

文章编号: 0258-7025(2007)09-1194-04

端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO₄环行腔激光器

张铁犁^{1,2,3}, 姚建铨^{1,2,3}, 王 鹏^{1,2,3}, 朱雪玉^{1,2,3}, 蔡志强^{1,2,3}, 张百钢^{1,2,3}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072
² 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072; ³ 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072)

摘要 采用808 nm光纤耦合输出激光二极管(FCLD)单端端面抽运 Nd:YVO₄晶体,采用四镜折叠环行腔,在腔内插入法拉第旋光器和半波片实现激光的单向运转以抑制空间烧孔效应,并在腔内加入标准具,最终实现连续单频1064 nm激光输出。在24.6 W抽运功率时,最高输出功率达到9 W,光-光转换效率为36.6%, M^2 因子约为1.14,频率漂移约200 MHz。

关键词 激光器;单频;环行腔;Nd:YVO₄晶体

中图分类号 TN 248.1;TN 242 **文献标识码** A

Laser Diode End-Pumped, High-Power Continuous-Wave Single-Frequency Nd:YVO₄ Ring Laser at 1064 nm

ZHANG Tie-li^{1,2,3}, YAO Jian-quan^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2,3},
ZHU Xue-yu^{1,2,3}, CAI Zhi-qiang^{1,2,3}, ZHANG Bai-gang^{1,2,3}

¹*Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*

²*Key Laboratory of Laser and Optoelectric Information Science and Technology,
Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

³*Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072, China*

Abstract The continuous-wave (CW) single-frequency single end-pumped 1064 nm laser with maximum output power of 9 W was experimentally demonstrated. An *a*-cut Nd:YVO₄ crystal was end-pumped by a fiber-coupled laser diode (FCLD) at 808 nm. 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 single-frequency output with $M^2 \approx 1.14$. The maximum output power was 9 W and the optical-optical efficiency was 36.6% with 24.6 W of the incident power. The fluctuation of frequency was about 200 MHz.

Key words lasers; single frequency; ring cavity; Nd:YVO₄ crystal

1 引言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器与传统的灯抽运激光器相比有效率高、寿命长、结构紧凑和

光束质量好等优点,已成为目前国际上研究的热点。通过端面抽运耦合,激光二极管可以提供较高的功率密度抽运激光晶体,非常适合产生 TEM₀₀模运转的激光。单频激光器是全固态激光器中的一个重要

收稿日期:2006-12-01;收到修改稿日期:2007-03-27

基金项目:国家自然科学基金(60637010,10474071)和天津市科技发展计划(033181311)资助项目。

作者简介:张铁犁(1981—),男,山东人,博士研究生,主要从事高功率激光与非线性光学频率变换的研究。

E-mail:terry_tju@163.com

导师简介:姚建铨(1939—),男,上海人,中国科学院院士,教授,博士生导师,目前研究方向为固体激光及非线性光学频率变换。E-mail:jyao@tju.edu.cn

分支,要求激光既是单横模又是单纵模输出,它的能量更集中、相干性更好,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都具有广泛的应用。目前,实现激光二极管抽运的单频全固态激光器的方法主要有:1) 短程吸收法^[1],2) 微腔法^[1],3) 扭摆腔法^[2],4) 耦合腔法^[3],5) 标准具法^[4,5],6) 双折射滤波器法^[6],7) 单向环形腔法^[7~12]。在应用中,通常根据实际需要,采用一种或几种方法相结合,以获得性能优良的单频输出。前6种方法,结构紧凑、简单,适合实现小功率的单频激光器。而单向环形腔法是目前大功率单频激光器中普遍采用的方法。国内对几种获得单频的方法均有报道^[1,2,5,10~12]。本文报道了采用激光二极管单端端面抽运单向环形腔单频 Nd:YVO₄ 激光器的实验研究。实验采用单向环形腔法,并在腔内加入标准具实现1064 nm单频激光输出。在24.6 W的抽运功率下,获得9 W的连续单频1064 nm激光输出,光-光转换效率为36.6%, M^2 因子约为1.14。

2 实验结构设计

图1为激光二极管单端端面抽运单频1064 nm Nd:YVO₄激光器的实验装置图。其中,抽运源为光纤耦合输出的激光二极管(FCLD)(HLU 50F 400-808, LIMO Co., Germany),光纤芯径为400 μm ,数值孔径为0.22。抽运光经透镜组耦合聚焦到晶体中,聚焦光斑半径约254 μm 。在实验中,激光二极管最高应用的功率为24.6 W。

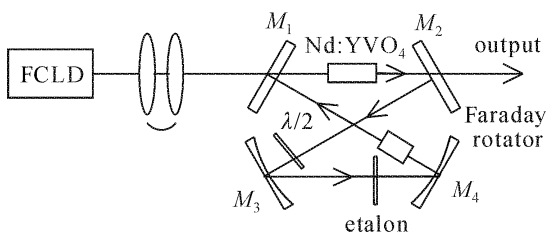


图1 单频 1064 nm Nd:YVO₄ 激光器实验装置图
Fig. 1 Experimental arrangement of single-frequency Nd:YVO₄ laser at 1064 nm

1064 nm 的谐振腔采用四镜折叠环形腔,其中 M_1, M_2 为平镜, M_3, M_4 为平凹镜。 M_1 为抽运光输入镜,对808 nm高透和1064 nm高反; M_2 为输出镜,对1064 nm透射率为10%; M_3 和 M_4 均对1064 nm高反。在腔内加入 Tb 玻璃材料的法拉第旋光器和半波片,使激光单向运转,以消除空间烧孔效应。旋光器的旋光角度为 7° ,与半波片结合,足够抑制一个

方向激光的起振。

在端面抽运的固体激光器中,抽运光和谐振光的模式匹配直接影响激光器的效率和输出功率。一般在高功率激光器中,由于热透镜导致的高阶球差影响,要求谐振光斑半径比抽运光斑半径略小,才能够保证激光器的转换效率^[13]。

在高功率激光器中,设计光学谐振腔的一个重要参量是端面抽运激光晶体的温度分布引起的热透镜效应,它对激光腔模半径影响较大,从而影响激光器的输出功率和光束质量。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,其焦距可以表示为^[14]

$$f = \frac{\pi K_c \omega_{pa}^2}{P_{in} \xi (dn/dT)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-al)} \right]. \quad (1)$$

对于沿 a 轴切割、铈离子掺杂原子数分数为0.5%的 Nd:YVO₄ 晶体,热传导系数 $K_c = 0.0054 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$,吸收系数 $\alpha = 5.37 \text{ cm}^{-1}$, ξ 为抽运功率转化为热的效率,约为20%,折射率对温度的变化率 $dn/dT = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6} / \text{K}$, ω_{pa} 为激光晶体内抽运光的平均光斑半径,约为330 μm 。最终由(1)式算得,在25 W抽运功率下,晶体热透镜焦距 $f \approx 80 \text{ mm}$ 。在实验中,采用谐振腔稳定性法^[15],对铈离子掺杂原子数分数为0.3%的 Nd:YVO₄ 晶体热透镜焦距进行了实际测量。在24.6 W抽运功率下, Nd:YVO₄ 晶体的热透镜焦距约为160 mm。这比理论计算的结果稍大,是因为理论计算中所用参数为0.5%掺杂原子数分数的 Nd:YVO₄ 晶体,而0.3%掺杂原子数分数的 Nd:YVO₄ 晶体吸收系数比0.5%掺杂原子数分数的晶体小,导致热透镜效应也比0.5%掺杂原子数分数的晶体小。

这样,把晶体等效为焦距160 mm的薄透镜,将图1中的四镜折叠腔等效为薄透镜序列,采用 ABCD 矩阵对激光器的腔模进行理论计算。定义从晶体中心经 M_2 到 M_3 以及从晶体中心经 M_1 到 M_4 的距离为 l_1 ,两凹镜 M_2 到 M_3 之间的距离为 l_2 。在计算中,取 M_2 和 M_3 的曲率半径为200 mm,由 ABCD 矩阵算得的稳区与 l_1, l_2 之间的关系如图2所示。根据光学元件的实际尺寸,选择激光器工作在稳区 II,于是,取 l_2 分别为200 mm,240 mm和280 mm,对晶体中心处基模光斑大小与 l_1 之间的关系进行了数值模拟,如图3所示。

由图3可以看出,当 $l_1 = 240 \text{ mm}$, $l_2 = 240 \text{ mm}$,在晶体中心处形成的基模光斑半径接近250 μm ,基本符合模式匹配的要求。

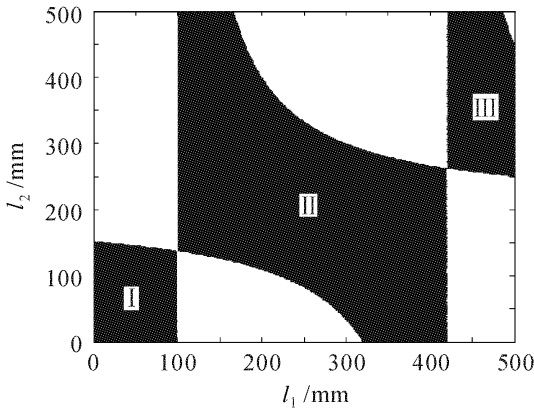


图 2 四镜折叠腔的稳区图

Fig. 2 Stable areas of the four-mirror bow-tie ring cavity

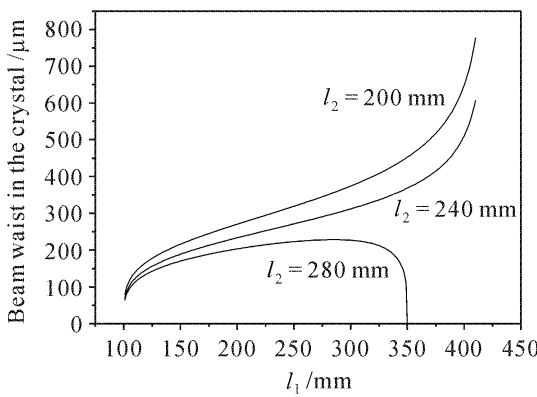


图 3 晶体中心处基模光斑半径与 l_1 的关系

Fig. 3 Relationship between l_1 and the beam waist (radius) of the resonant fundamental mode in the crystal center

3 实验结果与分析

采用 Burleigh 公司生产的 SA Plus 系列频谱分析仪分析激光输出的频谱。该频谱分析仪采用共焦扫描干涉仪的方法,对激光输出频谱进行分析测量。扫描干涉仪的自由光谱范围(FSR)为1.875 GHz,分辨率小于10 MHz。在抽运功率为最大的24.6 W时,测得的激光输出模式如图4所示。

由图4可见,激光输出存在两个纵模,主要是由于抽运功率太高,使相邻纵模也发生起振造成的。在腔内加入一个厚1.5 mm的未镀膜固体标准具,为相邻的两个纵模提供不同的损耗,达到抑制一个纵模起振的效果,频谱结构如图5所示。

实验采用 Molelectron Power MAX 500A 功率计测量单频1064 nm激光的输出功率。由于标准具的加入,引入一定的腔内损耗,激光器阈值由自由运转时的700 mW提高到950 mW。图6给出加入标准具后,单频运转时输出功率随抽运功率的变化曲线。在24.6 W的抽运功率下,获得9 W的高功率单频激

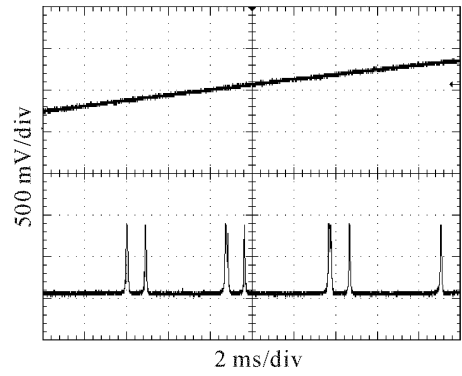


图 4 自由运转时,由频谱分析仪(FSR 1.875 GHz)测得的环形腔 Nd:YVO₄激光器输出频谱结构

Fig. 4 Output spectrum of the Nd:YVO₄ ring laser without etalon measured by spectrum analyzer system (FSR 1.875 GHz)

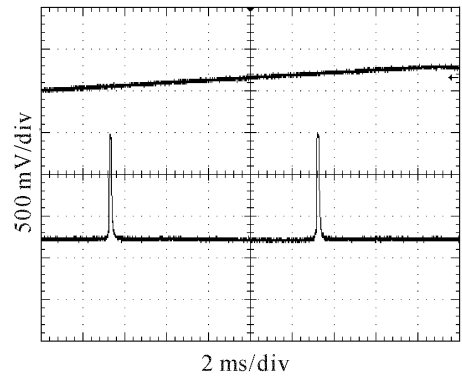


图 5 加入标准具后,环形腔 1064nm 单频输出的频谱结构

Fig. 5 Output spectrum of the single-frequency Nd:YVO₄ ring laser with etalon

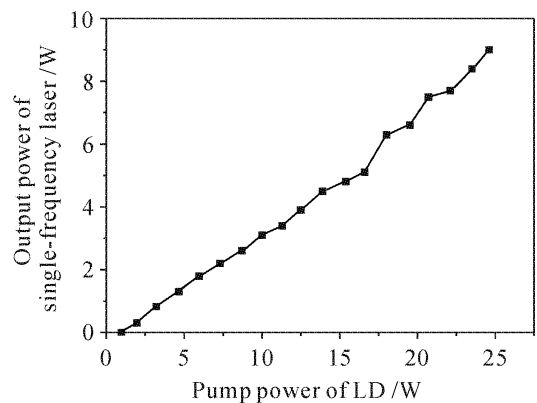


图 6 连续运转环形腔 Nd:YVO₄激光器的输出功率曲线

Fig. 6 Output power of CW single-frequency Nd:YVO₄ ring laser

光输出,光-光转换效率为36.6%。

我们以 4 s 为一个时间段测量了单频输出的频率漂移约为 200 MHz,如图7所示。

实验采用刀口法测量输出端各位置的束宽半径

w , 采用双曲线拟合法计算激光器的 M^2 因子^[16]。在最高输出功率为 9 W 时, 实验测得沿光轴方向各位置光斑半径平方的 U 型曲线, 如图 8 所示。横坐标 z 为沿光轴方向的纵向距离, 最终求得 M^2 为 1.14。

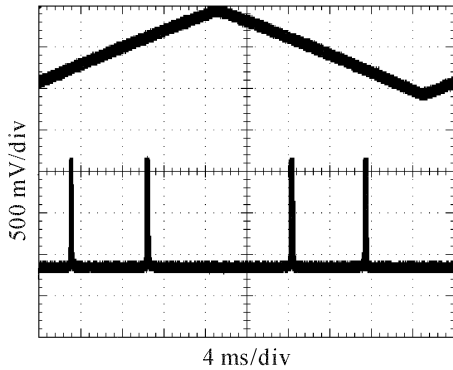


图 7 连续运转环行腔 Nd:YVO₄ 激光器 4 s 内的频率漂移

Fig. 7 Frequency fluctuation of the CW single-frequency Nd:YVO₄ ring laser in 4 s

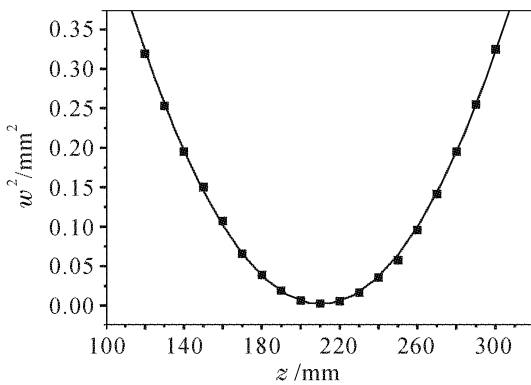


图 8 刀口法测量的 U 型曲线

Fig. 8 U-shaped pattern measured by knife-edge method

4 结 论

报道了激光二极管单端端面抽运连续单频 1064 nm Nd:YVO₄ 环行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:YVO₄ 晶体。考虑到 25 W 高功率抽运时 Nd:YVO₄ 晶体的热效应, 优化设计了四镜折叠的环形谐振腔, 达到最佳的模式匹配。在腔内加入法拉第旋光器和半波片实现激光的单向运转, 抑制空间烧孔效应, 加入 1.5 mm 厚未镀膜标准具实现单频输出。单频激光 4 s 内的频率漂移约为 200 MHz, M^2 因子为 1.14。在 24.6 W 抽运功率时, 连续运转最高输出功率为 9 W, 光-光转换效率为 36.6%。

参 考 文 献

1 Zheng Quan, Qu Chuanli, Qian Longsheng. The new development on the study of diode-pumped all-solid-state single-

frequency laser [J]. *OME Information*, 2001, (6):29~31
 郑 权, 曲川利, 钱龙生. LD 泵浦全固体单频激光器研究取得新进展[J]. 光机电信息, 2001, (6):29~31
 2 Lin Yueming, He Huijuan, Lu Yutian. CW single-frequency operation of a diode laser-pumped Nd:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8):891~893
 林岳明, 何慧娟, 陆雨田. 激光二极管泵浦单频连续工作的 Nd:YAG 激光器[J]. 光学学报, 1994, **14**(8):891~893
 3 Christian Pedersen, Peter Lichtenberg Hansen, Torben Skettrup *et al.*. Diode-pumped single-frequency Nd:YVO₄ laser with a set of coupled resonators [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12):1389~1391
 4 H. G. Danielmeyer. Stabilized efficient single-frequency Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1970, **QE-6**(2):101~104
 5 Xu Rongqing, Lu Yaodong, Lan Xinju. A new CW Nd:YAG single longitudinal mode laser [J]. *Journal of East China Shipbuilding Institute*, 2000, **14**(4):83~86
 徐荣青, 陆耀东, 蓝信钜. 一种新型单纵模连续 Nd:YAG 激光器[J]. 华东船舶工业学院学报, 2000, **14**(4):83~86
 6 Tanya K. Lake, Alan J. Kemp, Graham J. Friel *et al.*. Compact and efficient single-frequency Nd:YVO₄ laser with variable longitudinal-mode discrimination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2):417~419
 7 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**:89~92
 8 M. Tröbs, Th. Graf. Compact, dual-configuration, single-frequency, Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Comm.*, 2001, **187**:385~388
 9 Benjamin A. Thompson, Ara Minassian, Michael J. Damzen. Unidirectional single-frequency operation of a Nd:YVO₄ ring laser with and without a Faraday element [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(15):3174~3177
 10 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
 11 Shaokai Wang, Yongming Li, Zehui Zhai *et al.*. High power single-frequency Nd:YVO₄ laser [C]. *SPIE*, 2002, **4914**:161~164
 12 Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. High power single-frequency Nd:YVO₄ laser 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
 13 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
 14 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19):1831~1833
 15 Feng Song, Chaobo Zhang, Xin Ding *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(12):2145~2147
 16 Lü Baida. Laser Optics-Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics [M]. Third edition. Beijing: Higher Education Press, 2002. 81~83
 吕百达. 激光光学-光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2002. 81~83