

7.5 W Nd:GdVO₄ 环形腔单频激光器

赵伟芳 侯 玮 郭 林 林学春 李晋闽

(中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083)

摘要 采用光纤耦合输出激光二极管(FCLD)单端端面抽运 Nd:GdVO₄ 晶体的方式, 获得高功率单频激光的输出。在实验中, 采用四镜折叠环形腔, 考虑了晶体的热透镜效应后, 优化了环形腔腔型。通过在腔内插入法拉第旋光器和半波片实现激光的单向运转从而抑制空间烧孔效应, 在腔内插入标准具后, 压缩了单频激光的线宽, 获得了连续单频 1063 nm 激光输出。在 18.10 W 抽运功率时, 获得了 7.57 W 的单频激光, 光-光转换效率为 41.8%, 光束质量因子 $M^2 \approx 1.2$ 。

关键词 激光器; 全固态激光器; 单频; 环形腔; Nd:GdVO₄ 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0514003

7.5 W Nd:GdVO₄ Single-Frequency Ring Laser

Zhao Weifang Hou Wei Guo Lin Lin Xuechun Li Jinmin

(Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A Nd:GdVO₄ crystal is end-pumped by a fiber-coupled laser diode (FCLD), and high power of single-frequency laser output is achieved. The four-mirror bow-tie ring cavity with a Faraday rotator and a half wave plate is applied to eliminate the spatial hole-burning effect. A solid etalon is inserted into the cavity to obtain single-frequency 1063 nm output of the narrow line width. The maximum output is 7.57 W and the optical-optical conversion efficiency is 41.8% with 18.10 W of the incident power.

Key words lasers; all-solid-state laser; single frequency; ring cavity; Nd:GdVO₄ crystal

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.5680

1 引 言

激光二极管抽运的全固态单频激光器具有效率高、寿命长、结构紧凑和性能稳定等优点, 其相干性非常好, 在激光雷达、激光遥感、光谱学、光频标准和非线性光学频率变换等领域中具有广泛的应用和很好的市场前景^[1]。

目前实现激光二极管抽运的单频全固态激光器方法虽然有很多, 但为了实现大功率单频激光器, 单向环形腔法依然是普遍采用的方法^[2~12]。本文报道了激光二极管单端端面抽运连续单频 1063 nm Nd:GdVO₄ 环形腔激光器的实验研究。在 18.10 W 抽运功率时, 输出了 7.57 W 的单频激光, 光-光转换效率为 41%。本文将 Nd:GdVO₄ 晶体用于环形

腔出单频激光。

2 实验结构设计

激光二极管单端端面抽运单频 1063 nm Nd:GdVO₄ 激光器的装置如图 1 所示。M₁ 为平面输入耦合镜, 对 1064 nm 高反 ($R_{1064} > 99.5\%$), 808 nm 减反 ($R_{808} < 5\%$); M₂ 为输出镜, 对 1064 nm 的透射率为 20%; M₃, M₄ 为曲面镜, 对 1064 nm 高反, $R_{1064} > 99.8\%$, 曲率半径为 200 mm。激光晶体是 Nd:GdVO₄/YVO₄ 生长型复合晶体, Nd:GdVO₄ 晶体和未掺杂的晶体 YVO₄ 的尺寸分别为 3 mm × 3 mm × 8 mm 和 3 mm × 3 mm × 2 mm, Nd:GdVO₄ 的掺杂质量分数为 0.3%, 前后表面都镀有 1064 nm/808 nm 减反膜。腔

收稿日期: 2010-10-11; **收到修改稿日期**: 2010-12-20

基金项目: 国家 863 计划(2008AA030116)和国家 973 计划(2010CB933800)资助课题。

作者简介: 赵伟芳(1985—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事全固态激光与非线性光学频率变换等方面的研究。E-mail: wfzhao@semi.ac.cn

内放置 TGG 和 $\lambda/2$ 波片,构成光学单向器,它们的前后表面都镀有 1064 nm 减反膜,TGG 插入一个内径为 $\phi 3.1$ mm,外径为 $\phi 20$ mm,磁场强度约为 1T 的磁铁中,组成的旋光器的旋转角度约为 15° ,与半波片结合,足够抑制一个方向激光的起振;加入 1.4 mm 厚的标准具,以获得更窄的线宽。

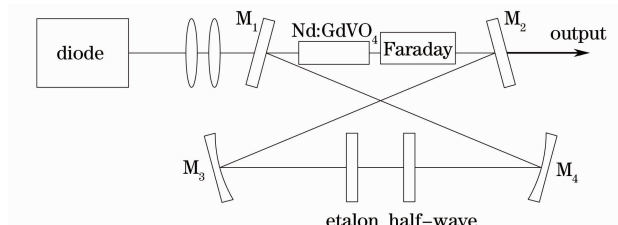


图 1 Nd:GdVO₄ 环形单频激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental arrangement of single-frequency Nd:GdVO₄ ring laser

其中抽运模块为 30 W 的光纤耦合输出的激光二极管,光纤芯径为 200 μm ,数值孔径为 0.22。抽运光经耦合透镜组聚焦到晶体中,聚焦光斑半径约为 280 μm ,如图 1 所示。

在高抽运功率情况下,Nd:GdVO₄ 的热透镜效应很明显,因此,在设计腔型前,有必要对激光晶体的热透镜焦距进行估算。对于端面抽运的固体激光器,激光晶体可以等效成一个理想的薄透镜,在 18.1 W 的抽运功率下,热透镜约为 300 mm。

图 2 中 f 为激光晶体的等效热透镜,假设热透镜的中心在激光晶体的中心,设激光晶体中心离 M_2 之间的距离为 L_1 ; M_2 , M_3 之间的距离为 L_2 ; M_3 , M_4 之间的距离为 L_3 ; M_4 , M_1 之间的距离为 L_4 ; M_1 与激光晶体中心的距离为 L , $L=45$ mm。为了有利于获得基模输出,激光晶体中的光斑半径应略小于抽运光在晶体内的平均光斑半径;同时为了获得高功率的激光输出,激光晶体中的光斑半径应在不破坏基模的前提下,尽可能的大一点。环形腔的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_4 + L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 + L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix},$$

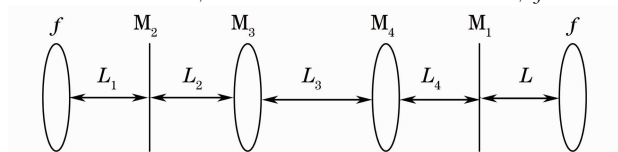


图 2 等价的薄透镜序列

Fig. 2 Equivalent thin lens series

式中 R 为 M_3 , M_4 的曲率半径。经过优化后,最终取 $L_1 + L_2 = 316$ mm, $L_3 = 257$ mm, $L_4 + L = 257$ mm。由于两个凹镜是离轴放置,所以环形腔反射镜在子午面和弧矢面内的焦距不同,这样将产生像散。像散一方面影响光束质量,另一方面使环形腔稳定工作区缩小。通过 ABCD 矩阵,分别对子午和弧矢面进行计算和比较,如图 3 所示,实线和虚线分别是子午方向和弧矢方向晶体中心处光斑半径随晶体热透镜焦距的关系。从图 3 可以看出,在整个热透镜变化过程中,子午和弧矢方向的光斑大小相差不大,随着热透镜的增加,子午和弧矢方向的光斑大小的差值变小。

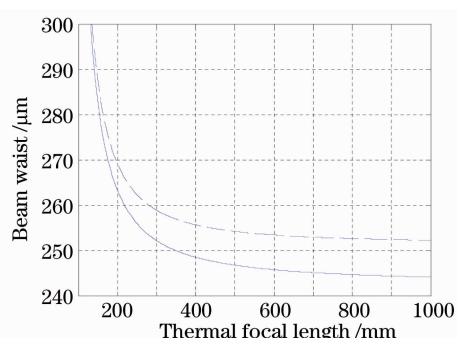


图 3 晶体中心基模光斑半径随晶体热焦距的关系

Fig. 3 Relation between thermal focal length and beam waist (radius) of resonant fundamental mode in crystal center

从图 3 可以看出,激光晶体中心的光斑大小约为 255 μm ,利用 CCD(spiricon LBA-FW-SCOR)测量晶体内的平均抽运光斑半径约为 310 μm ,两者的比值约为 0.82,实现了基频光与抽运光的良好匹配,可以有效地利用抽运能量。

3 实验结果与分析

在 18.1 W 的抽运功率下,获得了 7.57 W 的高

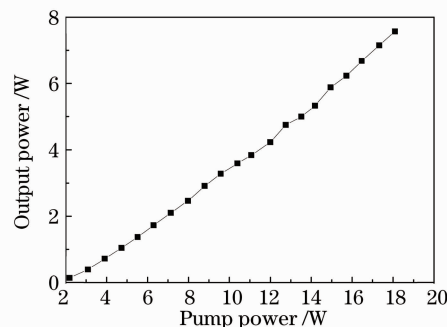


图 4 环形腔 Nd:GdVO₄ 单频激光器的输出功率曲线

Fig. 4 Output power of single-frequency Nd:GdVO₄ ring laser

功率单频激光输出,光-光转换效率为 41.8%。图 4 给出了单频运转时输出功率随抽运功率的变化曲线。

实验采用共焦扫描干涉仪的方法对激光输出频谱进行频谱分析。扫描干涉仪的自由光谱范围(FSR)为 3.75 GHz,精细常数大于 200,分辨率小于 20 MHz,而激光的纵膜间隔约为 360 MHz,足够

区分两个相邻的纵膜。从图 5 可以看出,在 13 ms 的时间内,共焦扫描干涉仪扫过了 3.75 GHz 的频谱,而将左图展开后得到右图可以看出,单频的线宽在小于 100 μ s 的时间内扫描完成。

采用 Spiricon 公司的 M^2 -200 光束质量分析仪测量激光的光束质量因子 M^2 ,其中 $M_x^2 = 1.30, M_y^2 = 1.21$,光束在 x, y 方向的二维光强分布如图 6 所示。

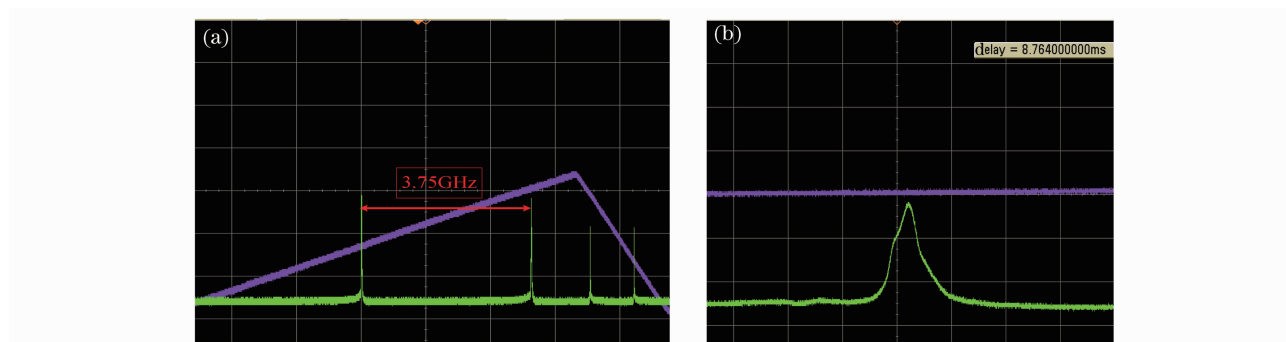


图 5 环形腔 1064 nm 单频输出的频谱结构

Fig. 5 Output spectrum of single-frequency Nd:GdVO₄ ring laser

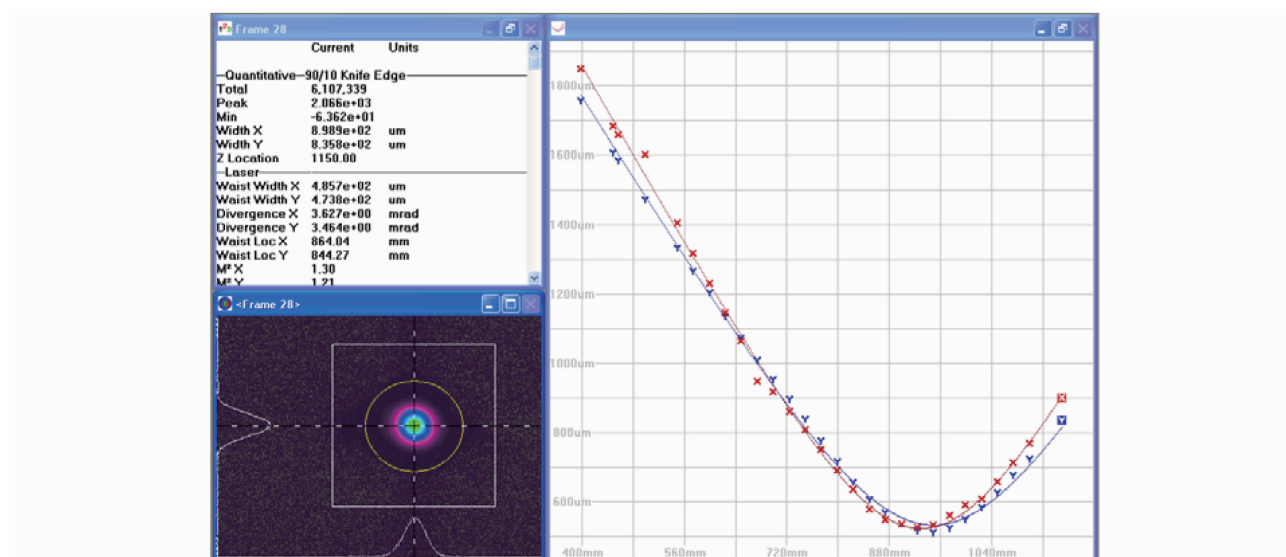


图 6 输出功率为 7.5 W 时,激光 M^2 因子的测量

Fig. 6 M^2 measurement of Nd:GdVO₄ ring laser at output power of 7.5 W

4 结 论

报道了激光二极管单端面抽运连续单频 1063 nm Nd:GdVO₄ 环形腔激光器的实验研究。实验以光纤耦合输出的激光二极管端面抽运 Nd:GdVO₄ 晶体。考虑了 Nd:GdVO₄ 晶体的热效应以及凹镜的离轴对于激光腔型的影响,优化设计了四镜折叠环形腔,达到最佳的模式匹配。在腔内插入了 15 mm TGG 和半波片,起到光隔离器的作用。加入标准具后,实现了窄线宽单频输出。在 18.10 W 的抽

运功率下,输出了 7.57 W 的单频激光,光-光转换效率为 41.8%, $M^2 \approx 1.2$ 。

参 考 文 献

- Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous-wave single-frequency Nd:YVO₄ ring laser at 1064 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197
- 张铁犁,姚建铨,王朋等。端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO₄ 环形腔激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1194~1197

- 2 Wang Xin, Yang Suhui, Sun Wenfeng *et al.*. Laser diode pumped high-slope-efficiency monolithic unidirectional single frequency ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 149~152
王欣, 杨苏辉, 孙文峰等. 激光二极管抽运单块高斜度效率环形腔单频固体激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 149~152
- 3 Zhao Jingyun, Zhang kuanshou. High power single-frequency Nd:YVO₄ dual-end-pumped by diode laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(2): 87~92
赵晶云, 张宽收. LD双端面泵浦的高功率连续单频Nd:YVO₄激光器[J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(2): 87~92
- 4 Haifeng Pan, Shixiang Xu, Heping Zeng. Passively Q-switched single-longitudinal-mode c-cut Nd:GdVO₄ laser with a twisted-mode cavity [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7): 2755~2760
- 5 Keith M. Murdoch, David A. Clubley *et al.*. A mode-hop-free tunable single-longitudinal-mode Nd:YVO₄ laser with 25 W of power at 1064 nm [C]. *SPIE*, 2009, **7193**: 71930P
- 6 Zhao Weifang, Hou Wei, Li gang *et al.*. Single-frequency Nd:YAG ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2810~2812
赵伟芳, 侯玮, 李港等. Nd:YAG环行腔单频激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2810~2812
- 7 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin *et al.*. All-solid-state high-efficiency high-power Nd:YVO₄/KTP laser of single-frequency operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 739~742
郑耀辉, 卢华东, 李凤琴等. 全固态高输出功率单频Nd:YVO₄/KTP激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 739~742
- 8 Gong Ke, Wu Keying, He Shufang *et al.*. Output mirror design and thermal stability analysis of corner cube-based non-planar ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3487~3493
巩轲, 吴克瑛, 何淑芳等. 角锥型非平面环形激光器偏振反射镜的影响及热稳定性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3487~3493
- 9 Ju Youlun, Wang Zhenguo, Wang Lei *et al.*. Short-term frequency instability measurement of 2 μm single longitudinal-mode laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2164~2168
鞠有伦, 王振国, 王磊等. 2 μm单纵模激光频率短期不稳定度的测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2164~2168
- 10 W. F. Zhao, W. Hou, L. Guo *et al.*. 12 W high efficiency single frequency ring laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(3): 210~212
- 11 Shankui Rong, Yongwei Feng, Weibiao Chen. Design of high energy, single frequency, all solid-state blue laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): S89~S91
- 12 Juntao Wang, Jun Zhou, Huaguo Zang *et al.*. Conductively cooled 250-Hz single frequency Nd:YAG laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(7): 670~672