

文章编号 : 0253-2239(2001)03-0271-03

# 激光二极管抽运的高输出单频稳频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器\*

崔芙云 王海波 马 艳 郜江瑞

(山西大学光电研究所 教育部量子光学重点实验室,太原 030006)

摘要: 研制了光纤耦合的激光二极管抽运的单频稳频 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器。在输入抽运功率为 6 W 的情况下,获得 2 W 稳定单频红外输出,光-光转换效率为 33.3%,电-光转换效率为 10%。通过边带稳频系统将输出激光频率锁定在法布里-珀罗共焦参考腔的中心频率上,频率稳定性优于 400 kHz。

关键词: Nd:YVO<sub>4</sub>晶体;转换效率;频率稳定性

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## 1 引 言

在诸如相干信息处理、频率计量、量子光学、引力波测量和量子信息等众多领域,单频激光器显得尤为重要<sup>[1~4]</sup>。采用激光二极管抽运的固体激光器由于热效应、机械稳定性都得到极大改善,大大促进了单频激光器的发展与应用。在适合激光二极管抽运的众多激光晶体中,Nd:YVO<sub>4</sub>具有发射截面大、吸收系数高和吸收谱宽等优良性质得到广泛应用<sup>[5,6]</sup>。内腔倍频虽然结构紧凑、转换效率高,但内腔倍频非线性过程不可避免地影响激光器的稳定性。外腔谐振倍频虽然增加了技术难度,但同样可获得较高的倍频转换效率,激光器的稳定性亦可得以改善。为此,我们首先研制了 Nd:YVO<sub>4</sub>单频稳频激光器,下一步将利用外腔谐振倍频产生稳定绿光。

本文采用 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体作增益介质,考虑抽运光的光束质量因子和晶体热效应,设计出由四个腔镜组成的环形谐振腔。在输入抽运功率为 6 W 的情况下,获得 2 W 单频红外输出,光-光转换效率为 33.3%,电-光转换效率为 10%。通过边带稳频系统将输出激光频率锁定在法布里-珀罗共焦参考腔的中心频率上,频率稳定性优于 400 kHz。

## 2 实验装置及腔形设计

实验采用光纤耦合的激光二极管(FAP<sup>TM</sup>)作抽运源,通过对工作温度的调节,使其发射激光的中心

波长落在 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的吸收峰 808 nm 上。保持激光二极管工作温度不变,实测的驱动电流与输出功率基本上呈线性关系。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的吸收峰较宽,对激光二极管的工作温度要求不是很严。

考虑到激光二极管的寿命,工作电流选在  $I = 20.00$  A,即最大驱动电流的 85%,此时激光二极管输出功率为 7.5 W 左右。由光纤耦合激光二极管输出的抽运光光斑直径 800  $\mu$ m,经 1 m 长的光纤耦合输出,光纤芯径为 800  $\mu$ m,数值孔径为 0.37。用两个平面凸透镜将抽运光聚焦到 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体内部,聚焦系统的传输效率为 80%。

激光二极管抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub>单频稳频激光器采用‘8’字型环形腔结构,如图 1 所示。

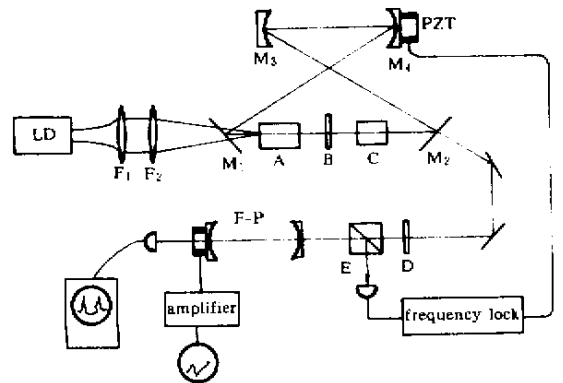


Fig. 1 Experimental setup.  $F_1, F_2$ : lenses;  $M_1$ : input coupling;  $M_2$ : output coupling;  $M_3, M_4$ : high reflection mirrors; A: Nd:YVO<sub>4</sub> crystal; B: half wave plate; C: TGG crystal; D: half wave plate; E: polarizing beam splitter; F-P: confocal cavity

$M_1$  为输入耦合镜,对 1.06  $\mu$ m 高反,对 808 nm 增透。 $M_2$  为输出耦合镜,  $T_{1.06 \mu m} = 6.5\%$ 。 $M_3, M_4$

\* 国家自然科学基金(69778015) 山西省自然科学基金与山西省归国留学基金资助项目。

为高反镜。实验所用 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, Nd 掺杂的原子质量分数为 0.5%。腔内插入由 λ/2 波片和放在磁场中的 TGG 晶体(使激光偏振方向转动 7°)构成的单向器,使激光器单向运转。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体是偏振激发,不需要在腔内插入布氏窗。在驱动电流为  $I = 20.00$  A 时,耦合到 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的实际功率为 6 W,其中约 25% 的功率 ( $P_i = 1.5$  W)发热产生热透镜效应,热焦距为<sup>[7]</sup>:

$$f_t = \frac{\pi k_c w_p^2}{P(\text{dn}/dT)} \left[ \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right],$$

其中热传导系数  $k_c = 0.054$  W/cmK;  $w_p$  为抽运光斑半径,聚焦后的光斑半径为 300 μm; Nd:YVO<sub>4</sub>折射率的温度系数  $\text{dn}/dT = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6}/\text{K}$ ; 吸收系数  $\alpha = 14.8$  cm<sup>-1</sup>,晶体长度  $l = 5$  mm。根据上述参数计算,  $f_t \approx 300$  mm。对晶体进行水冷的情况下,实验中测得其热焦距为 300 mm 左右,与上述计算一致。晶体温度过高会影响到激光输出模式,且输出功率也略有下降。考虑抽运光的光束质量因子,遵循光纤耦合激光二极管的最佳抽运点大小的原则<sup>[6]</sup>,以及热不灵敏条件,按照抽运光与腔 TEM<sub>00</sub>模相匹配原理,设计腔型、选取腔镜参数。图中的 M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub> 的曲率半径均为  $R_3 = R_4 = 100$  mm,总腔长  $L = 586$  mm。其中 M<sub>3</sub> 到 M<sub>2</sub> 的距离为 147 mm, M<sub>4</sub> 到 M<sub>1</sub> 的距离为 155 mm。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体距 M<sub>1</sub> 的距离为 25 mm,在上述参数条件下通过传输矩阵计算,可得到 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体内的光斑半径。

以晶体中心为参考点的等价薄透镜序列如图 2 所示,其传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$A = 1 - \frac{L_3}{f_4} - \left( \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_1} \right) \left[ L_3 + L_2 \left( 1 - \frac{L_3}{f_4} \right) \right] - \\ \frac{L_1}{f_1} \left\{ 1 - \frac{L_3}{f_4} - \frac{1}{f_3} \left[ L_3 + L_2 \left( 1 - \frac{L_3}{f_4} \right) \right] \right\},$$

$$B = L_3 + L_2 \left( 1 - \frac{L_3}{f_4} \right) + \\ L_1 \left\{ 1 - \frac{L_3}{f_4} - \frac{1}{f_3} \left[ L_3 + L_2 \left( 1 - \frac{L_3}{f_4} \right) \right] \right\},$$

$$C = -\frac{1}{f_4} - \frac{1}{f_3} \left( 1 - \frac{L_2}{f_4} \right) - \\ \frac{1}{f_1} \left\{ 1 - \frac{L_2}{f_4} + L_1 \left[ -\frac{1}{f_4} - \frac{1}{f_3} \left( 1 - \frac{L_2}{f_4} \right) \right] \right\},$$

$$D = 1 - \frac{L_2}{f_4} + L_1 \left[ -\frac{1}{f_4} - \frac{1}{f_3} \left( 1 - \frac{L_2}{f_4} \right) \right].$$

式中  $f_3$ 、 $f_4$  为镜 M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub> 的焦距。

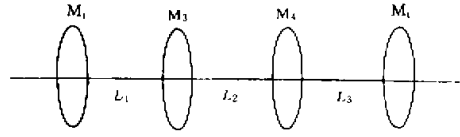


Fig.2 Equivalent thin lens series, start at the center of Nd:YVO<sub>4</sub>

Nd:YVO<sub>4</sub>晶体内光斑半径:

$$w_c = \left[ \frac{\lambda |B|}{\pi n} \sqrt{1 - \left( \frac{A+D}{2} \right)^2} \right]^{1/2} = 320 \mu\text{m}$$

晶体内激光光斑大小基本与抽运光吻合,可有效利用抽运区域。激光器工作在热不灵敏条件下<sup>[8]</sup>:

$$dw/df_t = 0 \Rightarrow A + D = 0$$

采用边带稳频方法(Pound-Drewe 技术),可将激光器频率锁定在法布里-珀罗参考腔的中心频率上。

### 3 实验结果及分析

图 3 为实验中测得的连续基波输出功率与抽运光功率的关系曲线。在腔形设计时考虑了晶体的热透镜效应,所设计的腔形只在某一工作点,即  $I = 20.00$  A (有效抽运光功率为 6 W)附近达到较理想的腔形。在其他工作点,由于 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的热焦距随着抽运功率而变化,要得到高效稳定的单频红外输出,还必须依据新的热焦距重新来设计腔形。

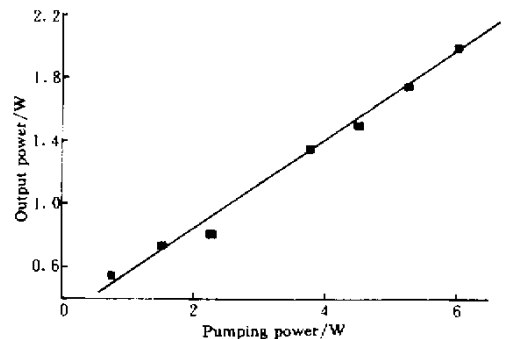


Fig.3 Output power with single mode versus pumping power

在驱动电流  $I = 20.00$  A 的情况下,用法布里-珀罗腔监视激光输出模式,如图 4 所示,激光器单频运转。法布里-珀罗腔自由光谱范围为 750 MHz,腔的精细常数  $F = 100$ 。激光器自由运转情况下,短期(1分钟内)频率漂移小于 3 MHz。稳频调制频率为 24 MHz,将参考腔的反射信号经混频、放大后控制激

光器腔长,使激光器的频率锁定在法布里-珀罗参考腔的中心频率上。

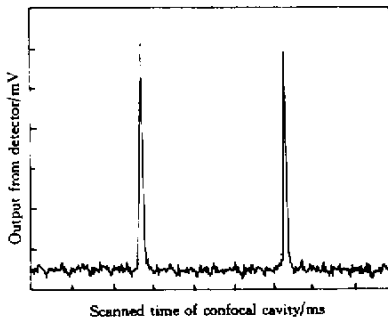


Fig. 4 Transmission from scanned confocal cavity

闭环锁定后参考腔的透过率曲线如图 5 所示,透过率曲线的峰-峰值功率波动小于 3.3%,对应的频率波动小于 400 kHz,即激光器的频率稳定性优于

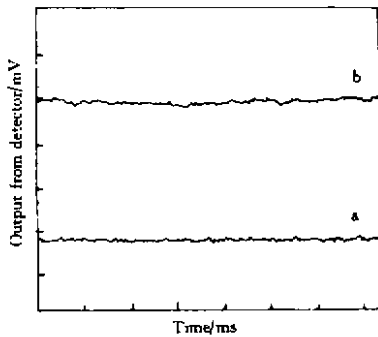


Fig. 5 Transmission from locked reference cavity. a: Transmitted power versus zero output; b: Transmitted power versus 2 W output

400 kHz。

结论 考虑到晶体热透镜效应,通过腔形、腔长的设计和选择,在有效抽运功率为 6 W 的情况下,获得稳定的 2 W 单频红外输出,光-光转换效率为 33.3%,电光转换效率为 10%,通过边带稳频反馈系统将输出激光频率锁定在法布里-珀罗共焦参考腔的中心频率上,频率稳定性优于 400 kHz。

### 参 考 文 献

- [1] Wong N C. Optical frequency division using an optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(20):1129 ~ 1131
- [2] Schneider K, Bruckmeier R *et al.*. Bright squeezed-light generation by a continuous-wave semimono-parametric amplifier. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(17):1396 ~ 1398
- [3] Bruckmeier R *et al.*. Quantum nondemolition measurements improved by a squeezed meter input. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(7):1243 ~ 1246
- [4] Furusawa A, Sørensen J L, Braunstein S L *et al.*. Unconditional quantum teleportation. *Science*, 1998, **282**(5389):706709
- [5] He Jingliang *et al.*. Continuous-wave, output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(6):418 ~ 419
- [6] Brignon A, Huignard J.-P. Continuous-wave operation of saturable-gain degenerate four-wave mixing in a Nd:YVO<sub>4</sub> amplifier. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20):2096 ~ 2098
- [7] Innocenzi M E, Yura H T, Fincher C L *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19):1831 ~ 1834
- [8] Gao Jiangrui, Wang Hai *et al.*. Intracavity frequency-doubled and stabilized cw ring Nd:YAG laser with a pair of KTP crystal. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(9):1519 ~ 1522

## Frequency-Stabilized High Power Nd:YVO<sub>4</sub> Ring Single-Frequency Laser End-Pumped by Diode Laser

Cui Fuyun Wang Haibo Ma Yan Gao Jiangrui

(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Key Laboratory for Quantum Optics of Ministry of Education, Taiyuan 030006)

(Received 31 August 1999; revised 6 December 1999)

**Abstract:** A CW frequency-stability ring Nd:YVO<sub>4</sub> laser end-pumped by a laser diode through fiber-coupling is designed and experimentally demonstrated. The output laser frequency is locked at the central frequency of Fabry-Pero confocal reference cavity, the frequency stability was better than 400 kHz. Up to 2 W output power with the frequency-stability better than 620 kHz is achieved at 6 W input power. The conversion efficiency from light to light is 33.3% and the conversion efficiency from electric power to light is 10%

**Key words:** Nd:YVO<sub>4</sub> crystal; conversion efficiency; frequency stability