

# 抽运波长对连续单频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器输出特性的影响

尹祺巍 卢华东

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

**摘要** 实验研究了抽运源抽运波长对激光器输出功率的影响。当抽运源的抽运波长为 808 nm 时, 单频 1064 nm 激光的输出功率最高只有 20 W, 而当抽运源的抽运波长为 888 nm 时, 单频 1064 nm 激光的输出功率可以提升至 33.7 W。通过在腔内插入倍频晶体引入非线性损耗, 激光器实现了稳定的单纵模运转。激光器的长期功率稳定性优于  $\pm 0.51\%$ ,  $M^2$  因子优于 1.1。

**关键词** 激光器; 单频; 抽运波长; 输出功率

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.091402

## Influence of Wavelength of Pump Source on Output Power of 1064 nm Laser

Yin Qiwei Lu Huadong

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

**Abstract** The influence of pump wavelength on output power of 1064 nm laser is experimentally investigated. When the wavelength of pump source is 808 nm, the maximal output power of laser is only 20 W. However, when the wavelength of pump source is 888 nm, the maximum output power of 1064 nm laser can reach up to 33.7 W. In that case, the laser can work with single-longitudinal-mode owing to the nonlinear loss induced by the frequency doubling crystal in the resonator. The measured long term power stability and  $M^2$  are better than  $\pm 0.51\%$  and 1.1, respectively.

**Key words** lasers; single frequency; pump wavelength; output power

**OCIS codes** 140.3530; 140.3560; 140.3570; 140.3580; 140.6810

## 1 引言

全固态连续单频 1064 nm 激光器因其具有强度噪声低、相干性好、光束质量高等优点而得到广泛应用, 既可以用作光参量振荡器(OPO)的抽运源以扩展激光的波长<sup>[1]</sup>, 还可以应用于冷原子物理<sup>[2]</sup>, 量子光学和量子通信<sup>[3]</sup>以及引力波的探测<sup>[4]</sup>等领域。随着科学研究的深入, 科学工作者对 1064 nm 激光的输出功率提出了更高的要求, 而激光器输出功率的提高, 使得人们更加深入地研究激光晶体的热效应对激光器输出功率和光束质量等方面的影响, 从而提出了许多措施来缓解激光晶体的热效应, 如优化抽运光的模式尺寸<sup>[5]</sup>, 采用复合晶体<sup>[6]</sup>, 降低掺杂浓度<sup>[7]</sup>, 采用双端抽运<sup>[8-9]</sup>等技术。近年来, 一些研究小组使用直接抽运方式减小激光晶体的热效应<sup>[9-13]</sup>, 从而提高激光器的输出功率。到目前为止, 美国相干公司可以提供输出功率为 25 W 的连续单频 1064 nm 激光器<sup>[14]</sup>, 为了获得稳定的单纵模输出, 他们在谐振腔内插入一块倍频晶体, 通过引入非线性损耗实现了激光器稳定的单纵模运转。其次就是 Innolight GmbH 提供的输出功率达 55 W 的单频 1064 nm 激光器<sup>[15]</sup>, 其输出线宽只有 1 kHz。本课题组在研究连续单频 1064 nm 激光器的过程中提出了激光器单纵模

收稿日期: 2015-03-01; 收到修改稿日期: 2015-04-02; 网络出版日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61405107, 61227015, 61227902)、山西省自然科学基金(2014021011-3)、山西省高校科技开发项目(2013104)

作者简介: 尹祺巍(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态高功率激光器器件方面的研究。

E-mail: yinqiweiouc@126.com

导师简介: 卢华东(1981—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事量子光学及光量子器件方面的研究。

E-mail: luhuadong@sxu.edu.cn(通信联系人)

稳定运转的物理条件,通过对线性损耗和非线性损耗的优化,实现了连续单频 1064 nm 激光器的高效稳定运转<sup>[16]</sup>。在此基础上,通过更换输出耦合镜的透射率以及操控非线性晶体的相位匹配温度,获得了不同输出功率的双波长 1064/532 nm 激光器<sup>[17]</sup>。本文实验上比较了不同的抽运波长对激光器输出功率的影响,进一步证明了直接抽运可有效提高激光器的输出功率。

## 2 实验装置

实验设计了如图 1 所示的单端抽运 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub>激光器。抽运源均是德国 LIMO 公司生产的光纤耦合输出半导体激光器(LD),其中一只输出波长为 888 nm,输出功率为 80 W(LIMO80-F400-DL888-EX1458),光谱半峰全宽(FWHM)为 3.5 nm;另一只输出波长为 808 nm,输出功率为 50 W(LIMO50-F400-DL808-EX1514),光谱 FWHM 为 2 nm,每只 LD 光纤直径和数值孔径均为 400 μm 和 0.22。LD 输出的激光经由焦距 30 mm 和 80 mm 的平凸镜  $f_1$ ,  $f_2$  组成的耦合系统准直聚焦后注入到激光器谐振腔中。谐振腔采用的是四镜八字环行腔,包括两平凸镜  $M_1$  和  $M_2$  以及两平凹镜  $M_3$  和  $M_4$ 。其中,  $M_1$  为输入镜,凸面曲率半径为 1500 mm,镀有抽运光高透和 1064 nm 高反膜;  $M_2$  的凸面曲率半径同样为 1500 mm,镀有 1064 nm 高反膜;  $M_3$  为平凹镜,凹面曲率半径为 100 mm,镀有 1064 nm 高反膜;  $M_4$  为输出镜,凹面曲率半径同样为 100 mm,对 1064 nm 的透射率为 19%。谐振腔内插入了增益介质,倍频晶体和光学单向器。其中,增益介质采用的是 a 轴切割的楔形复合 YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> 单轴双折射晶体, c 轴垂直于晶体棒的轴线。当抽运源的抽运波长为 808 nm 时,晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm+3 mm×3 mm×20 mm,掺杂部分的长度为 20 mm,而当抽运源的抽运波长为 809 nm 时,晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm+3 mm×3 mm×15 mm,掺杂部分的长度为 15 mm。激光晶体的两端面分别镀有 1064 nm 和抽运波长减反膜。晶体由铝箔包覆并置于紫铜控温炉内。采用热电制冷器进行温度控制,热电制冷器的热沉由通有冷却循环水的紫铜块充当。增益晶体的后端面均有一个 1.5°的楔角作为偏振分束器。根据双折射原理,偏振方向不同的光在谐振腔内的传播路径不同,这样相互正交的两个偏振方向的光只有一个能在腔内谐振,而另一个会因为几何损耗较大而被抑制,从而有效地阻止了激光器输出激光偏振方向的改变<sup>[18]</sup>,进而提高激光器输出功率的稳定性。此外,激光晶体的 c 轴水平放置,使得其在子午面和弧矢面内热透镜焦距不同而产生的像散可有效补偿谐振腔中离轴放置的腔镜所引入的像散,进一步扩大了激光器的工作稳区,使得激光器更加稳定高效地运转<sup>[19]</sup>。为了使激光器单向运转,在谐振腔内插入由永磁体包裹的 TGG 晶体和半波片(HWP)组成的光学单向器。为了实现激光器的长期稳定单纵模运转,将一非线性晶体 LBO 插入谐振腔内进而引入非线性损耗,LBO 晶体采用 I 类非临界相位匹配,尺寸为 3 mm×3 mm×18 mm,被放置在控温精度为 0.1 K 的自制控温炉中。

输出的激光经  $M_5$  分束镜后将 1064 nm 基频光和 532 nm 倍频光分开,1064 nm 基频光一部分经  $M_6$  和  $M_7$  反射及  $f_3$  聚焦后注入到自由光谱范围为 750 MHz 的法布里-珀罗(F-P)干涉仪中以监视激光器的频率特性,另一部分经  $M_8$  和  $M_9$  反射后注入到光束质量分析仪中测量基频光的光束质量。其余注入功率计探头中用于测量基频光的输出功率及其稳定性。532 nm 倍频光一部分经  $M_{10}$ 、 $M_{11}$  和  $M_{12}$  反射后注入到光束质量分析仪 M-200 中进行横模的模式测量,其余倍频光同样注入功率计探头中用于测量其输出功率及稳定性。

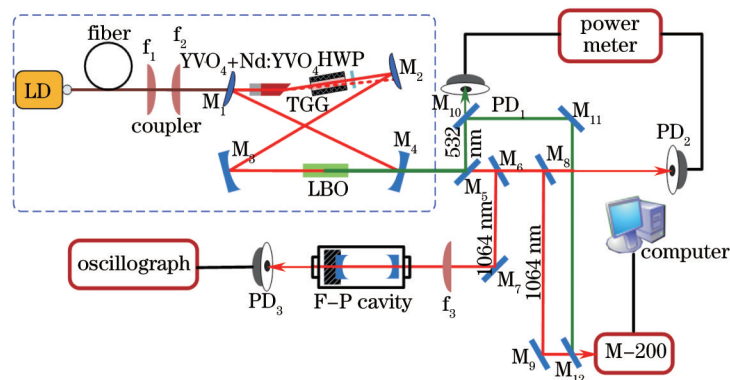


图 1 连续单频 1064 nm 激光器实验装置图

Fig.1 Schematic of continuous wave single-frequency 1064 nm laser

### 3 实验结果

当激光器稳定运转后,测量了不同抽运波长时,激光器在不同抽运功率下的输出功率。如图2所示,当抽运波长为808 nm时,激光器的阈值抽运功率为22 W。当抽运光为44.5 W时,被增益晶体吸收的抽运光为44.4 W,1064 nm激光的最大输出功率为20 W,同时有0.37 W的单频532 nm激光输出,光光转换效率为45.8%。如图3所示,当抽运波长为888 nm时,激光器的阈值抽运功率为30 W。当抽运光为75.7 W时,被增益晶体吸收的抽运光为65.4 W,1064 nm激光的最大输出功率为33.7 W,同时有1.13 W的单频532 nm激光输出,光光转换效率为53.2%。所以,抽运波长为888 nm时,激光器的光光转换效率有显著提高,使用直接抽运的888 nm激光作为抽运光,激光器更容易获得高功率输出。增益晶体的相关参数如下:热传导系数为5 W/mK,热光系数为 $2.6 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,抽运光斑半径为0.5 mm,当抽运波长为888 nm时,晶体的掺杂原子数分数为0.8%,对抽运光的吸收系数为1 cm;而当抽运波长为808 nm时,晶体的掺杂原子数分数为0.2%,对抽运光的吸收系数为6.28 cm。根据上述参数,计算了在不同抽运功率下两块增益晶体的热透镜焦距,如图4所示。从图4中可以看出,采用808 nm激光作为抽运激光,当抽运功率为45 W时,增益晶体的热透镜焦距为121 mm。而当抽运光的波长选取为888 nm时,抽运功率增加到76 W时,增益晶体的热透镜焦距才能达到121 mm。也就是说,采用888 nm激光作为抽运光,增益晶体的热透镜效应更小。这是因为采用888 nm的抽运光不仅能兼顾四能级激光系统的优点,而且量子亏损以及吸收系数均比较小,从而减轻和匀化增益晶体中的热效应,最终获得高功率的输出。

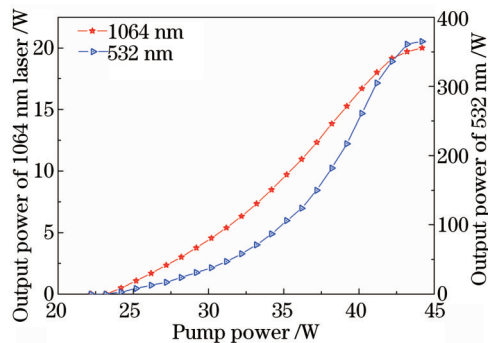


图2 抽运波长为808 nm时,单频1064 nm激光的输出功率

Fig.2 Output power of single-frequency 1064 nm with pump wavelength of 808 nm

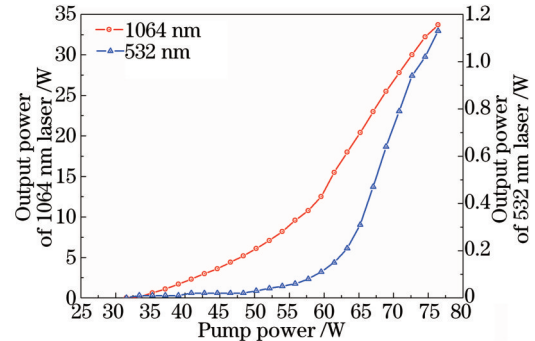


图3 抽运波长为888 nm时,单频1064 nm激光的输出功率

Fig.3 Output power of single-frequency 1064 nm with pump wavelength of 888 nm

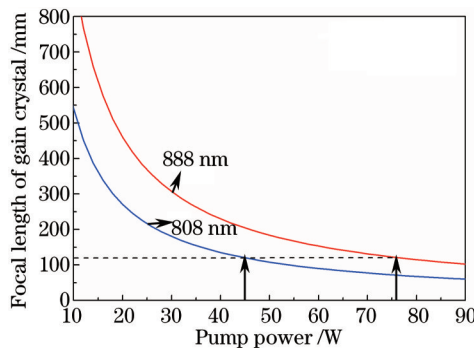


图4 抽运波长不同时,激光晶体的热透镜焦距随抽运功率的变化曲线

Fig.4 Thermal focal length of laser crystal versus pump power with different pump wavelengths

在激光器输出功率为33.7 W时,通过扫描F-P干涉仪可以得到激光器的单频曲线,如图5所示,可以清楚地看到激光器能以单纵模状态稳定地运转。这主要是因为谐振腔内插入倍频晶体LBO而引入非线性损耗,使得主振荡模所经的非线性损耗是非振荡模的一半,进而使激光器稳定地单纵模运转。通过和一台线宽为150 kHz,功率为200 mW的低功率单频激光器拍频,测量得到该高功率单频激光器的线宽为2.5 MHz。进一步测量了激光器的长期功率稳定性曲线,如图6所示,激光器在7 h内的功率稳定性优于 $\pm 0.51\%$ 。用Thorlabs M2SET-VIS光束质量分析仪测量了1064 nm激光的光束质量因子,对于1064 nm激光, $M_x^2=1.06$ , $M_y^2=1.09$ ,图7给出了1064 nm激光的散焦曲线及远场光场分布。

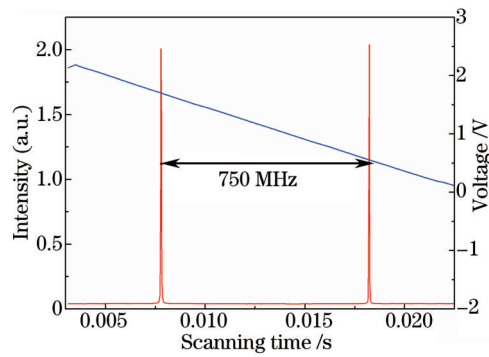


图5 扫描共焦F-P腔的透射峰曲线

Fig.5 Laser transmission intensity obtained by scanning confocal F-P cavity

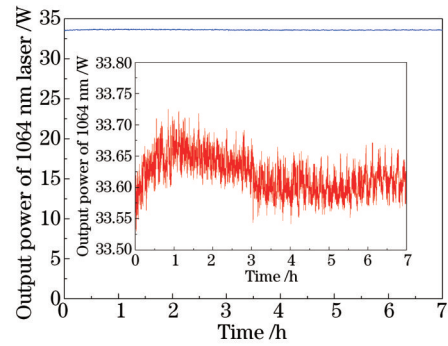
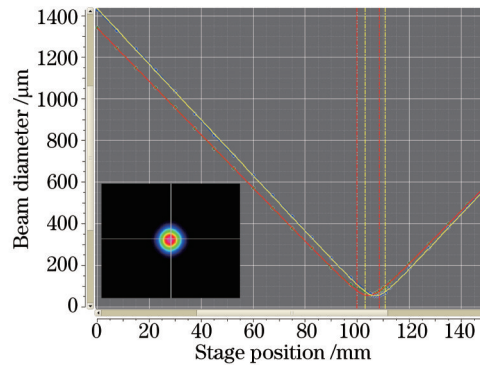


图6 激光器的长期7 h功率稳定性曲线

Fig.6 Long term power stability of laser for 7 h

图7 测量 $M^2$ 的曲线以及光斑的远场分布Fig.7 Measured  $M^2$  values and spatial beam profile for a 1064 nm laser

## 4 结 论

实验上研究了抽运源抽运波长对激光器输出功率的影响。当抽运源的抽运波长为 808 nm 时,单频 1064 nm 激光的输出功率最高只有 20 W,同时有 0.37 W 的 532 nm 激光输出,光光转换效率为 45.8%。而当抽运源的抽运波长为 888 nm 时,单频 1064 nm 激光的输出功率可以提高到 33.7 W,同时有 1.13 W 的 532 nm 激光输出,光光转换效率提升至 53.2%。通过倍频晶体引入非线性损耗,激光器实现了稳定的单纵模运转。经测试,激光器的长期功率稳定性优于 $\pm 0.51\%$ , $M^2$ 因子优于 1.1。

## 参 考 文 献

- 1 E V Kovalchuk, D Dekorsy, A I Lvovsky, *et al.*. High-resolution Doppler-free molecular spectroscopy with a continuous-wave optical parametric oscillator[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(18): 1430-1432.
- 2 S Kuhr, W Alt, D Schrader, *et al.*. Deterministic delivery of a single atom[J]. *Science*, 2001, 293(5528): 278-280.
- 3 L A Wu, M Xiao, H J Kimble. Squeezed states of light from an optical parametric oscillator[J]. *J Opt Soc Am B*, 1987, 4(10): 1465-1475.
- 4 B Willke. GEO600: status and plans[J]. *Class Quantum Grav*, 2007, 24(19): S389-S397.
- 5 T Y Fan, R L Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, 24(6): 895-912.
- 6 D Y Chen, X D Li, Y Zhang, *et al.*. Research on diffusion-bonding composite YVO<sub>4</sub>/Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(1): 46-49.
- 7 E Cheng, D R Dudley, W L Nighan, *et al.*. Lasers with low doped gain medium[P]. US Patent: US6504858 B2, 2003-1-7.
- 8 Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. High-power single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser dual-end-pumped by diode laser[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, 10(2): 87-92.
- 赵磊云, 张宽收. LD 双端面抽运的高功率连续单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *量子光学学报*, 2004, 10(2): 87-92.
- 9 Yang Xiaoping, Wang Chunxiang, Feng Jinxia, *et al.*. 9 W all-solid-state continuous-wave single-frequency 1.34 μm Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602019.

- 杨小平, 王春香, 冯晋霞, 等. 9 W 全固态连续单频 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602019.
- 10 Chen Meng, Chang Liang, Yang Chao, *et al.*. 100 kHz Nd:YVO<sub>4</sub> picosecond regeneration amplifier end-pumped by 914 nm laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602010.
- 陈 檬, 常 亮, 杨 超, 等. 914 nm LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 100 kHz 皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602010.
- 11 L McDonagh, R Wallenstein, R Knappe, *et al.*. High-efficiency 60 W TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator pumped at 888 nm[J]. Opt Lett, 2006, 31(22): 3297-3299.
- 12 Li Bin, Ding Xin, Zhang Wei, *et al.*. 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser pumped by wave-locked 878.6 nm laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502010.
- 李 斌, 丁 欣, 张 巍, 等. 波长锁定 878.6 nm 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 1064 nm 激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502010.
- 13 Wang Yajun, Yang Wenhai, Zheng Yaohui, *et al.*. Influence of pump wavelength and Nd<sup>3+</sup> doped concentration on the performance of intracavity doubling single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602005.
- 王雅君, 杨文海, 郑耀辉, 等. 抽运波长及掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602005.
- 14 K M Murdoch, D A Clublely, M J Snadden. A mode-hop-free tunable single-longitudinal-mode Nd:YVO<sub>4</sub> laser with 25 W of power at 1064 nm[C]. SPIE, 2009, 7193: 71930P.
- 15 Coherent, Mephisto Family of Lasers[OE]. <http://www.coherent.com/products/?2062/Mephisto-Family-of-Lasers>.
- 16 H D Lu, J Su, Y H Zheng, *et al.*. Physical conditions of single-longitudinal-mode operation for high-power all-solid-state lasers[J]. Opt Lett, 2014, 39(5): 1117-1120.
- 17 C W Zhang, H D Lu, Q W Yin, *et al.*. Continuous-wave single-frequency laser with dual wavelength at 1064 and 532 nm [J]. Appl Opt, 2014, 53(28): 6371-6374.
- 18 Y H Zheng, F Q Li, Y J Wang, *et al.*. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd:YVO<sub>4</sub> as a polarizing beam splitter[J]. Opt Commun, 2010, 283(2): 309-312.
- 19 Y J Wang, Y H Zheng, Z Shi, *et al.*. High-power single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> green laser by self-compensation of astigmatism [J]. Laser Phys Lett, 2012, 9(7): 506-510.

栏目编辑: 宋梅梅