

文章编号: 0253-2239(2010)03-0793-04

10 W 线偏振连续单频环形腔激光器

陈三斌 周寿桓 赵 鸿 唐晓军 苑利钢 刘 刚

(华北光电技术研究所固体激光国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要 报道了连续激光二极管单端抽运 Nd:YVO₄ 单频激光器的实验研究。对“8”字结构环形谐振腔在稳腔条件下, 基于热透镜效应分析了工作物质中心本征模半径与抽运光平均光斑半径的关系。工作物质热沉采用自然散热, 当抽运功率为 30.3 W 时, 获得了稳定的 1064 nm 单频激光输出, 功率为 10.48 W (线偏振光功率为 10.02 W); 光-光转换效率约为 34.6%; 光束质量为 $M_x^2=1.18$ 和 $M_y^2=1.19$; 1 min 内输出激光频率漂移小于 70 MHz; 4 h 功率不稳定度优于 0.5%。

关键词 激光器; 单频激光; 环形腔; Nd:YVO₄; 单端抽运

中图分类号 O433.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0793

10 W Linearly Polarized Ring Cavity Configuration CW Single-Frequency Laser

Chen Sanbin Zhou Shouhuan Zhao Hong Tang Xiaojun Yuan Ligang Liu Gang

(National Key Laboratory of Solid-State Laser, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract The single-frequency Nd:YVO₄ laser with a CW laser-diode single-end-pumped is described. Under stablecavity condition basing on heat lens, the relation of beam radius versus pump average radius in the crystal center is analyzed in a simple bow-tie ring cavity configuration. When the incident pump power is 30.3 W, a 1064 nm single-frequency laser, with its output power of 10.48 W (line-polarization power 10.02 W), is obtained. the optical-optical efficiency is about 34.6% with beam quality is $M_x^2=1.18$ and $M_y^2=1.19$. The fluctuation of laser frequency is about 70 MHz in a minute. The fluctuation of power is about 0.5% for four hours.

Key words lasers; single-frequency laser; ring cavity; Nd:YVO₄; single-end-pumped

1 引 言

随着激光二极管及抽运技术的迅速发展, 二极管抽运的固体激光器所具有的结构紧凑、效率高和寿命长等诸多优点使得单频激光技术更为实用。其中由激光二极管抽运的掺 Nd³⁺ 固体激光器已成为产生稳定单频激光的有效光源^[1~6]。在诸多应用中需要具有较高功率的单频激光光源。实现单频全固态激光运转的方法很多, 但是采用环形腔是获得较大功率单频激光的有效方法之一^[5,6]。环形腔是一种行波振荡器, 它可有效消除腔内驻波效应及空间烧孔效应, 在腔内插入单向器实现单向激光输出。

本文描述了一个高效的 1064 nm 连续单频激光器, 谐振腔采用“8”字环形结构, 并在腔内插入标准具选频, 连续激光二极管单端抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 工作物质的热沉自然冷却。简单分析了工作物质中心为参考面的本征模半径与抽运光平均光斑半径的关系及选择, 在理论分析指导下进行了实验研究, 获得了稳定的 10 W 线偏振连续单频激光输出。

2 实验装置及分析

2.1 实验装置

图 1 所示为连续激光二极管端抽运 Nd:YVO₄

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(60890200)和固体激光国家重点实验室基金(9140C0402030802)资助课题。

作者简介: 陈三斌(1974—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: chen_sanbin@yahoo.com.cn

导师简介: 周寿桓(1937—), 男, 中国工程院院士, 主要从事固体激光技术和非线性光学等方面的研究。

E-mail: zfhuan@yahoo.com.cn (通信联系人)

单频激光器光路结构示意图。

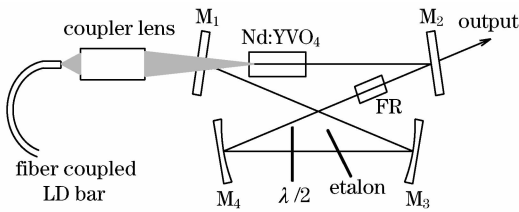


图 1 单频 Nd:YVO₄ 激光器的实验装置

Fig. 1 Single frequency Nd:YVO₄ oscillator set up

抽运源采用光纤耦合输出的连续激光二极管模块,输出功率 30 W,中心波长 808 nm。抽运源模块的耦合光纤纤芯直径为 200 μm,数值孔径 NA = 0.22。自行设计的耦合透镜系统由三块镜片组合而成。该系统保持了较高的透射率,同时具有较小的像差和较长的焦深,放大倍率为 1:1.5。经耦合透镜汇聚的抽运光通过 20° 放置的双色镜 M₁ 进入工作物质 Nd:YVO₄。谐振腔采用四块镜片组成的“8”字形结构;M₁ 为平-平双色镜,对 808 nm 高透,对 1064 nm 高反;M₂ 为平-平输出镜,对 1064 nm 激光透射率为 20%;M₃ 和 M₄ 均为凹面镜,曲率半径为 150 mm,对 1064 nm 高反;工作物质放置在 M₁ 和 M₂ 之间;腔内插入旋光器(FR)和 λ/2 波片实现腔内激光单向运转;Etalon 为厚度 1.015 mm 熔融石英玻璃标准具;工作物质采用 Nd:YVO₄ 晶体,沿 a 轴方向切割,尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm,其中 8 mm 为掺杂 Nd³⁺,其原子数分数 0.3% 的晶体,另外 2 mm 为无掺杂晶体,经键合使它们结合在一起。无掺杂一端为抽运光入射端,镀有 808 nm 和 1064 nm 双增透膜;掺杂一端镀有 1064 nm 增透膜。工作物质用铝箔包裹后夹持在紫铜热沉中,自然散热。

2.2 理论分析

工作物质中的热效应是造成激光输出不稳定的关键因素之一。为此对连续端抽运条件下工作物质的热透镜效应进行了分析。计算中,把工作物质的热透镜近似为一个理想的薄透镜,其焦距表达式为^[7]

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

对于沿 a 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体,(1)式中的相关参数选取如下^[8]:热传导系数 K_c = 5.23 W/(m·K);折射率随温度的变化率 dn/dT = 3×10⁻⁶/K;抽运光在工作物质内的热转换效率 ξ = 24%;折射率 n = 2.183(在 1064 nm)。实验中采用的工作物质为 Nd³⁺,其原子数分数为 0.3% 的 Nd:YVO₄ 晶体,其

吸收系数 α ≈ 1.84 cm⁻¹^[9]。

将上述参数代入(1)式得

$$f = 29.6 \times 10^6 \times \frac{\omega_{pa}^2}{P_{in}}. \quad (2)$$

从(2)式可以看出,在端面抽运结构中,工作物质选定后热透镜焦距主要与抽运光的注入功率 P_{in} 和其在工作物质内的平均光斑半径 ω_{pa} 有关。

确定了热透镜焦距后,接下来用光路传输矩阵分析激光器的工作特性。按照图 1 结构,把工作物质的热透镜近似为一个焦距为 f 的理想薄透镜,两个凹面镜 M₃ 和 M₄ 之间的距离为 L₁;从工作物质中心经 M₁ 到 M₃ 的长度为 L₂;从工作物质中心经 M₂ 到 M₄ 的长度为 L₃;以晶体中心为参考面,则环形腔的矩阵可以写为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

取 L₁ = 100 mm, L₂ = 120 mm, L₃ = 165 mm。在满足谐振腔稳定条件 $\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1$ 下,抽运功率为 30 W 时,可求得抽运光在晶体内部平均光斑半径范围约为 0.183 ≤ ω_{pa} ≤ 0.380。

参考面(工作物质中心)处的光斑尺寸半径为^[10]

$$\omega = \left(\frac{\lambda}{\pi n} \right)^{1/2} \frac{|B|^{1/2}}{\left[1 - \left(\frac{D+A}{2} \right)^2 \right]^{1/4}}. \quad (4)$$

将(3)式的计算结果代入(4)式可得出 ω 与 ω_{pa} 对应关系为

$$\omega = 0.163 \times \left[1 - \left(\frac{0.08663}{\omega_{pa}^2} - 1.6 \right)^2 \right]^{-1/4}. \quad (5)$$

以 ω_{pa} 为变量对(5)式进行计算机模拟,在 ω_{pa} ∈ (0~0.5) 区域内,得出如图 2 所示 ω ∝ ω_{pa} 的曲线。图中曲线为(5)式的模拟结果,直线为 ω = ω_{pa} 的一条等倾参考线。

因为热透镜的影响会导致高阶球差,谐振腔本征模和抽运光空间上的充分交叠则是提高激光器转换效率的关键之一,因此设计环形腔时应加以考虑。实验中,为了实现光束质量好、功率高的激光输出,则需要选取较大的抽运光平均光斑半径以减小热透镜带来的高阶球差,同时使本征模与抽运光空间上充分交叠来获得高转换效率及高的光束质量^[11]。从图 2 中模拟的曲线分析来看,在满足谐振腔稳定

(即 $0.183 \leq \omega_{pa} \leq 0.380$) 条件下, 曲线上满足上述条件对应的 ω_{pa} 值可作为一个较为理想的值。

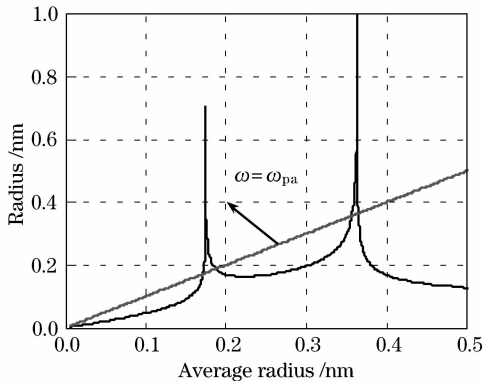


图 2 $\omega \propto \omega_{pa}$ 的关系曲线

Fig. 2 Relation curve of ω versus ω_{pa}

3 实验结果

根据上述对谐振腔的分析结果, 结合耦合系统的光路, 算出耦合透镜与工作物质之间的距离, 通过细致的调节, 在接近理论分析得出的理想值 ω_{pa} 处, 得到了如下的实验结果: 在总抽运功率为 30.3 W 的情况下, 获得了 1064 nm 单频激光输出功率为 10.48 W, 光-光转换效率为 34.6%; 透过检偏器(透射率为 97%)后的最大功率为 10.02 W。图 3 为用 M-92 型激光功率计测得激光器输出功率-抽运功率的关系曲线。

在激光器输出功率为 10.48 W 时, 对输出激光进行了以下性能测试: 首先用 Spiricon 公司 LBS-100 型光束分析仪测量了输出激光的光束质量, 结果为 $M_x^2 = 1.18$ 和 $M_y^2 = 1.19$, 如图 4 所示。

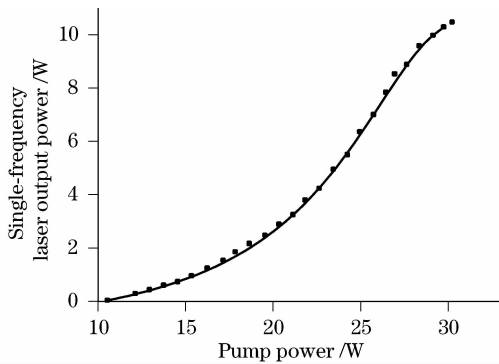


图 3 1064 nm 单频激光输出功率-抽运功率曲线

Fig. 3 Curve of single-frequency output power versus pump power at 1064 nm

用 THORLABS 公司的 SA200-9A 型扫描法布里-珀罗腔干涉仪对输出激光进行了模式测量, 结果如图 5 所示, 证明输出激光为单频激光。

图 6 为实验监视的激光器在自由运转情况下的频率漂移, 1 min 内激光器的频率漂移为 68.65 MHz。

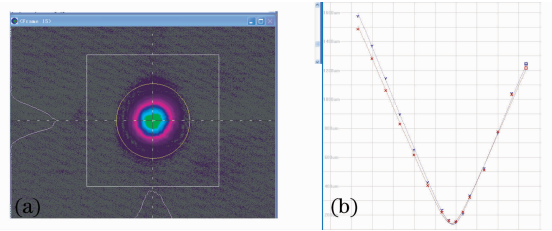


图 4 单频激光光束质量测试图

Fig. 4 Test beam quality of single-frequency laser

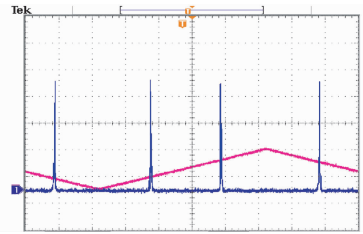


图 5 单频激光的法-珀频谱

Fig. 5 Fabry-Pérot spectrum of the single frequency

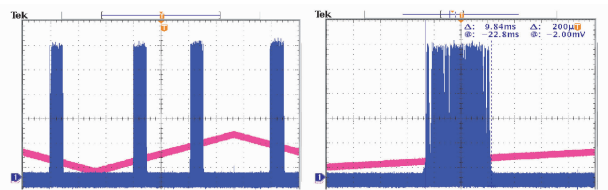


图 6 1 min 内激光的频率漂移

Fig. 6 Fluctuation of laser frequency in a minute

激光器输出功率达到 10.48 W 时, 连续运转 4 h, 监测输出功率波动如图 7 所示, 测得功率的不稳定度优于 0.5%。

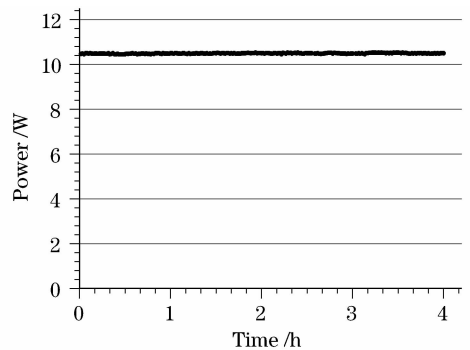


图 7 单频激光功率波动监测图

Fig. 7 Fluctuation of single-frequency laser power

4 结 论

通过对高功率端抽运“8”字环形谐振腔结构, 在稳腔条件下工作物质中心激光束腰与抽运平均光斑进行理论模拟, 在此基础上对连续激光二极管端抽

运 Nd:YVO₄单频激光器进行了实验研究。在室温下,工作物质采用自然散热,获得了转换效率高、光束质量好以及稳定性高的连续红外 10 W 线偏振单频激光输出。

参 考 文 献

- 1 T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic unidirection single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- 2 J. Harrison, A. Finch, J. H. Flint *et al.*, Broad-band rapid tuning of a single-frequency diode-pumped neodymium laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4): 1123~1130
- 3 P. Nachman, J. Munch, R. Yee. Diode-pumped frequency-stable tunable continuouswave Nd: glass laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(2): 317~322
- 4 Li Xiaoying, Jing Jietai, Pan Qing *et al.*. Design of LD pumped type II noncritical phase-matching intracavity frequency-doubled Nd: YAP/KTP Ring Laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 1~5
李小英,荆杰泰,潘庆等.LD抽运II类非临界相位匹配内腔倍频单频Nd:YAP/KTP激光器的设计[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 1~5
- 5 Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. High power single-frequency Nd:YVO₄ laser dual-end-pumped by diode laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **A10**(2): 87~91
赵晶云,张宽收. LD双端端面抽运的高功率连续单频Nd:YVO₄激光器[J]. *量子光学学报*, 2004, **A10**(2): 87~91
- 6 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
- 7 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.
- 8 <http://www.castech.com/newEbizportalFG/portal/html/index.html>
- 9 Chen Sanbin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong *et al.*. Experimental study of a ring cavity configuration single-frequency Nd:YVO₄ Laser. *Optical Technique*, 2010, **36**(1): 7~9
陈三斌,周寿桓,赵鸿等.单频环形腔Nd:YVO₄激光器实验研究[J]. *光学技术*, 2010, **36**(1): 7~9
- 10 A. Yariv. *Quantum Electronics*. [M]. Liu Songhao, Wu Cunkai, Wang Mingchang Transl. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1983: 136~145
A. 亚里夫. *量子电子学*[M]. 刘颂豪, 吴存恺, 王明常译. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 136~145
- 11 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. Quant. Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~1429