

文章编号: 0258-7025(2006)06-0730-04

激光二极管双端面抽运 Tm: Ho: GdVO₄ 2 μm 激光器

王月珠, 贺万骏, 姚宝权, 鞠有伦

(哈尔滨工业大学可调谐激光国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 报道了激光二极管(LD)双端面抽运 Tm: Ho: GdVO₄ 固体激光器, 在 2.049 μm 处获得连续(CW)和准连续(QCW)激光输出。激光二极管为光纤耦合输出, 光纤芯径 400 μm, 数值孔径 0.22, 输出波长 805 nm。激光二极管额定输出功率 27.7 W, 均分为两束双端面抽运激光晶体。晶体尺寸为 4 mm × 4 mm × 7 mm, Tm, Ho 掺杂原子数分数分别为 5%, 0.5%。分析了 Tm: Ho 能级系统的主要能级跃迁和能量转换损耗。为提高激光器的输出功率和转换效率, 激光晶体采用液氮制冷。在重复频率 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 调 Q 以及连续运行模式下, 获得了 9.4~10.1 W 的激光输出, 光-光转换效率为 34%~36%。最大单脉冲能量为 1.9 mJ, 最大峰值功率为 0.13 MW。讨论了抽运光功率和重复频率对激光脉宽的影响。

关键词 激光技术; Tm: Ho: GdVO₄ 激光器; 激光二极管抽运; 转换效率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Tm: Ho: GdVO₄ Laser at 2 μm Using Laser-Diode Double-End Pumping

WANG Yue-zhu, HE Wan-jun, YAO Bao-quan, JU You-lun

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Continuous wave (CW) and quasi continuous wave (QCW) Tm: Ho: GdVO₄ solid laser at 2.049 μm using laser-diode (LD) double-end pumping is reported. The fibre-coupled LD emits a maximum power of 27.7 W at 805 nm with a fiber core diameter of 400 μm and a fiber numerical aperture of 0.22. The LD output is divided into two beams with the same power and double-end pumped the laser crystal. The crystal is co-doped with 5% Tm and 0.5% Ho in dimensions 4 mm × 4 mm × 7 mm. The spectroscopy and energy loss of the Tm: Ho system is analyzed. The crystal is cooled with liquid N₂ for improving the output power and extracted efficiency. The output power of 9.4~10.1 W is obtained at 5, 10, 20-kHz Q-switched and CW modes, corresponding to the optical-to-optical efficiency of 34%~36%. Also, the maximal energy per pulse of 1.9 mJ and the maximal peak power of 0.13 MW are obtained. Additionally, both the alteration of the pump power and that of the repetition rate influence the pulse width.

Key words laser technique; Tm: Ho: GdVO₄ laser; laser-diode pump; conversion efficiency

1 引 言

高功率人眼安全的 2 μm 激光可用于相干多普勒测风雷达、水蒸气差分吸收雷达(DIAL)、激光测距以及光电对抗等领域。另外, 纳秒脉冲 Tm: Ho 激光是 3~5 μm 光学参量振荡器(OPO)理想的抽运源^[1], 它具有量子效率和转换效率高、易于小型化和

全固化等优点。在医疗方面, 2 μm 激光处于水吸收峰附近, 是理想的高精度外科手术激光光源。

目前, 国际上主要使用 YLF^[2~5], YAG^[2,6] 和石英光纤^[7~10] 作为 Tm, Ho 双掺基质, 它们可获得功率为数瓦到上百瓦的 2 μm 激光输出。GdVO₄ 是一种新型的 Tm, Ho 双掺基质, 它有部分 YLF, YAG 基质所不具备的优越特性。首先, GdVO₄ 为单轴晶

收稿日期: 2005-10-19; 收到修改稿日期: 2006-01-09

作者简介: 王月珠(1942—), 女, 哈尔滨工业大学光子技术研究所教授, 博士生导师, 主要从事固体激光器、光学参量振荡器方面的研究。E-mail: juyul@hit.edu.cn

体,可直接实现线偏振输出,这是 YAG 基质所不具备的。其次,GdVO₄ 的抽运光吸收截面大,适用抽运源波长范围宽(792~808 nm),可以用输出波长大于800 nm的商用 AlGaAs 激光二极管(LD)作为抽运源。与 YLF 基质相比,GdVO₄ 生长技术简单,晶体成本低。此外,该基质沿<110>方向热导率高达 11.7 W/m·K,有利于降低晶体的热效应。虽然有不少的优点,但是到目前为止,国际上对 Tm: Ho: GdVO₄ 激光器的报道较少。1994 年, Morris 等^[11]首次用钛蓝宝石激光端面抽运 Tm: Ho: GdVO₄ 获得 2 μm 激光输出。当晶体吸收抽运功率 135 mW 时,获得最大输出功率 4.6 mW,对应光-光转换效率为 3.4%。2004 年, Sato 等^[12]用脉冲激光二极管侧面抽运 Tm: Ho: GdVO₄ 获得 31.2 mJ 单脉冲能量输出,其斜率效率为 14.5%。

本文报道了用激光二极管双端面抽运 Tm: Ho: GdVO₄ 固体激光器,在 2.049 μm 波长处获得了 10 W 左右连续(CW)和准连续(QCW)激光输出。

2 理论分析

2 μm Tm: Ho 激光的主要能级跃迁如图 1 所示。Tm³⁺H₆ 态粒子吸收波长 800 nm 附近的抽运光激发到 Tm³⁺H₄ 态。Tm³⁺H₄ 态粒子与其周围的 Tm³⁺H₆ 态粒子发生弛豫。Tm³⁺H₄ 态粒子向下辐射到 Tm³⁺F₄ 态,产生的光子又同时将 Tm³⁺H₆ 态粒子激发跃迁到 Tm³⁺F₄ 态,这样就产生了两个 Tm³⁺F₄ 态粒子。这个过程有 25% 左右的能量转换成晶体热。由于 Tm³⁺F₄ 态与 Ho⁵⁺I₇ 态很接近, Tm³⁺F₄ 态粒子与 Ho⁵⁺I₇ 态粒子交叉弛豫,能量发生转换。该过程是可逆的, Tm³⁺F₄ 与 Ho⁵⁺I₇ 将达到动态平衡^[13]。Ho⁵⁺I₇ 态粒子受激向 Ho⁵⁺I₈ 态辐射便产生

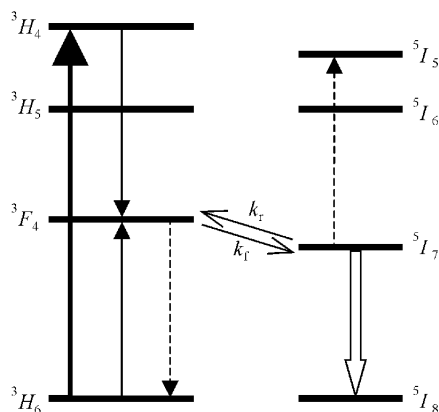


图 1 Tm: Ho 系统主要能级示意图

Fig. 1 Basic energy levels of the Tm: Ho system

了 2 μm 激光。激光的产生消耗部分 Ho⁵⁺I₇ 态粒子,打破了 Tm³⁺F₄ 态与 Ho⁵⁺I₇ 态的动态平衡,使 Tm³⁺F₄ 态粒子能量向 Ho⁵⁺I₇ 态传递。

在 Tm: Ho 系统运行过程中, Ho⁵⁺I₇ 态的上转换效应通常是不可忽略的。Tm³⁺F₄ 态粒子向下辐射,产生光子的同时激发 Ho⁵⁺I₇ 态粒子向上跃迁到 Ho⁵⁺I₅ 态。上转换作用消耗了部分 Tm³⁺F₄ 态和 Ho⁵⁺I₇ 态粒子,它是激光转换效率降低的主要原因。此外,激发态吸收、无辐射跃迁以及 Tm³⁺F₄ 态粒子上转换到 Tm³⁺H₅ 态等过程都将使激光转换效率降低。

当 Tm: Ho 晶体处于常温条件下时, Ho 激光下能级有粒子数布居, Tm: Ho 激光为准三能级系统。此时激光阈值高,上转换和热效应明显,能实现的最大连续或准连续输出功率只有 1 W 左右。而低温时(一般为液氮制冷), Ho 激光下能级处于排空状态, Tm: Ho 激光为准四能级系统。准四能级系统的 Ho⁵⁺I₇ 态粒子很容易向 Ho⁵⁺I₈ 态跃迁,上转换效应比准三能级系统弱。因此,低温条件下的 Tm: Ho 激光阈值低,转换效率高,容易实现大功率输出。为了获得十瓦以上 2 μm 激光输出,晶体采用液氮(沸点 77 K)制冷。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。抽运源激光二极管为光纤耦合输出,光纤芯径为 400 μm,数值孔径为 0.22。激光二极管额定输出功率为 27.7 W,中心波长为 805 nm。与侧面抽运方式相比,端面抽运很容易实现抽运光和振荡激光模式的良好匹配,抽取效率高^[14]。抽运光从端面输入,经晶体后的吸收效率大于 90%。采用双端抽运方式,晶体增益较单端面抽运方式均匀,可以提高激光转换效率。另外,双端抽运方式可以使激光器的热负载能力提高近一倍,从而提高激光器额定抽运功率。因此实验采用“L”

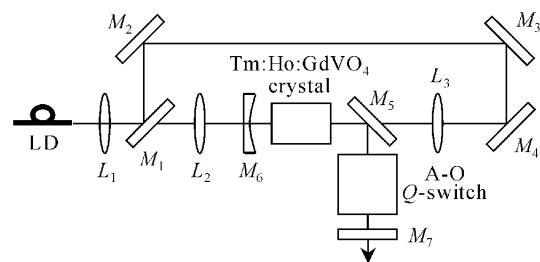


图 2 Tm: Ho: GdVO₄ 激光器实验示意图

Fig. 2 Experimental setup of the Tm: Ho: GdVO₄ laser

形谐振腔,激光二极管双端面抽运激光晶体。耦合镜 $L_1 \sim L_3$ 的焦距分别为 35 mm, 50 mm, 50 mm。 M_1 对抽运光透射率为 50%, 它将抽运光平均分成两束。 $M_2 \sim M_4$ 为抽运光全反镜。 M_5, M_6 对抽运光高透, 对 $2 \mu\text{m}$ 激光高反。激光二极管输出光经耦合系统后聚焦于晶体上, 其束腰直径均为 $570 \mu\text{m}$ 。谐振腔采用平凹腔, 腔长约 16 cm。输入镜 M_6 的曲率半径为 400 mm。输出镜 M_7 的透射率在 30%~60% 范围内改变时, 激光输出功率无明显变化。为了降低腔内激光强度, 避免低重复频率调 Q 运行时光学元件的损伤, 选用透射率为 60% 的输出镜。 $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ 晶体端面尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 长度为 7 mm。 $\text{Tm}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ 掺杂原子数分数分别为 5%, 0.5%。晶体装在紫铜热沉上, 置于杜瓦瓶内用液氮制冷。为了获得千赫兹重复频率脉冲输出, 实验使用熔融石英声光调 Q。

4 实验结果

抽运光功率为 27.7 W 时, 该激光器获得最大连续输出功率为 10.1 W, 光-光转换效率为 36% (如图 3 所示)。调 Q 运行重复频率为 5 kHz, 10 kHz 和 20 kHz 时, 激光器最大输出功率分别为 9.4 W, 9.7 W 和 9.9 W, 其光-光转换效率在 34%~36% 之间。重复频率为 5 kHz 时, $2 \mu\text{m}$ 激光单脉冲能量达 1.9 mJ, 对应最大脉冲峰值功率为 0.13 MW。 $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ 的 Ho 上能级寿命为 3 ms, 重复频率 5 kHz 以上的调 Q 运行可以认为是准连续输出。因此, 重复频率降低时, 激光输出功率下降不明显。

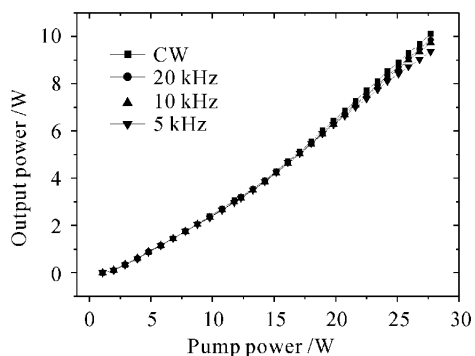


图 3 连续和不同重复频率调 Q $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ 激光器的输出功率与抽运功率关系

Fig. 3 Output power of CW and Q-switched $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ laser as a function of the pump power

重复频率一定时(10 kHz), 随着抽运功率的增

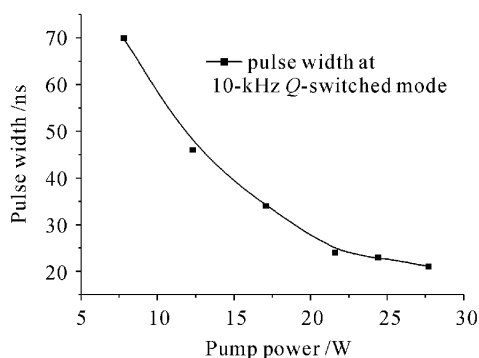


图 4 输出脉宽与抽运功率的关系

Fig. 4 Relationship between pulse width and pump power

加, Ho 上能级粒子数增加, 谐振腔的增益提高, 进而激光器输出脉宽降低。图 4 为实验测得的输出脉宽随抽运功率增加而降低的变化关系。

若保持抽运光功率不变而增大调 Q 重复频率, $\text{Tm}:\text{Ho}$ 激光单脉冲能量减少, 上能级粒子数也有所降低。因此谐振腔的增益将随着重复频率的增加而降低, 脉宽也将变宽。实验测得抽运功率为 27.7 W 时, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz 三种重复频率模式下的脉宽分别为 14 ns, 21 ns 和 40 ns。

用 WDG50-1A 型光栅单色仪 (光栅为 300 strap/mm) 测量激光输出波长。以 He-Ne 激光 632.8 nm 输出作为校准光, 得到 $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ 激光器的输出激光谱如图 5 所示。激光器输出中心波长为 2048.6 nm, 谱线半峰全宽约为 1.4 nm。

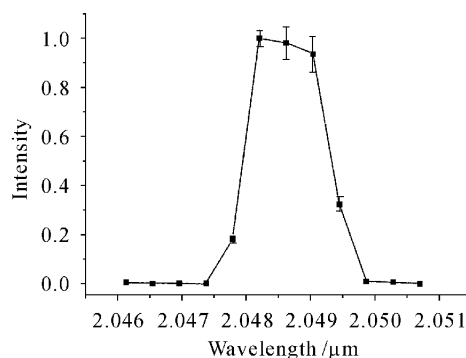


图 5 $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ 输出激光谱

Fig. 5 Spectrum of $\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ laser

5 结 论

$\text{Tm}:\text{Ho}:\text{GdVO}_4$ 是一种新型的 $2 \mu\text{m}$ 激光晶体。研究和对比了激光二极管双端面抽运该晶体的连续和脉冲激光输出特性。抽运功率为 27.7 W 时,

连续输出功率为 10.1 W, 光-光转换效率为 36%。重复频率为 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz 调 Q 运行时, 平均输出功率分别为 9.4 W, 9.7 W, 9.9 W, 脉宽分别为 14 ns, 21 ns, 40 ns。最大单脉冲能量达 1.9 mJ, 最大峰值功率为 0.13 MW。用光栅单色仪测得输出激光波长为 2.049 μm, 谱线半峰全宽约为 1.4 nm。实验还表明, 脉宽随抽运光的增强而减少。

参 考 文 献

- 1 Yao Baoquan, He Wanjuan, Li Yufeng *et al.*. Technical study of ZnGeP₂ optical parametric oscillator pumped by a 2 μm Tm, Ho³⁺: YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 39~42
姚宝权, 贺万俊, 李玉峰等. 2 μm Tm, Ho³⁺: YLF 激光抽运 ZnGeP₂ 光学参量振荡技术研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 39~42
- 2 Haim Lotem, Ychoshua Kalisky, Jacob Kagan *et al.*. A 2 μm holmium laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **24**(6): 1193~1200
- 3 B. T. McGuckin, Robert T. Menzies. Efficient CW diode-pumped Tm, Ho³⁺: YLF laser with tunability near 2.067 μm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1025~1028
- 4 P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons *et al.*. 10W mid-IR holmium pumped ZnGeP₂ OPO [J]. *Advanced Solid State Lasers*, 1998, **19**: 226~229
- 5 Niklaus U. Wetter, Paulo S. F. de Matos, Izilda M. Ranieri *et al.*. QCW-Tm³⁺: Ho³⁺: YLF laser pumped by a 20 W diode bar using a two mirror beam shaper [J]. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, 1998, **13**(4): 83~85
- 6 Tracy S. Kubo, Thomas J. Kane. Diode-pumped lasers at five eye-safe wavelengths [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1033~1040
- 7 Christian Ghisler, Willy Lüthy, Heinz P. Weber. Tuning of a Tm³⁺: Ho³⁺: silica fiber laser at 2 μm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11): 1877~1879
- 8 S. D. Jackson. 8.8 W diode-cladding-pumped Tm³⁺, Ho³⁺-doped fluoride fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(13): 821~822
- 9 S. D. Jackson, S. Mossman. High-power diode-cladding-pumped Tm³⁺, Ho³⁺-doped silica fibre laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**(5): 489~491
- 10 S. D. Jackson. High power diode-pumped triply doped fibre laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(3-4): 269~272
- 11 P. J. Morris, W. Lüthy, H. P. Weber *et al.*. Laser operation and spectroscopy of Tm³⁺: Ho³⁺: GdVO₄ [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **111**(5-6): 493~496
- 12 Atsushi Sato, Kazuhiro Asai, Kohei Mizutani. Lasing characteristics and optimizations of a diode-side-pumped Tm, Ho³⁺: GdVO₄ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8): 836~838
- 13 Zhang Xinlu, Wang Yuezhu, Yao Baoquan *et al.*. Performance of end-pumped Tm, Ho³⁺: YLF microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 9~12
张新陆, 王月珠, 姚宝权等. 纵向抽运 Tm, Ho³⁺: YLF 微片激光器激光特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 9~12
- 14 Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distributivity in a LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 390~394
宁继平, 蔡志强, 陈志强等. LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 390~394