

文章编号: 1007-6654(2013)01-0076-05

输出功率 5.2 W 的全固态连续单横模 671 nm 红光激光器

王春香, 杨小平, 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 671 nm 红光激光器。利用 880 nm LD 双端面泵浦 Nd:YVO₄ 复合晶体, 实现了均匀泵浦并改善了激光晶体热效应; 考虑到影响倍频转化效率的各种因素, 优化设计了 Z 字形四镜激光谐振腔, 采用 I 类临界相位匹配晶体 LBO 作为腔内倍频晶体; 当泵浦功率为 42.5 W 时, 获得了 5.2 W 的连续单横模 671 nm 红光输出, 光-光转化效率达到 12.2%, 激光器长期功率稳定性优于 ±2.5% (1 h)。

关键词: 671 nm 红光激光器; 单横模; LD 双端直接泵浦; 倍频转化效率

中图分类号: O431 文献标识码: A doi: 10.3788/ASQO20131901.0076

0 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态红光激光器具有体积小、输出功率高、光束质量好、使用寿命长, 在彩色显示、激光医疗以及替代价格昂贵的氦离子激光器泵浦 Cr:LiSAF 实现自锁模可调谐超快脉冲输出等领域有着广阔的应用前景^[1-2], 引起了人们广泛的关注。目前已获得的全固态红光激光器输出功率普遍都较低, 无法满足实际需求。因此, 研制一台全固态高功率红光激光器就显得尤为重要。

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, 是研制全固态激光器的优良晶体之一^[3-4]。利用该晶体的 1.34 μm 发射谱线、并通过倍频非线性转换, 是获得全固态红光激光器的一种有效途径。2010 年, 德国的 F. Lenhardt 等人在获得 1.3 μm 基频光后单次穿

过周期极化晶体 MgO:PPLN, 获得了 9.5 W 的 TEM₀₀ 模红光输出^[5]。2005 年, 北京中科院的实验小组采用双端面泵浦技术, 通过内腔倍频 II 类非临界相位匹配晶体 LBO, 获得了 3.38 W 的单横模 671 nm 红光输出^[6]。2010 年, 长春理工大学的实验小组采用 880 nm LD 直接泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, 腔内插入 I 类临界相位匹配晶体 LBO, 获得了 5.5 W 单横模红光输出^[7]。迄今为止, 还没有看到采用双端面直接泵浦技术获得红光输出的相关报道。

对于全固态高功率激光器, 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]。本文通过采用 880 nm LD 双端面偏振泵浦 Nd:YVO₄ 复合晶体, 有效地减小了激光晶体的热负载、并使激光晶体更加均匀吸收泵浦光。与此同时, 我们考虑到影响倍频转化效率的

收稿日期: 2012-11-09

基金项目: 科技部国家重大科学仪器设备专项(2011YQ03012703); 国家自然科学基金(61227015; 61121064)

作者简介: 王春香(1988—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究领域: 全固态激光技术。E-mail: chunxiangwang0524@163.com

通信作者: E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

因素,设计了 Z 字形四镜折叠腔,通过优化激光器各项参数,获得了输出功率高达 5.2 W 的 671 nm 单横模红光。

1 实验装置

图 1 为全固态红光激光器实验装置图。泵浦源是由德国 LIMO 公司生产的、光纤耦合输出的激光二极管,其中心波长为 880 nm、最大输出功率为 60 W,光纤芯径为 400 μm 。泵浦光经过焦距为 30 mm 的透镜(f_1)准直后,经过偏振分束装置及焦距为 50 mm 的透镜聚焦(f_2)从晶体两端面注入激光晶体中。

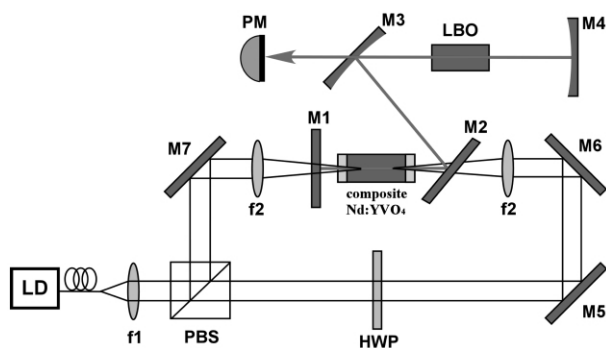


图 1 全固态红光激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of all-solid-state red laser

激光谐振腔为四镜 Z 字形折叠腔, M1 和 M2 为平面输入耦合镜。其中, M1 镀 880 nm 和 1.06 μm 高透膜以及 1.34 μm 高反膜 ($T_{880\text{ nm}\& 1.06\ \mu\text{m}} > 95\%$, $R_{1.34\ \mu\text{m}} > 99.8\%$), 镀 1.06 μm 高透膜是为了抑制 1.06 μm 激光在谐振腔中起振。M2 镀 45° 1.34 μm 高反膜和 880 nm 高透膜 ($R_{1.34\ \mu\text{m}} > 99.8\%$, $T_{880\text{ nm}} > 95\%$)。M3 和 M4 均为曲率半径 $R=100\text{ mm}$ 的平凹镜。M3 为输出耦合镜, 镀 1.34 μm 高反膜及 671 nm 高透膜 ($R_{1.34\ \mu\text{m}} > 99.8\%$, $T_{671\text{ nm}} > 95\%$); M4 镀 1.34 μm 和 671 nm 双高反膜 ($R_{1.34\ \mu\text{m}\& 671\text{ nm}} > 99.8\%$); M5、M6 和 M7 均镀 45° 880 nm 高反膜。激光晶体中心到 M1 之间的距离为 L_1 , 晶体中心经 M2 到 M3 之间的距离为 L_2 , 两平凹镜 M3、M4 之间的距离为 L_3 。我们将根据理论计算和实验优化来确定 L_1 -

L_3 的数值,以满足泵浦模式匹配和最佳倍频条件。

为了减小热效应,激光晶体选用低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 复合晶体,尺寸为 3 mm × 3 mm × (5 + 17 + 5) mm,中间部分 Nd³⁺ 掺杂浓度为 0.27%,晶体两端面均镀 880 nm 和 1342 nm 减反膜 ($R_{880\text{ nm}} < 3\%$, $R_{1342\text{ nm}} < 0.2\%$);倍频晶体选取 I 类临界相位匹配切割 ($\theta = 86.1^\circ$, $\phi = 0^\circ$) 的 LBO 晶体,尺寸为 3 × 3 × 18 mm³,晶体两端面皆镀 1342 nm 和 671 nm 减反膜 ($R_{1342\text{ nm}} < 0.2\%$, $R_{671\text{ nm}} < 0.5\%$)。实验中,将晶体 Nd:YVO₄ 和 LBO 放置于紫铜控温炉内,控温仪驱动制冷器对其进行控温,控温温度分别为 25℃ 和 27℃,控温精度为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。在实验中,用相干公司生产的激光功率计(型号为 Coherent, LabMax-Top/LM-45 HTD)测量激光器的输出功率。

2 最佳倍频理论分析

在高斯光束二次谐波的产生过程中,倍频光的转化效率 η_{SHG} (即倍频光与基频光功率之比) 可以表示为:

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \frac{8\pi^2 l^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1^2 n_2 \lambda_1^2 \epsilon_0} \frac{P_{\omega}}{\pi \omega_0^2} \left[\frac{\sin(\Delta k l / 2)}{\Delta k l / 2} \right]^2 \quad (1)$$

其中, $P_{2\omega}$ 为倍频光功率, P_{ω} 为基频光功率, l 为非线性介质的长度, d_{eff} 为有效非线性系数, n_1 、 n_2 分别为基频光和倍频光在非线性晶体中的折射率, λ_1 为基频光波长, c 为真空光速, ϵ_0 为真空介电常数, ω_0 为基频光腰斑半径, Δk 为相位失配因子: $\Delta k = 2k(\omega_1) - k(\omega_2)$ 。从式(1)中可以看出,当基频光波长和倍频晶体确定后,倍频转化效率仅与相位失配因子 Δk 和基频光在倍频晶体中的光功率密度有关系。

为满足最佳倍频转换,首先要实现相位匹配,即满足 $\Delta k = 0$ 。实验中,我们采用 I 类临界相位匹配晶体 LBO 作为内腔倍频晶体,通过控制相位匹配角度以及倍频晶体的温度来实现相位匹配。其次,为获得高的倍频转化效率,需通过合理设计谐振腔结构,令倍频晶体处的光斑大小使得聚

焦因子满足^[9]：

$$1 < \xi = \frac{l}{b} = \frac{l}{2\pi n_1 \omega_0^2 / \lambda_1} < 7 \quad (2)$$

式中， l 为非线性晶体长度， b 为共焦参数， n_1 为倍频晶体对基频光的折射率， ω_0 为倍频晶体处基频光束腰半径， λ_1 为基频光波长。实验中的倍频晶体长度为 18 mm，将各参数代入上式，可计算出倍频晶体处光斑半径应在 18.5 μm ~49 μm 范围内。

3 谐振腔的设计

为了选择合适的谐振腔参数，我们首先采用谐振腔的稳定性法测量了激光晶体在输出 1.34 μm 激光时的热透镜焦距^[10]，当采用 880 nm LD 双端面泵浦时，在泵浦功率为 42.5 W 时，晶体的热焦距大约为 250 mm。在谐振腔的设计过程中，我们将激光晶体等效为一个焦距为 250 mm 的薄透镜。

我们利用 ABCD 传输矩阵理论计算了在腔长 $L_1=20$ mm, $L_2=212$ mm 的条件下，激光晶体处和倍频晶体处振荡光斑半径以及谐振腔稳定性系数随腔长 L_3 的变化曲线，结果如图 2 所示。

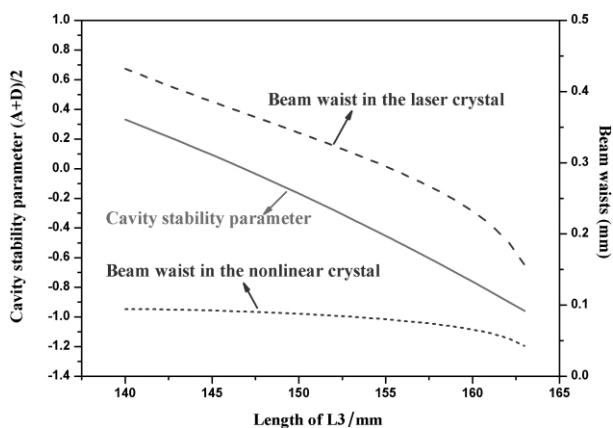


图 2 激光晶体处和倍频晶体处振荡光斑半径及谐振腔稳定性系数随腔长 L_3 的变化关系

Fig. 2 Beam waists in crystals and the cavity stability parameter versus the length of L_3

根据上述的理论分析，我们在设计谐振腔时尽量使得倍频晶体处的振荡光斑半径足够小，从

而增大内腔功率密度，以达到提高倍频效率的目的；同时还需要兼顾模式匹配以及谐振腔稳定性等因素。结合实验，最终确定了谐振腔腔长为： $L_1=20$ mm, $L_2=212$ mm, $L_3=159$ mm。此时，倍频晶体处的振荡光斑半径为 69 μm ，泵浦模式交叠率为 0.75，谐振腔的稳定性系数为 -0.7。从图 3 中看出，若要使倍频晶体处振荡光斑半径落在理论计算值 18.5 μm ~49 μm 范围内，那么谐振腔的稳定性就会很差，在此我们选择了较为接近此范围又能保证谐振腔稳定运转的腔型。

4 实验结果与分析

图 3 所示为 671 nm 激光器的输入输出特性曲线。图中方块点为实验测量值，当泵浦光功率 42.5 W 时，671 nm 红光激光器的连续单横模激光输出功率为 5.2 W。图中实线为考虑到谐振腔内基频光功率随泵浦光功率的变化为线性关系，而非线性晶体内倍频光功率随基频光功率密度的变化为平方关系所得到的理论拟合曲线，实验结果和理论拟合基本吻合。

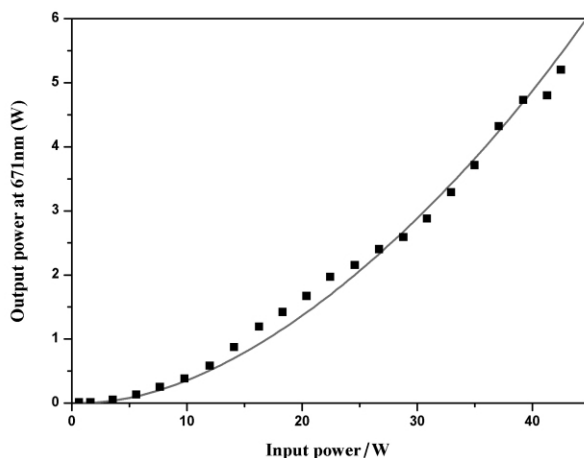


图 3 671 nm 红光激光器的输出功率曲线

Fig. 3 Output power at 671 nm versus input power

当 671 nm 红光激光的输出功率为 4.9 W，用功率计监视了激光器的长期功率稳定性，如图 4 所示。可以看出，激光器在 1 h 内稳定运转，功率稳定性优于 $\pm 2.5\%$ 。

同时，在该状态下我们采用光束质量分析仪

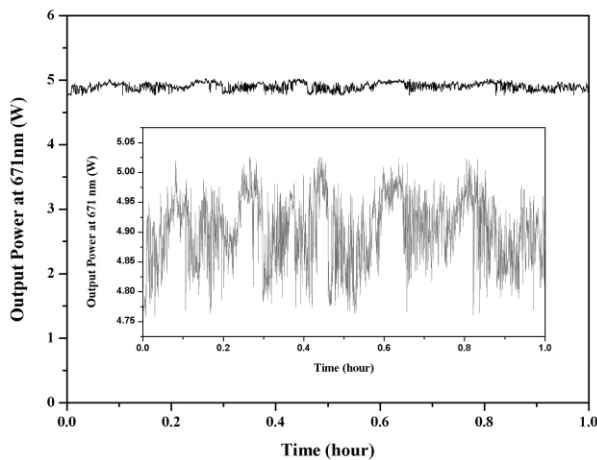


图 4 激光器长期功率稳定性曲线
Fig. 4 Stability of the laser output

(型号为: DataRay, BMS2-4XY) 对红光输出光斑质量进行了测量, 如图 5 所示。可以看出光斑在两个方向的强度分布均呈标准的高斯分布, 测得的水平和垂直方向的 M^2 因子分别为 $M_x^2 = 1.98$, $M_y^2 = 1.94$ 。

5 总结

为了提高激光器内腔倍频转化效率, 本文从满足泵浦模式匹配、最佳倍频条件及谐振腔稳定性条件出发, 优化设计出 Z 字形四镜折叠腔结

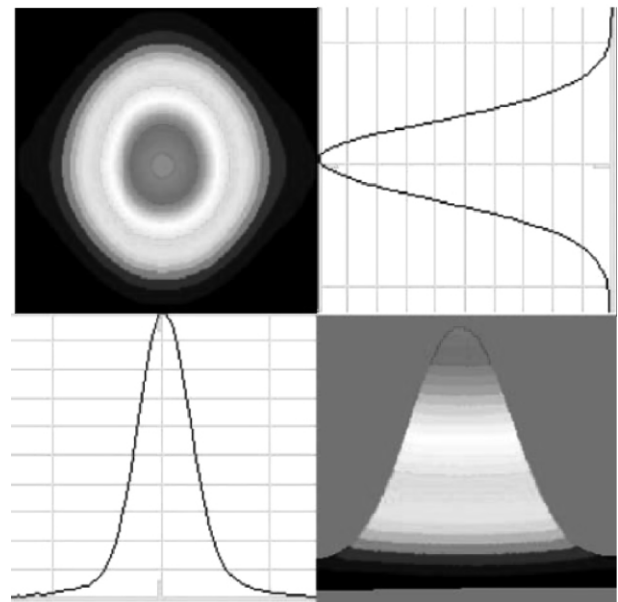


图 5 激光器输出光斑强度分布
Fig. 5 Intensity distribution of the output beam

构。采用 880 nm LD 双端端面偏振泵浦 Nd:YVO₄ 复合晶体, 并通过 LBO 内腔倍频, 获得了高效、稳定的连续单横模 671 nm 红光激光器。当泵浦功率为 42.5 W 时, 激光器最大输出功率为 5.2 W, 光-光转化效率达到 12.2%。激光器在 1 h 内功率稳定性优于 $\pm 2.5\%$ 。该激光器可应用于激光彩色显示、激光医学等领域。

参考文献:

- [1] ANTONIO AGNESI, ANNALISA GUANDALINI, GIANCARLO REALI. Efficient 671-nm Pump Source by Intracavity Doubling of a Diode-pumped Nd:YVO₄ Laser [J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, **19**: 1078-1082.
- [2] ZHOU Rui, DING Xin, WEN Wu-qi, *et al.* High-Power Continuous-Wave Diode-End-Pumped Intracavity Frequency Doubled Nd:YVO₄ Laser at 671 nm with a Compact Three-element Cavity [J]. *Chin Phys Lett*, 2006, **23**: 849-851.
- [3] ZHANG Yu-ping, ZHENG Yi, ZHANG Hui-yun, *et al.* Efficient and High-power Laser-diode Single-end-pumped Nd:YVO₄ Continuous Wave Laser at 1342 nm [J]. *Chinese Physics*, 2006, **15**: 2018-2021.
- [4] DING X, ZHANG H, WANG R, *et al.* High-efficiency Direct-pumped Nd:YVO₄ Laser Operating at 1.34 μm [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(15): 1247-1252.
- [5] LENHARDT F, NEBEL A, KNAPPE R, *et al.* Efficient Single-pass Second Harmonic Generation of a Continuous Wave Nd:YVO₄-Laser at 1342nm Using MgO:PPLN[R]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2010.
- [6] YAO Ai-yun, HOU Wei, BI Yong, *et al.* High-power cw 671 nm Output by Intracavity Frequency Doubling of a Double-end-pumped Nd:YVO₄ Laser [J]. *Appl Opt*, 2005, **44**: 7156-7160.
- [7] LÜ Yan-fei, ZHANG Xi-he, XIA Jing, *et al.* High-efficiency Direct-pumped Nd:YVO₄-LBO Laser Operating at 671 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**: 522-525.

- [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] BOYD G D, KLEINMAN D A. Parametric Interaction of Focused Gaussian Light Beams [J]. *J Appl Phys*, 1968, **39**: 3597-3639.
- [10] 贾建勋, 王春香, 冯晋霞, 等. 输出功率 12 W 的全固态连续单横模 1.34 μm 激光器 [J]. 量子光学学报, 2012, **18**(1): 97-101.

5.2 W All-solid-state CW TEM₀₀ Red Laser at 671 nm

WANG Chun-xiang, YANG Xiao-ping, 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: An all-solid-state CW TEM₀₀ red laser at 671 nm is designed and reported in this paper. By the way of Nd:YVO₄ composite crystal dual-end-pumped by a laser diode at the central wavelength of 880 nm, the thermal effect of the gain medium is reduced. The Z shape four-mirror folded cavity is designed to improve the frequency-doubling efficiency. Using a type-I critical phase-matching LBO as the intracavity frequency doubler, the maximum output power of 5.2 W is obtained under pump power of 42.5 W with an optical-to-optical conversion efficiency of 12.2%. The stability of the laser output is better than ±2.5% in the given one hour.

Key words: 671 nm red laser; TEM₀₀ mode; dual-end-pumped at 880 nm; frequency-doubling efficiency