而近似线性增长,对应的泵浦斜率效率约为 11%。文献[16]报道了在重复频率为 10 Hz 时,用脉宽为 20 ms 的 Tm 光纤激光器泵浦 Ho:YLF 晶体。在该文献中, Ho:YLF 激光的输出能量先随着泵浦脉冲能量的增加而线性增加,在注入能量与增益体积之比约为 27 mJ/mm³ 时,出现了饱和和吸收效应,此时, Ho:YLF 激光的输出能量不再随着泵浦脉冲能量的变化而线性变化。与文献[16]不同,本文中的 Ho:YLF 激光能量随着泵浦光能量的变化呈线性增长趋势,并没有出现饱和现象。这主要是因为:一方面本文采用的泵浦脉冲宽度最大值是 10 ms,均小于 Ho 激光上能级(⁵I₇ 能级)寿命(14 ms);另一方面,本文中的注入能量与增益体积之比最大约为 5.4 mJ/mm³,小于 27 mJ/mm³。

实验中,还分别测得了不同泵浦脉冲能量条件下对应的 Ho:YLF 激光的脉冲宽度。从图 8 可以看出, Ho:YLF 激光的脉冲宽度随着 Tm:YAP 激光脉冲能量的增加而快速减小,最窄脉冲宽度为 13.0 ns,其对应的 Ho:YLF 脉冲能量为 9.5 mJ,峰值功率为 0.73 MW。

在不同泵浦脉冲能量条件下,分别测量了光束质

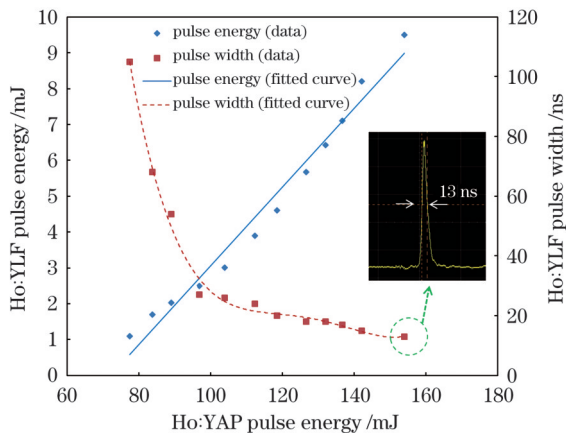


图 8 脉冲能量和脉冲宽度随 Tm:YAP 激光脉冲能量的变化
Fig. 8 Pulse energy and pulse width versus pulse energy of Tm:YAP laser

量因子。当泵浦脉冲能量分别为 84、104、132、154 mJ 时,测得的光束质量因子均约为 1.3。该实验结果表明,在该长脉冲泵浦模式下,泵浦脉冲能量的变化对光束质量因子基本无影响。

4 结 论

报道了输出功率为 30 W、波长为 1.94 μm 的小型化 Tm:YAP 固体激光器及其泵浦的电光调 Q Ho:YLF 激光器。当 15.4 W 的 Tm:YAP 激光器泵浦 Ho:YLF 晶体时,获得了最高峰值功率为 0.73 MW 的 2.05 μm 百赫兹脉冲激光输出。用较低的泵浦功率即可实现 MW 量级的峰值功率,具有较高的泵浦效率。改变泵浦光偏振方向的实验研究表明,线偏振泵浦是提高 Ho:YLF 激光器光光效率的有效方式。改变长脉冲泵浦的脉冲宽度实验研究表明,当泵浦脉冲宽度在 7~10 ms 范围内时,在 100 Hz 运转模式下 Ho:YLF 激光的光束质量因子基本不变。该激光器具有结构紧凑、高功率的特点,在中长波光参量振荡器泵浦等领域中具有较为广阔的应用前景。同时,长脉冲泵浦下电光调 Q 的研究结果也将推动更高能量更高峰值功率 Ho:YLF 激光光束产生技术的发展。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Singh U N, Walsh B M, Yu J R, 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.
- [3] 阮双琛,侯静,李剑峰,等.“先进中红外激光技术及应用”专题前言[J].中国激光,2022,49(1):0101000.
Ruan S C, Hou J, Li J F, et al. Special issue on technology and application of advanced mid-infrared lasers introduction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101000.
- [4] 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.
- [5] 魏磊,吴德成,刘东,等. Ho:YLF 激光泵浦的长波红外 ZnGeP₂ 光参量振荡器[J].中国激光,2021,48(1):0101002
Wei L, Wu D C, Liu D, et al. Long-wave infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by Ho:YLF laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0101002.
- [6] 姚宝权,杨科,密淑一,等. 高功率 Ho:YAG 激光器及其泵浦的磷锗锌、硒镓钼和硒化镉中长波红外非线性光学频率转换研究进展[J].中国激光,2022,49(1):0101002.
Yao B Q, Yang K, Mi S Y, et al. Research progress of high-power Ho:YAG lasers and its application for pumping mid-far-infrared nonlinear frequency conversion in ZGP, BGSe and CdSe crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101002.
- [7] Dergachev A, Armstrong D, Smith A, et al. High-power, high-energy ZGP OPA pumped by a 2.05- μm Ho:YLF MOPA system [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6875: 687507.
- [8] Bollig C, Strauss H J, Esser M J D, et al. Compact fibre-laser-pumped Ho:YLF oscillator-amplifier system[C]//CLEO/Europe-EQEC 2009-European Conference on Lasers and Electro-Optics

- and the European Quantum Electronics Conference, June 14-19, 2009, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2009.
- [9] 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(4): 70.
- [10] Mi S Y, Wei D S, Tang J W, et al. 113 W Ho: YLF oscillator with good beam quality efficiently pumped by a Tm: YAP laser[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(19): 5755-5759.
- [11] Wang Q C, Long Q L, Gao Y, et al. High-efficiency Ho: YLF slab laser with 125 W continuous-wave output power[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(26): 8046-8049.
- [12] Zhao K, Yao B Q, Meng P B, et al. Detailed investigation of a high-efficiency Ho: YLF laser pumped by a Tm: YAP laser[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(4): 045801.
- [13] Mi S Y, Wei D S, Tang J W, et al. An efficient, compact Ho: YLF MOPA system pumped by a linearly polarized Tm: YAP laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 150: 107977.
- [14] Cemy P, Burns D. Modeling and experimental investigation of a diode-pumped Tm: YAlO₃ laser with a- and b-cut crystal orientations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 674-681.
- [15] Walsh B M. Spectroscopy and excitation dynamics of the trivalent lanthanides Tm³⁺ and Ho³⁺ in LiYF₄[D]. Boston: National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, 1995: 70-72.
- [16] Tooski M B, Maleki A, Majd A E, et al. Continuous-wave and pulsed operation of Ho: YLF laser end-pumped by Tm: fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2022, 32(7): 075101.

Ho: YLF Laser with Narrow Pulse Width and High Peak Power Pumped by Tm: YAP Laser

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

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

²School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective High-energy and high-peak-power 2 μm solid-state laser plays an important role in many fields. Currently, two types of pumping source can be used to pump an Ho: YLF laser. One is the Tm doped solid-state laser, and the other is the Tm doped-fiber laser. It is known that Ho: YLF crystal has different polarized absorption characteristics in the π and σ directions. Therefore, quantitative research on the optical-optical conversion efficiencies affected by the polarization of the pump light will be remarkably significant. Electro- and acousto-optic Q-switching are two methods for realizing pulsed output of Ho: YLF laser. The former method has advantages in terms narrower-pulse-width laser output. Therefore, we demonstrate an electro-optic Q-switched Ho: YLF laser pumped by Tm: YAP laser, and a laser output with high-peak-power and narrow-pulse-width is obtained. A peak power of megawatt level is achieved at a lower pump power by adopting the technical scheme. Moreover, the laser has a compact configuration. It will potentially provide a high-quality laser source for the application of mid- and long-infrared optical parametric oscillators, laser radar, and other fields.

Methods This study develops layouts of the Ho-laser based on an end-pumped structure with L-shape resonator. The experimental device is depicted in Fig. 2. A home-made Tm: YAP solid-state laser at wavelength 1.94 μm is used as a pumping source. The dimensions of the Tm: YAP crystal are 3 mm×3 mm×12 mm, and the doping concentration (atomic fraction) is 3.0%. The Tm: YAP crystal is b-cut. The dimensions of the Ho: YLF crystal are 6 mm×6 mm×40 mm. The Ho: YLF crystal is a-cut, and the doping concentration (atomic fraction) is 0.5%. The M₄ mirror is a half-wave plate and is used to examine the effect of polarization on the output characteristics of the Ho: YLF laser. To achieve good mode matching, the size of the pump light spot is adjusted to be approximately 1.2 times the size of the Ho: YLF laser spot. We select an RbTiOPO₄ (RTP) crystal as the electro-optic Q-switch for achieving high-peak-power laser output. Further, we adopt a long-pulse Tm: YAP laser to pump the Ho: YLF crystal to obtain high beam quality while the output energy is adjusted. To study the effect of different pump pulse energy on the characteristics of the laser output, the laser beam quality factors are measured using the knife-edge method.

Results and Discussions The Ho: YLF crystal is pumped by a linear-polarized Tm: YAP solid state laser with a power of 30.2 W. Under continuous-wave operation, the central wavelength of Ho: YLF laser is 2.06 μm, and the beam quality factors are 1.3 and 1.2 in the horizontal and vertical directions, respectively. The spot sizes at different positions and beam shape are shown in Fig. 6. A half-wave plate is placed after the Tm: YAP laser, which is used to change the polarized direction of the pump light. As the proportion of the pump laser in the direction of π polarization changes from 100% to 0, the optical-to-optical conversion efficiency changes from 28.9% to 7.1%. This indicates that the efficiency can be significantly improved by adopting linearly-polarized pumping light. The experimental results are shown in Fig. 7. Based on electro-optical Q-switching technology, a pulse laser output is obtained when the Tm: YAP laser power is 15.4 W and repetition frequency is 100 Hz. The maximal output energy is 9.5 mJ, with a pulse width of 13.0 ns, and peak power is 0.73 MW. The pulse waveform and change of pulse energy with the pump energy are shown in Fig. 8.

Conclusions In this study, an Ho:YLF solid-state laser and the corresponding Tm:YAP pump laser are built, and a pulsed laser with peak megawatt power at 100 Hz is realized. The effect of the polarized characteristics of the pump source on the output characteristics of the Ho:YLF laser is studied; the results indicate that linear-polarized light pumping is an effective manner to improve the optical-to-optical efficiency of an Ho:YLF laser. The laser has the advantages of compact configuration and high-peak power and therefore has broad application prospects in the field of optical parametric oscillator pumping. Furthermore, the results of electro-optical Q-switching under long pulse pumping also provide solid foundations for Ho-doped lasers with higher energy and higher peak power.

Key words lasers; Ho:YLF lasers; high peak power; electro-optical Q-switching