

文章编号: 1007-6654(2012)01-0097-05

输出功率 12 W 的全固态连续单横模 1.34 μm 激光器

贾建勋, 王春香, 冯晋霞[†], 张宽收

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 设计了全固态连续单横模 1.34 μm 激光器。利用 880 nm 激光二极管双端纵向泵浦 Nd:YVO₄ 复合晶体, 在泵浦功率为 51 W 时, 获得 12.4 W 的连续单横模 1.34 μm 激光输出, 光-光转换效率达到 24.3%, 激光器长期功率稳定性优于 $\pm 1.2\%$ (3 h)。

关键词: 1.34 μm 激光; 880 nm 双端纵向泵浦; 热透镜效应

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

波长为 1.3 μm 的激光位于光纤传输的一个低色散和低损耗窗口, 因此被广泛应用于光纤传感和光纤通信等领域^[1], 1.34 μm 激光通过倍频产生的 671 nm 红光在彩色显示等方面有着非常重要的作用^[2,3]。因此, 研制 1.34 μm 激光器有着重要的应用前景。

Nd:YVO₄ 晶体具有吸收系数大, 受激发射截面大和输出为线偏振等优点, 已经成为研制全固态激光器的优良增益介质之一。目前, 大部分全固态 Nd:YVO₄ 激光器的研制工作集中在 1.06 μm 及其倍频的 532 nm 这两条谱线上^[4,5], 而有关 1.34 μm 这条谱线的研究相对较少。2005 年, 中科院物理研究所采用传统 808 nm 双端泵浦 Nd:YVO₄ 晶体的方式获得了 11 W 的 1.34 μm 激光输出^[6]; 2009 年, F. Lenhardt 等人通过 888 nm 泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, 获得了 24 W 的 1.34 μm 单横模激光输出^[7]。对于大功率抽运的固体激光器, 如何改善晶体的热效应是提高激光器输出性能的关键因素之一^[8]。因此, 本文利用 Nd:

YVO₄ 复合晶体, 采用 880 nm 直接泵浦的方式, 将 Nd³⁺ 直接泵浦到 ⁴F_{3/2} 激光上能级, 从而避免了传统的 808 nm 泵浦方式由于量子亏损所产生的热量, 减小了晶体的热负载; 同时, 我们设计了一种双端面偏振泵浦结构, 降低了晶体内的功率密度, 使得晶体内的温度分布比单端泵浦时更为均匀。通过上述改进, 激光晶体的热效应明显改善。实验中我们设计出三镜折叠激光谐振腔, 通过优化谐振腔腔长以及输出耦合镜透射率等实验条件, 在泵浦功率 51 W 时, 获得了最大输出功率达 12.4 W 的 1.34 μm 连续单横模激光输出。

1 激光晶体热焦距的理论分析及实验测量

对于激光二极管端面泵浦的固体激光器, 利用热传导方程, 通过计算出激光晶体由于内部发热和表面冷却而形成的温度梯度分布, 可以给出激光晶体的热焦距计算公式^[9]:

$$f_{th} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{\mu} dn/dT} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha L)} \right) \quad (1)$$

收稿日期: 2011-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(60878003); 国家 863 计划项目(2011AA030203)

作者简介: 贾建勋(1985—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究领域: 全固态激光技术。E-mail: 200922609005@mail.sxu.cn

[†]通信作者: E-mail: fengjx@sxu.edu.cn

其中, K_c 为晶体的热导率, ω_p 为平均泵浦光斑半径, p_{μ} 为转化为热量的泵浦功率, dn/dT 为晶体折射率的温度变化系数, α 为晶体吸收系数, L 为激光晶体长度。

我们在实验上利用如图 2 所示的由平面镜组成的谐振腔结构, 通过调节激光谐振腔, 使激光二极管泵浦的连续 Nd:YVO₄ 激光器输出 1.34 μm 激光, 并优化激光器的运转特性。在此基础上, 利用谐振腔的稳定性法^[8] 测量激光晶体在输出 1.34 μm 激光时的热透镜焦距。图 1 为激光晶体的热焦距随泵浦光功率的变化关系, 其中方块点为 880 nm 激光二极管双端泵浦 Nd:YVO₄ 晶体时的测量值, 圆点为 880 nm 激光二极管单端泵浦 Nd:YVO₄ 晶体时的测量值, 实线为利用公式(1)计算的理论预测曲线。可以看出, 实验数据和理论预测基本吻合。采用双端泵浦方式, 泵浦光被分成两束分别从晶体的两个端面注入激光晶体中, 这样, 晶体对泵浦光的吸收较单端泵浦时要更加均匀; 其次, 双端泵浦时, 从端面注入的泵浦功率约为单端泵浦时的一半, 所以激光晶体升高的温度要比单端泵浦时小很多。由图 1 可以看出, 在相同泵浦功率下, 双端泵浦时激光晶体的热效应明显降低。当双端泵浦的激光二极管的泵浦功率为 55 W、激光器输出 1.34 μm 激光时, Nd:YVO₄ 晶体的热透镜焦距为 150 mm。作为比较, 当双端泵浦的激光二极管的泵浦功率为 55 W、激光器输出 1.06 μm 激光时, Nd:YVO₄ 晶体的热透镜焦距为 400 mm^[8]。激光二极管端

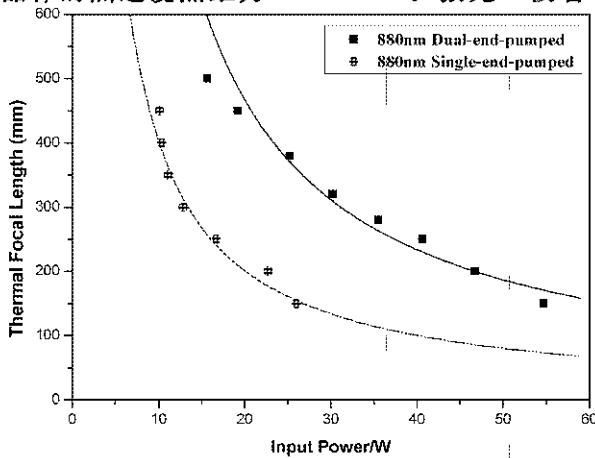


图 1 激光晶体的热焦距随泵浦光功率的变化曲线
Fig. 1 Thermal focal length versus pump power

面泵浦 Nd:YVO₄ 激光器输出 1.34 μm 激光时, Nd:YVO₄ 晶体的热效应更严重, 因此需要设计合适的激光谐振腔, 以获得高功率连续 1.34 μm 激光输出。

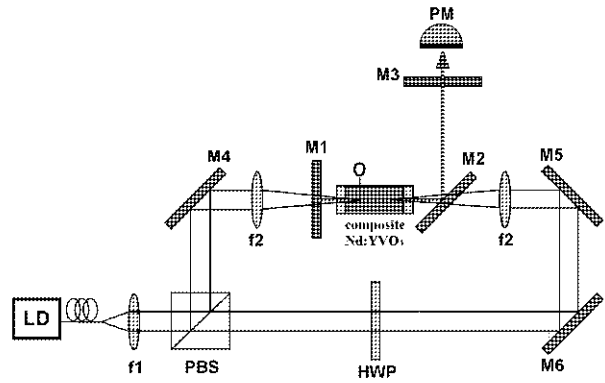


图 2 激光二极管双端泵浦 Nd:YVO₄ 激光器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of the Nd:YVO₄ laser dual-ended-pumped by LD

2 实验装置、结果及分析

图 2 是激光二极管双端端面泵浦的 1.34 μm Nd:YVO₄ 激光器的实验装置图。泵浦源采用光纤输出的中心波长为 880 nm 的激光二极管, 光纤芯径 400 μm , 最大输出功率为 60 W。泵浦光经过焦距为 30 mm 和 50 mm 的准直、聚焦透镜后端面注入激光晶体中, 泵浦光在激光晶体中的光斑半径为 330 μm 。激光晶体为两端不掺杂的复合 Nd:YVO₄ 晶体, 以克服激光晶体的端面效应, 中间掺杂部分掺杂浓度为 0.27%, 尺寸为 3 mm×3 mm×(5+17+5) mm, 晶体的两个端面分别镀 880 nm 和 1.34 μm 的减反膜 ($T_{880 \text{ nm}} > 95\%$, $R_{1.34 \mu\text{m}} < 0.2\%$), 实验中将晶体用铟膜包裹住放置在紫铜控温炉内, 可以对晶体进行良好的冷却和控温, 温度控制在 25 $^{\circ}\text{C}$, 控温仪的控温精度为 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。激光谐振腔为三镜折叠腔, M1 为平面输入耦合镜, 镀 0 $^{\circ}$ 、880 nm 和 1.06 μm 高透膜及 1.34 μm 高反膜 ($T_{880 \text{ nm} \& 1.06 \mu\text{m}} > 95\%$, $R_{1.34 \mu\text{m}} > 99.7\%$), M2 为平面输入耦合镜, 镀 45 $^{\circ}$ 、880 nm 高透膜和 1.34 μm 高反膜 ($T_{880 \text{ nm}} > 95\%$, $R_{1.34 \mu\text{m}} > 99.7\%$), M3 为平面输出耦合镜, 镀 0 $^{\circ}$ 、1.34 μm 部分反射膜 ($T_{1.34 \mu\text{m}} = 8.5\%$)。M4、M5 和 M6 镀膜均为 45 $^{\circ}$ HR@880

nm, PM 为激光功率计。L1 为腔镜 M1 到 O 点之间的距离, L2 为剩余腔长, O 点为距离晶体端面 6 mm 的位置。

利用 ABCD 矩阵理论来分析谐振腔的特性。选取腔长 L1=15 mm, 在不同腔长 L2 下, 理论计算得到的激光晶体内 O 点处的腔模光斑半径随晶体热焦距的变化关系曲线如图 3 所示。

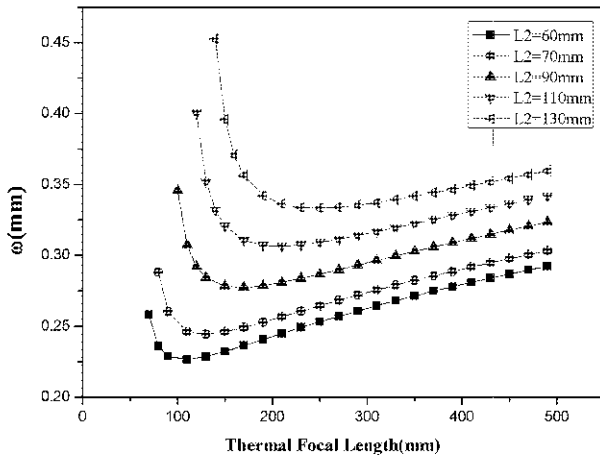


图 3 不同腔长 L2 下激光晶体处的腔模光斑半径随晶体热焦距的变化曲线

Fig. 3 Beam radius ω versus thermal focal length at different lengths of L2

从图 3 中我们可以看出, 在相同热焦距下, 随着腔长 L2 增大, O 点处的腔模光斑半径也随之增大, 因此我们可以通过改变腔长 L2 的大小来控制腔模光斑的大小, 使得晶体 O 点处的振荡光与泵浦光达到最佳的模式匹配; 同时, 在热焦距 100 mm 到 500 mm 的范围内, 热焦距对腔模光斑半径的影响较小, 表明该腔型具有良好的稳定性。

实验中, 我们分别采用对 1.34 μm 透射率为 8.5% 和 7% 的平面镜作为输出耦合镜, 研究了 1.34 μm 激光最大输出功率随腔长 L2 的变化。当腔长 L2=70 mm 时, 振荡光和泵浦光模式匹配达到最佳, 并且在输出耦合镜透射率为 8.5% 时, 1.34 μm 激光的输出功率达到最高, 实验结果如图 4 所示。

根据输出耦合镜的最佳透射率的理论计算公式^[6], 我们可以计算出激光器输出耦合镜的最佳透射率。

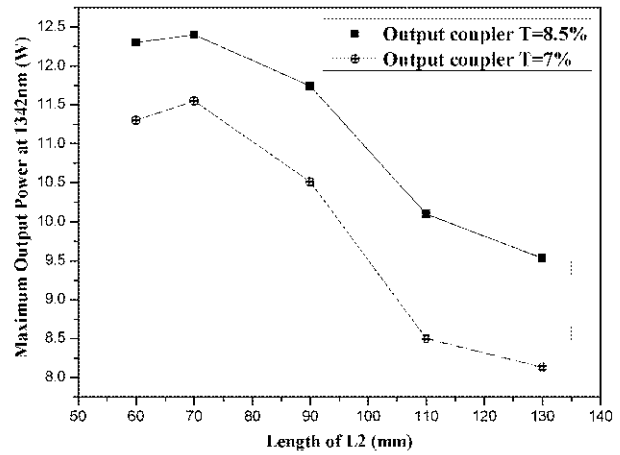


图 4 不同输出耦合镜透射率下 1.34 μm 激光最大输出功率随腔长 L2 的变化曲线

Fig. 4 Maximum 1.34 μm laser output versus different lengths of L2 and output coupler transmissions

$$T_{opt} = L(\sqrt{2g_0l/L} - 1) \quad (2)$$

其中, L 为内腔损耗, l 为增益介质的长度, g₀ 为小信号增益系数。根据 Findlay-Clay 方法^[10], 实验确定 $L = 2.5 \times 10^{-3}$, $g_0 = 0.2$ 。理论计算得到输出耦合镜的最佳透射率为 12.8%。在前面的实验中, 输出透射率为 8.5% 的输出耦合镜更接近最佳透射率, 激光输出性能更好。

图 5 为 L2=70 mm, 输出耦合镜透射率为 8.5% 时 1.34 μm 激光器的输入输出功率特性曲线。图中方块数据点为实验测量值, 实线为基于四能级激光系统空间速率方程理论、考虑到热致衍射损耗所得到的计算结果^[11], 实验结果和理论预测基本吻合。从图中我们可以看到, 在泵浦功率低于 35 W 时, 激光器的输出功率基本呈线性增长。但是随着泵浦功率的增加, 晶体的热效应逐渐严重, 从而导致激光器输出功率增长趋于平缓。当泵浦功率为 51 W 时, 1.34 μm 连续单横模激光器的最大输出功率达 12.4 W。

我们采用功率计 (coherent, LabMax-Top/LM-45 HTD) 对激光器输出功率稳定性进行了测量。当 LD 泵浦功率为 50 W, 激光晶体温度为 25℃, 1.34 μm 激光输出功率达 12.25 W。图 6 所示为在该状态下, 测量得到的激光器的输出功率稳定性, 3 个小时内激光器稳定运转, 功率稳定

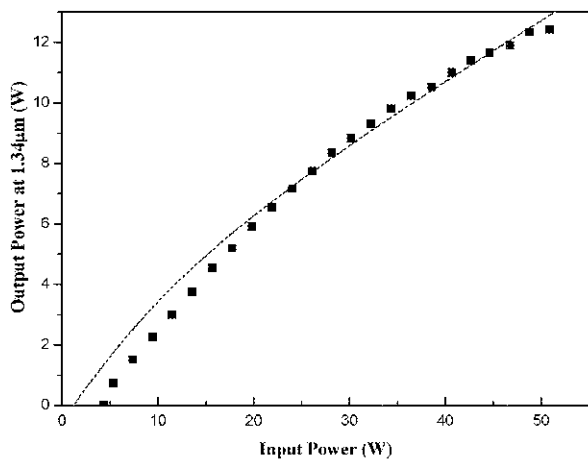


图 5 1.34 μm 激光输出功率随泵浦功率的变化曲线
Fig. 5 1.34 μm laser output versus input power

性优于 ±1.2%。

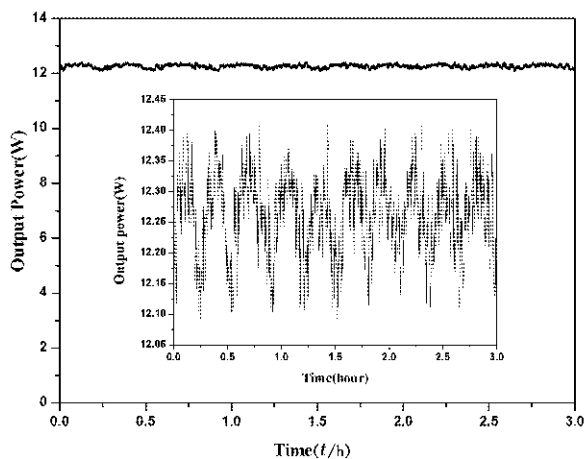


图 6 激光器功率稳定性
Fig. 6 Stability of the laser output

采用光束质量分析仪 (DataRay, BMS2-4XY) 来监视其输出激光光斑模式。如图 7 所示,当 1.34 μm 激光输出功率达到 12.25 W 时,激光光斑在两个垂直方向的强度分布都呈标准的高斯分布;输出激光光斑在水平方向的 $M_x^2=1.12$,在垂

直方向的 $M_y^2=1.20$ 。

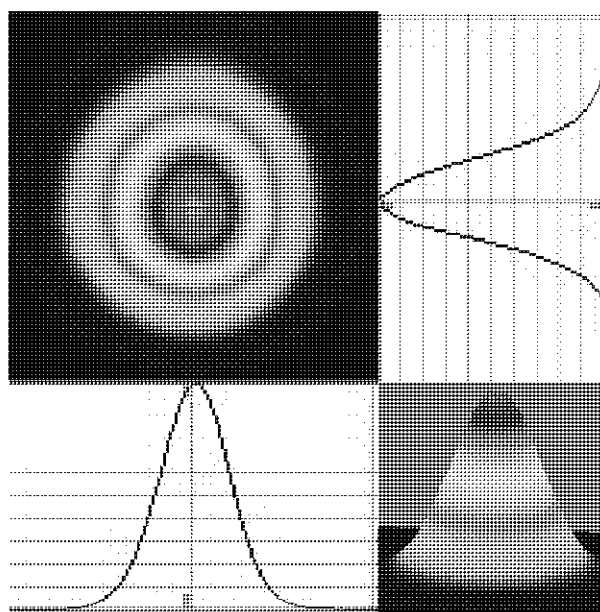


图 7 输出激光光斑强度分布
Fig. 7 Intensity distribution of the output beam

3 总结

在研究激光二极管端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光器输出 1.34 μm 激光时、Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应的基础上,我们设计了三镜折叠激光谐振腔,通过优化谐振腔腔长以及输出耦合镜透射率等实验条件,在泵浦功率 51 W 时,获得了最大输出功率达 12.4 W 的 1.34 μm 连续单横模激光输出,光-光转换效率达到 24.3%。激光器 3 小时内的输出功率稳定性优于 ±1.2%,实验测得输出激光的中心波长为 1342.4 nm,光束质量因子小于 1.2。该激光可用于产生波长位于光通信波段的量子纠缠光源,也可以通过倍频过程产生 671 nm 红光用于彩色显示等领域。

参考文献:

[1] 何兴仁. 半导体激光发展现状与趋势 [J]. 光电子技术与信息, 1999, 12(4): 14-19.
 [2] YAO Ai-yun, HOU Wei, XU Zu-yan. High Power Red Laser at 671 nm by Intracavity-doubled Nd:YVO₄ Laser Using LiB₃O₅ [J]. Optics Communication, 2004, 231: 413-416.
 [3] ZHENG Q, WANG J Y, ZHAO L. 2.23 W Diode-pumped Nd:YVO₄/LBO Laser at 671 nm [J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36: 485-487.
 [4] LIU Jian-li, WANG Zhi-yong, LI Hong, et al. Stable, 12 W, Continuous-wave Single-frequency Nd:YVO₄ Green Laser Polarized and Dual-end Pumped at 880 nm [J]. Opt Express, 2011, 19: 6777-6782.

- [5] XI Wen-qiang, ZHAO Jing-yun, ZHANG Kuan-shou. A High-Power Continuous-Wave Laser-Diode End-Pumped Nd: YVO₄ Laser of Single-frequency Operation [J]. *Chin Phys Lett*, 2005, **22**: 1144-1147.
- [6] YAO Ai-yun, HOU Wei, KONG Yu-peng, *et al.* Double-end-pumped 11-W Nd: YVO₄ cw Laser at 1342 nm [J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, **22**: 2129-2133.
- [7] LENHARDT F, NITTMANN M, BAUER T, *et al.* High-power 888-nm-pumped Nd: YVO₄ 1342-nm Oscillator Operating in the TEM₀₀ Mode [J]. *Appl Phys B*, 2009, **96**: 803-807.
- [8] 王志勇, 李晓青, 焦月春, 等. 激光二极管端面纵向泵浦 Nd: YVO₄ 激光器的热效应研究 [J]. *量子光学学报*, 2011, **17**(2): 158-161.
- [9] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, *et al.* Thermal Modeling of Continuous-wave End-pumped Solid-state Lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**: 1831-1833.
- [10] FINDLAY D, CLAY R A. The Measurement of Internal Losses in 4-level Lasers [J]. *Phys Lett*, 1996, **20**: 277-278.
- [11] 赵晶云. LD 双端端面泵浦的高功率连续单频 Nd: YVO₄ 激光器 [D]. 山西大学硕士毕业论文, 2004: 21.

12 W All-solid-state CW Nd: YVO₄ TEM₀₀ Laser at 1.34 μm

JIA Jian-xun, WANG Chun-xiang, FENG Jin-xia, ZHANG Kuan-shou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We reported a CW Nd: YVO₄ TEM₀₀ laser operating at 1.34 μm pumped by 880 nm laser diode. Maximum output power of 12.4 W is obtained under pump power of 51 W, with optical-to-optical conversion efficiency of 24.3%. The stability of the laser output is better than $\pm 1.2\%$ in the given three hours.

Key words: 1.34 μm laser; dual-end-pumped at 880 nm; thermal lensing effect