

文章编号: 0258-7025(2010)11-2810-03

Nd:YAG 环形腔单频激光器

赵伟芳^{1,2} 侯 玮² 李 港¹ 林学春² 李晋闽²

(¹ 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124
² 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单端端面抽运 Nd:YAG 晶体, 考虑到晶体的热透镜效应, 优化设计了四镜折叠环形腔, 使抽运光斑的大小和振荡光斑的大小符合模式匹配的要求; 在腔内插入偏振片、法拉第旋光器和半波片从而实现激光的单向运转以抑制空间烧孔效应; 同时利用偏振片补偿了一定的像散; 并在腔内加入标准具, 压缩单频激光的线宽, 最终实现连续单频 1064 nm 激光输出。在 7 W 抽运功率时, 输出了 2 W 的单频激光, 斜率效率为 37%, 单频激光的线宽为 50 MHz, M^2 因子约为 1.2。

关键词 激光器; 全固态环形激光器; 单频; Nd:YAG 晶体

中图分类号 TN 248.1; TN 242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2810

Single-Frequency Nd:YAG Ring Laser

Zhao Weifang^{1,2} Hou Wei² Li Gang¹ Lin Xuechun² Li Jinmin²

¹ Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

² Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract A Nd:YAG crystal was end-pumped by a fiber-coupled laser diode (FCLD). The four-mirror bow-tie ring cavity with a Faraday rotator and a half wave plate was applied to eliminate the spatial hole-burning effect. A solid etalon was inserted into the cavity to obtain the narrow line width single frequency output. The maximum output was 2 W and the slope efficiency was 37% with 7 W of the incident power. The line width of the single frequency was 50 MHz, and the M^2 factor was about 1.2.

Key words lasers; all solid state laser; single frequency; Nd:YAG crystal

1 引言

激光二极管(LD)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,一直是激光领域研究的热点之一。

目前实现 LD 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。国内外对单向环形腔的方法输出单频有很多的报道^[1~11],其中北京理工大

学的王欣等^[1]采用 Nd:YAG 晶体的单块非平面环形腔获得了最大 1.20 W 的 1064 nm 单频激光输出,斜率效率高达 47.4%,哈尔滨工业大学的姚保全等^[2]采用 Ho:YAG 晶体的单块非平面环形腔获得了 7.3 W 的 2.09 μm 单频激光输出,斜率效率高达 71%,天津大学的张铁犁等^[3]采用 Nd:YVO₄ 晶体,利用四镜环形腔获得了 9 W 单频,光-光转换效率为 36.6%。国内,利用 Nd:YAG 晶体的四镜环形腔未见报道,但利用 Nd:YAG 晶体输出单频激光对于扩展单频激光的波长范围有着重要的意义。本文报道了采用 Nd:YAG

收稿日期: 2009-12-10; 收到修改稿日期: 2010-04-22

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,硕士研究生,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

导师简介: 李 港(1950—),男,教授,博士生导师,主要从事全固态激光及非线性光学频率变换等方面的研究。

E-mail: lig@bjut.edu.cn

晶体,输出 2 W 连续单频激光。

2 实验结构设计

LD 单端端面抽运单频 1064 nm Nd:YAG 激光器,其中光纤耦合输出的 LD 的光纤芯径为 $400\ \mu\text{m}$,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 $270\ \mu\text{m}$ 。实验装置如图 1 所示。

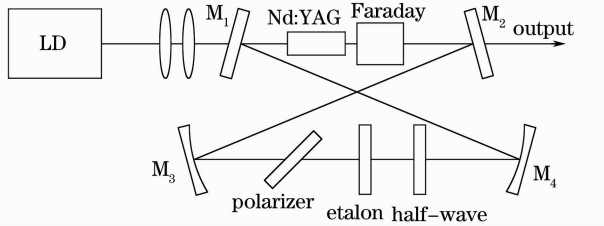


图 1 Nd:YAG 环形激光器实验装置图

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

谐振腔采用四镜折叠环形腔,其中 M_1 和 M_2 为平镜, M_3 和 M_4 为凹镜。 M_1 对 808 nm 高透和 1064 nm 高反; M_2 为输出镜,对 1064 nm 的透射率为 20%, M_3 和 M_4 对 1064 nm 高反。偏振片起起偏器的作用,对水平偏振光的透射率大于 97%,同时插入 15 mm 铽镓石榴石 (TGG) 和半波片,起到光隔离器的作用,使激光单向运转,以消除空间烧孔效应。

对于连续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,实验中采用 0.7% 的 Nd:YAG 晶体,抽运功率转化为热的效率约为 25%,激光晶体内抽运光的平均光斑半径约为 $300\ \mu\text{m}$ 。在 7 W 的抽运功率下,热透镜焦距约为 300 mm。

把晶体等效成焦距 300 mm 的薄透镜,将四镜折叠腔等效为薄透镜序列,采用 ABCD 矩阵对激光器的腔膜进行理论计算。晶体中心基模光斑半径随晶体热焦距的关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出,晶体中心处形成的基模光斑半径大约为 $250\ \mu\text{m}$,而晶体内抽运光的平均光斑半径约为 $300\ \mu\text{m}$,基本符合模式匹配的要求^[12]。

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。像散可以通过在像散臂中加入一定厚度、倾斜放置的像散补偿板来进行补偿。本实验中,使用布儒斯特角放置的偏振片来补偿像散。通过

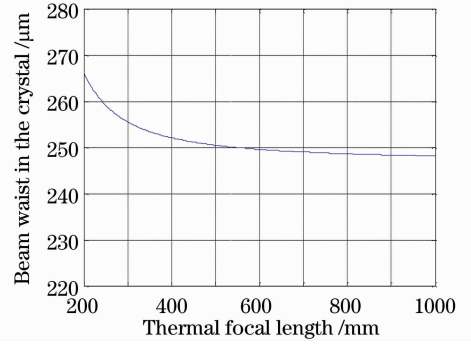


图 2 晶体中心基模光斑半径与晶体热焦距的关系

Fig. 2 Relationship between the thermal focal length and the beam waist (radius) of the resonant fundamental mode in the crystal center

ABCD 矩阵,分别对子午和弧矢面进行计算进行比较,其中横坐标表示不同厚度的布儒斯特片,纵坐标表示在输出镜上子午方向的光斑半径大小比弧矢方向的光斑半径大小的增量。从图 3 中可以看出,如果想补偿像散,需要厚度为 8 mm 的布儒斯特片。实验中,采用了 4 mm 的布儒斯特片,从图 3 可以看出,在输出镜上,子午方向的光斑半径比弧矢方向的光斑半径小 $2.4\ \mu\text{m}$ 。

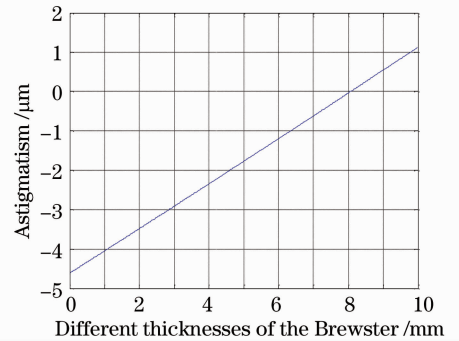


图 3 不同厚度的布儒斯特片与像散的补偿关系

Fig. 3 Relationship between the astigmatism and different thicknesses of the Brewster film

3 实验结果与分析

在 7 W 的抽运功率下,获得了 2 W 的高功率单频激光输出,斜率效率为 37%。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。图 5 为环形腔 1064 nm 单频输出的频谱结构。将图 5 放大后,对图谱分析可知,单频的宽度大约为 50 MHz。

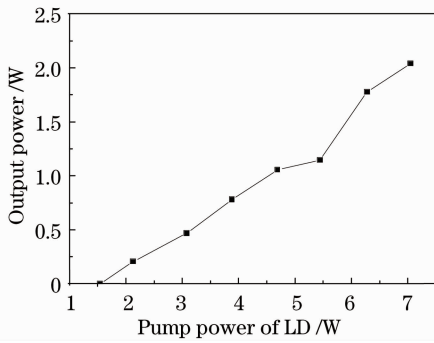


图4 环形腔 Nd:YAG 激光器的输出功率曲线

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

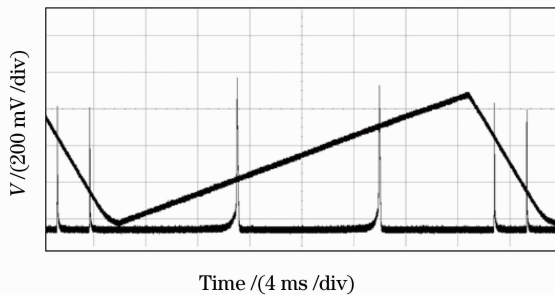
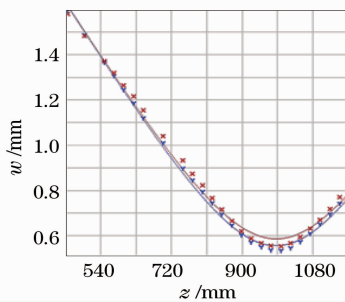


图5 环形腔 Nd:YAG 激光器单频输出的频谱结构

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

用 Spiricon 公司的 M^2 -200 光束质量分析仪测量激光的 M^2 因子,其中 $M_x^2 = 1.23$, $M_y^2 = 1.17$, 激光 M^2 因子的测量如图 6 所示。

图6 输出功率为 2 W 时,激光 M^2 因子的测量Fig. 6 M^2 measurement of the Nd:YAG ring laser at output power of 2 W

4 结 论

报道了激光二极管单端端面抽运连续单频 1064 nm Nd:YAG 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:YAG 晶体。考虑了 Nd:YAG 晶体的热效应,优化设计了四镜折叠环形腔,达到最佳的模式匹配。在腔内插入了偏振片,一方面达到了起偏的作用,另一方面起

到了一定程度的像散补偿,同时在腔内插入了 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 7 W 抽运功率时,输出了 2 W 的单频激光,斜率效率为 37%,单频激光的线宽为 50 MHz, M^2 因子约为 1.2。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 B. Q. Yao, X. M. Duan, D. Feng *et al.*. 7.3 W of single-frequency output power at 2.09 μm from an Ho:YAG monolithic nonplanar ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2161~2163
- 3 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,王鹏等.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
- 4 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
- 5 K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. High-power single-frequency operation, at 1064 nm and 1061.4 nm of a Nd:YAG ring laser end-pumped by a beam-shaped diode bar [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **135**(1-3): 89~92
- 6 Shankui Rong, Yongwei Feng, Weibiao Chen. Design of high energy, single frequency, all solid-state blue laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): 89~91
- 7 Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO₄/LBO red laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~327
常冬霞,刘侠,王宇等.连续波 Nd:YVO₄/LBO 稳频倍频红光全固态激光器[J].中国激光,2008, **35**(3): 323~327
- 8 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
- 9 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): 3429~3432
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): 3429~3432
- 10 N. Coluccelli, G. Galzerano, D. Parisi *et al.*. Diode-pumped single-frequency Tm:LiLuF₄ ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(17): 1951~1953
- 11 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
- 12 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~1429