

文章编号: 0253-2239(2006)07-1069-4

# 激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 实现 1386 nm 连续波激光输出

李海峰 周睿 赵璞 姚建铨 王鹏

(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)

**摘要:** 在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 跃迁带内,除了 1342 nm 激光辐射之外,其它的跃迁谱线由于小的受激发射截面和强的寄生振荡,很难形成激光振荡。通过调整谐振腔损耗,获得了光纤耦合激光二极管端面抽运 1386 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器激光连续输出。在抽运功率达到 4.24 W 时,得到了 305 mW 的 1386 nm 激光连续输出,最高输出功率下的斜效率为 13.9%。实验中还观察到了 1342 nm 和 1386 nm 的双波长运转。根据抽运阈值能量和实验数据,计算得到了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中 1386 nm 激光辐射处的受激发射截面大约为  $(3 \pm 1) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。

**关键词:** 激光器; 激光二极管; 1386 nm; 端面抽运; Nd:YVO<sub>4</sub>

中图分类号: TN241; TN248.1 文献标识码: A

## 1386 nm Continuous Wave Output from Laser Diode End-Pumped 1386 nm Nd:YVO<sub>4</sub> Laser

Li Haifeng Zhou Rui Zhao Pu Yao Jianquan Wang Peng

(Institute of Laser & Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Transition spectra in the <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> transition band of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal are too weak to form laser oscillation for the small stimulated emission cross section and strong parasitical oscillation, except for the 1342 nm wavelength. By adjusting the loss of the resonant cavity, 1386 nm continuous wave output from fiber coupled laser diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser is achieved, which reaches 305 mW with pump power of 4.24 W, and the slope efficiency is 13.9% with the highest output power. Continuous wave outputs of 1342 nm and 1386 nm are also observed in the experiment. The stimulated emission cross section of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal at the wavelength of 1386 nm is calculated as about  $(3 \pm 1) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , according to the pumping threshold energy and experimental data.

**Key words:** lasers; laser diode; 1386 nm; end-pumped; Nd:YVO<sub>4</sub>

## 1 引 言

波长 1.3 μm 附近的激光在工业加工、光谱学、光纤通信、医学以及激光显示等方面都有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。作为一种新型的激光光源,1386 nm 激光有其特殊的用途。相比其他倍频红光激光器而言,1386 nm 倍频红光在激光显示中有更好的饱和度。同时它更适合一些长波长激光加工场合。因而,产生高效率、高功率的 1386nm 激光振荡是一个很有应用前景的方向。

激光二极管(LD)抽运的固体激光器具有效率高、结构紧凑、性能稳定、寿命长以及光束质量好等优点<sup>[3]</sup>。激光二极管端面抽运方式有更高的抽运功率密度,因而有可能在一些弱跃迁谱线处获得激光振荡。目前,常用于产生 1.3 μm 波段的激光晶体有 Nd:YAG<sup>[4,5]</sup>, Nd:YVO<sub>4</sub><sup>[6]</sup> 以及 Nd:GdVO<sub>4</sub><sup>[7,8]</sup>。其中,Nd:YVO<sub>4</sub> 由于具有发射截面大,吸收系数高,输出为线偏振等优点而备受人们青睐。目前它已成为激光二极管抽运固体激光器的理想工作材料。但是

作者简介:李海峰(1980~),男,内蒙古包头市人,天津大学硕士研究生,主要从事大功率激光器及非线性光学频率变换方面的研究。E-mail: flying19801980@126.com

收稿日期: 2005-12-12; 收到修改稿日期: 2006-02-27

长久以来,人们更多的关注于如何从Nd:YVO<sub>4</sub>晶体中得到高效、高功率的1064 nm ( ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ ), 1342 nm ( ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ )和914 nm ( ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ )激光振荡。在 ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ 跃迁带内,除了1342 nm激光辐射之外,其他的跃迁谱线由于小的受激发射截面和强的寄生振荡,很难形成激光振荡。有很多文献报道了Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的受激发射截面和荧光分支比<sup>[9~11]</sup>。但是至今没有1386 nm激光谱线的受激发射截面和荧光分支比的报道。本文通过激光二极管端面抽运Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,获得了1386 nm连续激光输出。并计算得到了这一跃迁辐射谱线处受激发射截面的大小。

## 2 实 验

${}^4I_{13/2}$ 多能级结构及相应1386 nm谱线的能级跃迁结构如图1所示。

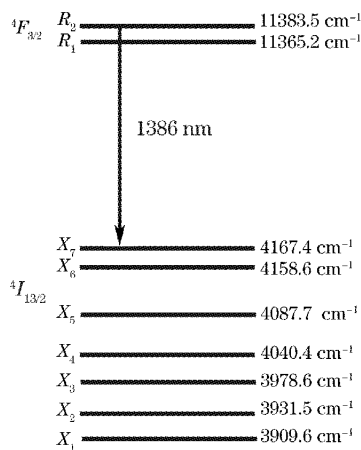


图1 Nd:YVO<sub>4</sub>中从 ${}^4F_{3/2}$ 到 ${}^4I_{13/2}$ 多能级跃迁结构

Fig. 1 Transitions from  ${}^4F_{3/2}$  to  ${}^4I_{13/2}$  manifold energy levels in Nd:YVO<sub>4</sub> crystal

其中1386 nm激光是从 ${}^4F_{3/2}$ 的R<sub>2</sub>亚能级到 ${}^4I_{13/2}$ 的X<sub>7</sub>亚能级的受激辐射,其精确输出波长为1385.8 nm。利用Agilent光谱分析仪(型号86142B)对Nd:YVO<sub>4</sub>晶体从1100 nm到1500 nm范围内的荧光光谱进行扫描,结果如图2所示。

实验装置如图3所示,采用简单的平-平腔结构,腔长20 mm。利用808 nm激光二极管连续光纤抽运源,光纤纤芯直径为400 μm,数值孔径为0.22。输出光束经耦合系统输入尺寸为3 mm×3 mm×3 mm的Nd<sup>3+</sup>离子掺杂摩尔分数为0.7%的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体中,光学耦合系统对抽运光的透过率为90%。增益介质中的抽运光斑直径为440 μm。由于1386 nm辐射谱线与1342 nm辐射谱线之间

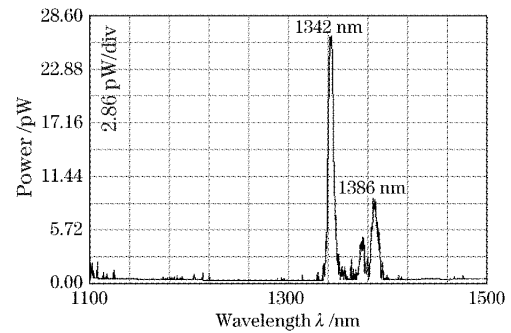


图2 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体从1200 nm到1500 nm荧光光谱  
Fig. 2 Fluorescence spectra of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal from 1200 nm to 1500 nm

仅仅相差44 nm,试图通过对Nd:YVO<sub>4</sub>晶体同时镀1342 nm增透膜和1386 nm高反膜( $R > 99.8\%$ )是十分困难的。Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的抽运端面镀对1342 nm和1386 nm高反膜( $R > 99.8\%$ )以及对808 nm和1064 nm增透膜。晶体的另一端镀对1386 nm增透膜。平面耦合输出镜对1386 nm的透过率为 $T = 0.73\%$ ,还同时满足对1064 nm透过率为 $T = 90\%$ ,对1342 nm透过率为 $T = 6.94\%$ ,以期抑制1064 nm和1342 nm的激光起振。1064 nm和1342 nm的往返反射率分别小于0.1%和93%。在实验中,由于1342 nm的往返反射率太大,因而未能压制其寄生振荡,观察到了1386 nm和1342 nm双波长连续输出。

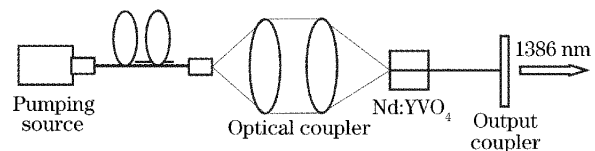


图3 实验结构示意图

Fig. 3 Sketch of experimental structure

当注入功率达到1.15 W时,1386 nm光波开始起振。但是由于耦合输出镜对1342 nm的往返反射率过高,所以当注入功率达到1.5 W时,1342 nm光波也开始起振,这时观察到1342 nm和1386 nm的双波长运转。此时每一个波长的输出功率对耦合输出镜的失调都很敏感<sup>[12]</sup>。通过调整谐振腔损耗,成功抑制1342 nm激光振荡并获得了单波长1386 nm激光连续输出,输入-输出关系如图4所示。利用Agilent光谱分析仪(型号86142B)测得的激光发射谱线如图5所示。当抽运功率为4.24 W时,获得了305 mW的1386 nm连续激光输出,最大输出时的斜率效率 $\eta_s$ 为13.9%。这种通过调整谐振腔获得1386 nm单波长输出的方法增加了1386 nm激光的往

返损耗,导致抽运阈值升高至 1.94 W,斜率效率有所下降。当抽运功率大于 4.24 W 时,仍然试图通过调整谐振腔的方法来增加 1342 nm 的相对往返损耗,抑制其振荡,但是激光振荡还是转移至增益更大的 1342 nm 辐射谱线上。如果抽运功率继续增加,激光输出波长跳变至 1342 nm,同时在此波长处输出功率增加至 900 mW,这是两条谱线粒子数竞争的结果。如果有更好的耦合输出镜对 1342 nm 辐射谱线提供足够高的透过率抑制其强烈的寄生振荡,那么有望将来实现数瓦 1386 nm 单波长连续输出。

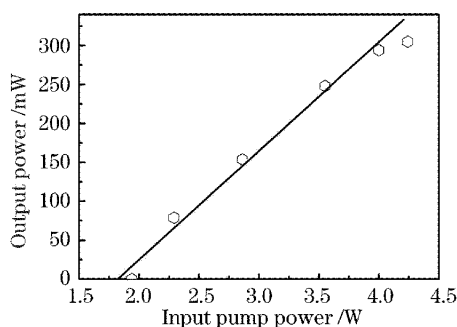


图 4 1386 nm 激光输出-输入关系

Fig. 4 Output power versus input power at 1386 nm

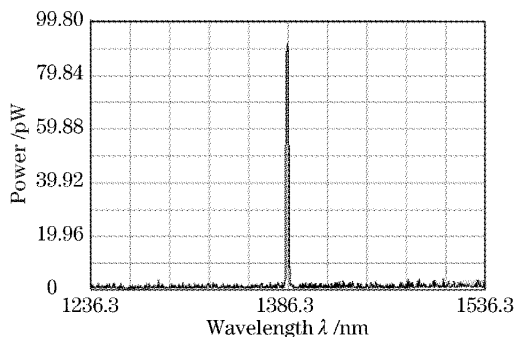


图 5 1386 nm 激光发射谱线

Fig. 5 Spectrum of 1386 nm laser radiation

### 3 讨 论

受激发射截面  $\sigma_e$  可以通过三种方法来确定:分光镜法,阈值公式法和激光效率比较法<sup>[13]</sup>。分光镜法有很高的精确度,但是需要大量的分光仪器,因而整个装置不仅结构复杂而且价格昂贵。激光效率比较法不需要精确和绝对的半径探测标准,也不需要精确测量抽运光斑的直径,晶体的某一未知受激发射截面可以通过与已知发射截面的比值来得到。激光效率比较法与分光镜法相比更简单、方便而且也有相当的精确度。但是,我们实验组仅有一个耦合输出镜能够得到 1386 nm 激光输出。所以采用阈

值公式法求 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体输出 1386 nm 激光时的受激发射截面的近似值。

受激发射截面  $\sigma_e$  可以通过以下公式得到:

$$\sigma_e = \frac{\pi(\omega_p^2 + \omega_c^2)h\nu_p(T+L)}{4P_{th}\tau_f\eta_p}, \quad (1)$$

$\omega_p$  和  $\omega_c$  分别是抽运光斑半径和腔模光斑半径,  $h\nu_p$  是抽运光子能量,  $T$  是 1386 nm 光波的耦合输出透过率,  $L$  是往返腔损耗,  $P_{th}$  是吸收的阈值抽运能量,  $\tau_f$  为荧光寿命,  $\eta_p$  是抽运效率。当以阈值抽运能量注入时,热透镜焦距大约为 200 mm,在晶体内部腔模光斑尺寸没有变化。抽运效率  $\eta_p$  可以通过以下公式得到<sup>[14]</sup>:

$$\eta_p = \frac{1}{l} \int_0^l dz \frac{4\omega_p^2(z)\omega_c^2(z)}{[\omega_p^2(z) + \omega_c^2(z)]^2}, \quad (2)$$

在估算中用到的基本参量有:  $\omega_p = 220 \mu\text{m}$ ,  $\omega_c = (170 \pm 10) \mu\text{m}$ ,  $\tau_f = 74 \mu\text{s}$ <sup>[10]</sup>,  $T = 0.73\%$ ,  $L = 0.0259$ ,  $\lambda = 1386 \text{ nm}$ 。通过 Findlay-Clay 方法测得 1342 nm 的往返腔损耗  $L$ 。最后得到其受激发射截面为  $3 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。由于仅有一片可以使 1386 nm 单独起振的耦合输出镜。用 Findlay-Clay 方法测量  $L$  时,利用 1342 nm 的往返损耗代替 1386 nm 的往返损耗。由于他们波长只相差 44 nm,因而误差应该不大于 5%。在这里由于替代而产生误差的参量应该有  $\omega_p$  和  $\omega_c$ 。抽运光斑半径大约为  $(220 \pm 20) \mu\text{m}$ ,除此之外,腔模光斑尺寸也有一些误差。因而受激发射截面应该是  $(3 \pm 1) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。

### 4 结 论

报道了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1386 nm 连续激光输出并根据实验结果计算得到了其受激发射截面。由于实验室条件以及镀膜技术的限制,如果有更好的耦合输出镜,有望在将来得到数瓦 1386 nm 连续波输出。

### 参 考 文 献

- Huang Wei, Gao Xiaoming, Deng Lunhua *et al.*. High-resolution absorption spectrum of water vapor near 1.315  $\mu\text{m}$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 256~260 (in Chinese)  
黄伟,高晓明,邓伦华等. 1.315  $\mu\text{m}$  区域高分辨水汽吸收光谱研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 256~260
- Ma Hong, Yi Xinjian, Chen Sihai. 1.3  $\mu\text{m}$  high gain polarization-insensitive strained quantum-well semiconductor optical amplifier [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 971~974 (in Chinese)  
马宏,易新建,陈四海. 1.3  $\mu\text{m}$  高增益偏振无关应变量子阱半导体光放大器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 971~974
- Qinghua Xue, Quan Zheng, Yikun Bu *et al.*. LD-pumped passively Q-switched red laser at 660 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*,

- 2004, 2(12): 708~709
- 4 Y. Inoue, S. Fujikawa. Diode-pumped Nd:YAG laser producing 122-W CW power at 1.319  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, 36(6): 751~756
- 5 I. Freitag, A. Tünnermann, H. Welling. Intensity stabilised Nd:YAG ring laser with 1.5 W single-frequency output power at 1.357  $\mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 1997, 33(9): 777~778
- 6 Zheng Yi, Song Lianke, Xu Degang *et al.*. 1342 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser end-pumped by a diode-laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(8): 1141~1144 (in Chinese)  
郑 义, 宋连科, 徐德刚 等. 激光二极管端面抽运的 1342 nm Nd:YVO<sub>4</sub>激光器[J]. *光学学报*, 2000, 20(8): 1141~1144
- 7 Yang Jimin, Liu Jie, He Jinglian. Continuous wave 1.34  $\mu\text{m}$  laser of diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(5): 337~338 (in Chinese)  
杨济民, 刘 杰, 何京良. 二极管泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub>连续波 1.34  $\mu\text{m}$  激光器[J]. *激光与红外*, 2004, 34(5): 337~338
- 8 Du Chenlin, Qin Lianjie, Meng Xianlin *et al.*. Study of high-power continuous-wave 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:GdVO<sub>4</sub> laser end-pumped by laser-diode-array[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, 30(8): 681~683 (in Chinese)  
杜晨林, 秦连杰, 孟宪林. LD 抽运高功率连续波 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(8): 681~683
- 9 A. Sennaroglu. Efficient continuous-wave operation of a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1342 nm[J]. *Opt. Commun.*, 1999, 164(4~6): 191~197
- 10 J. G. Sliney, K. M. Leung, M. Birnbaum *et al.*. Lifetimes of the <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> state in Nd:YVO<sub>4</sub>[J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, 50(5): 3778~3779
- 11 Wang Zhengping, Sun Xun, Xu Xinguang *et al.*. Measuring effective stimulated emission cross-sections of Nd:YVO<sub>4</sub> crystals by the theory of LD end-pumped solid-state lasers[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, 18(2): 103~106 (in Chinese)  
王正平, 孙 洵, 许心光 等. LD 端面泵浦固体激光器理论在测量 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体有效受激发射截面中的应用[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(2): 103~106
- 12 Y. F. Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, 70(4): 475~478
- 13 A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher. Stimulated emission cross sections of Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:La<sub>2</sub>Bc<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (BeL)[J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, 52(4): 3067~3068
- 14 A. Sennaroglu, B. Pekerten. Experimental and numerical investigation of thermal effects in end-pumped Cr<sup>4+</sup>:forsterite lasers near room temperature[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, 34(10): 1996~2005

## "名家讲坛" 征稿启事

为了让读者进一步全面了解光电子各领域的发展历程及研究进展,《激光与光电子学进展》杂志将从 2006 年下半年开始推出专题栏目"名家讲坛",邀请国内外著名学者、教授、高级研发人员讲述激光与光电子技术发展过程中的关键技术、重要突破以及目前的研究热点。内容涉及理论探讨、技术突破、材料研发和市场开拓等相关领域。同时面向广大读者征稿,要求如下:

- 1、作者在激光与光电子应用领域具有一定造诣,并在某一方面有较深入的研究或对该领域的发展态势有较全面和前瞻的把握。
- 2、文章涉及内容应在激光与光电子领域占有重要地位,具有客观的总结性或者高度的前瞻性。
- 3、文章最好配有一定数量的图表(最好为彩色),字数不少于 6000,最好不超过 20 000。
- 4、投稿同时,请作者提供作者简介,包括研究领域、研究成果等。
- 5、论文一经录用,本刊将优先发表,并酌付稿酬。
- 6、投稿地址:上海市 800-211 邮政信箱《激光与光电子学进展》编辑部



欢迎大家踊跃投稿,让我们共同期待"名家讲坛"的精彩呈现!

邮政编码: 201800

电子邮件: gwjg@mail.shcnc.ac.cn

联系电话: 021-69918166

《激光与光电子学进展》编辑部

主编 刘其元