

文章编号: 0258-7025(2010)09-2309-05

# 高效率连续环形腔单频激光器

陈三斌<sup>1,2</sup> 周寿桓<sup>1,2</sup> 赵 鸿<sup>1,2</sup> 唐晓军<sup>1,2</sup> 郭丽娜<sup>2</sup> 王 超<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015; <sup>2</sup> 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要** 报道了连续激光二极管单端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形腔结构的单频激光器实验研究。为了减小激光器的热效应, 实验中采用了一种新型的抽运结构形式并获得了良好的实验效果。在室温下工作物质采用自然散热, 当抽运功率为 22.5 W 时, 获得了 9.9 W 的 1064 nm 单频激光输出, 对应的光-光转换效率约为 44.1%; 光束质量为  $M_x^2 = 1.14$  和  $M_y^2 = 1.12$ ; 输出激光 1 min 内频率漂移约为 83.7 MHz; 7 h 功率不稳定性优于 0.5%。

**关键词** 激光器; 单频激光器; 环形腔; 端面抽运; 光-光转换效率; Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体

**中图分类号** O433.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2309

## High Efficiency Continuous-Wave Ring Cavity Single-Frequency Laser

Chen Sanbin<sup>1,2</sup> Zhou Shouhuan<sup>1,2</sup> Zhao Hong<sup>1,2</sup> Tang Xiaojun<sup>1,2</sup>  
Guo Lina<sup>2</sup> Wang Chao<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)  
(<sup>2</sup> North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** The experimental results of continuous laser diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> ring cavity configuration single frequency laser are reported. To reduce the influence of heat effect in laser, a new pump configuration is designed and better results are achieved. At room temperature, 1064 nm single frequency laser with the power up to 9.9 W is obtained from pump power of 22.5 W. Optical-optical conversion efficiency is about 44.1%. Beam quality is  $M_x^2 = 1.14$  and  $M_y^2 = 1.12$ . Frequency excursion is 83.7 MHz in one minute. Instability of output power is less than 0.5% in 7 h.

**Key words** lasers; single-frequency laser; ring cavity; end-pumped; optical-optical conversion efficiency; Nd:YVO<sub>4</sub> crystal

## 1 引 言

单频激光由于其优良的频率特性和输出功率稳定性而被广泛应用于相干光学、光谱学、非线性光学、引力波测试以及测风雷达等领域。随着激光二极管(LD)及抽运技术的迅速发展, LD抽运的固体激光器所具有的结构紧凑、效率高、寿命长等诸多优点使得单频激光技术更为实用。实现单频全固态激光运转的方法很多, 一般采用腔内标准具选频法、扭转模腔法、短腔法以及行波环形腔法等<sup>[1~8]</sup>。在诸多应用中需要具有较高功率的单频激光光源, 通常

采用环形腔是获得较大功率单频激光的有效方法之一<sup>[9~11]</sup>。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。其中由激光二极管抽运的掺Nd<sup>3+</sup>固体激光器已成为产生稳定单频激光的有效光源。

Nd:YVO<sub>4</sub>晶体是在单频环形腔激光器中使用较多的工作物质<sup>[8~11]</sup>, 而这种晶体材料对抽运光具有偏振吸收的特性, 通常被忽略, 这不但影响了激光器对抽运光的利用率, 而且还会增加工作物质的热

收稿日期: 2010-04-09; 收到修改稿日期: 2010-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(60890200)和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, 研究员, 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: zshuan@yahoo.com.cn(通信联系人)

压力及影响激光输出的稳定性。为了使激光器更为实用化,本文结合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的特性进行了连续 LD 单端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形腔结构的单频激光器实验研究,采用了新型抽运结构并对环形谐振腔进行了优化分析。在工作物质自然散热情况下,取得了较高的光-光转换效率,获得了高光束质量、高功率、稳定的线偏振 1064 nm 连续单频激光输出。

## 2 实验装置及理论分析

### 2.1 实验装置

图 1 为连续 LD 端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 单频激光器光路结构示意图。其中抽运源采用光纤耦合输出的连续 LD 模块。自行设计了耦合透镜系统,其放大倍率为 1:1.5。经耦合透镜汇聚的抽运光通过 20° 双色镜 M<sub>1</sub> 进入工作物质 Nd:YVO<sub>4</sub>。谐振腔采用

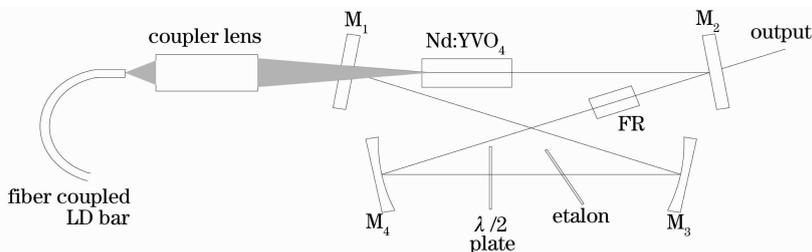


图 1 单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器实验装置

Fig. 1 Single frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser set-up

### 2.2 理论分析

抽运源提供工作物质产生激光的同时伴随产生大量的无用热(形成热效应),限制激光的输出平均功率,还导致激光的光束质量下降,在单频激光器中也存在同样的影响。热透镜效应是由于工作物质的热效应产生的,在端面抽运结构的激光器中,热透镜效应主要包含热致端面畸变效应和热致双折射两种效应<sup>[12]</sup>。对于前者可通过键合工艺(即在掺杂晶体的一端通过键合一小段同基质无掺杂晶体作为抽运光入射端)来减小<sup>[13]</sup>;而键合工艺并不能对后者起作用,有效的方法是降低工作物质的掺杂浓度,从而减小工作物质的吸收抽运光的系数而减轻热致双折射效应<sup>[14]</sup>。减小吸收系数则将会对抽运光的吸收效率产生影响,有许多科研工作者采取了技术措施加以改善,并取得了较好效果。下面是本文对此所采取的一种新方法,并应用于单频环形激光器中进行了实验研究。

#### 2.2.1 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的材料特征及耦合系统

Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体属四方晶体,锆石英结构,是正单轴晶体;吸收光谱宽(0.8 nm);发射截面大

四块镜片组成的“8”字形结构;M<sub>1</sub> 为平-平双色镜,对 808 nm 高透,对 1064 nm 高反;M<sub>2</sub> 为平-平输出镜;M<sub>3</sub> 和 M<sub>4</sub> 均为凹面镜,曲率半径为 150 mm,对 1064 nm 高反;工作物质放置在 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 之间;腔内插入旋光器(FR)和 λ/2 波片来实现腔内激光单向运转;etalon 为厚度 1.015 mm 熔融石英玻璃的标准具,进一步选频;工作物质采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 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 Nd<sup>3+</sup> 的晶体,其原子数分数为 0.3%,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。

( $15.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ );而且具有很强的偏振吸收和偏振辐射的特性。沿 a 轴切割的晶体对 π 偏振的抽运光的吸收系数远大于 σ 偏振的抽运光吸收系数;π 偏振的抽运光不仅有利于提高抽运光吸收效率,而且有利于提高激光发射效率<sup>[15]</sup>。

结合 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体材料的特性,在抽运结构设计上做了改进。由于 LD 模块的抽运光通过光纤耦合输出后成为自然偏振光,如果直接耦合进 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内,对沿 a 轴切割的晶体来说,仅对一半的 π 偏振抽运光吸收很高,而对 σ 偏振的抽运光吸收很少,在文献[16]中对同一块晶体(沿 a 轴方向切割掺杂 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 0.3% Nd:YVO<sub>4</sub>)进行了抽运光的吸收测试,当进入晶体的抽运光为 25 W 的自然偏振光时,透过晶体的抽运光功率为 8.29 W,有大于 1/3 的抽运光没有被有效吸收,大大降低了工作物质对抽运光的吸收效率。而这部分抽运光也将会照到环形腔的某些镜片和镜架上致热,从而引起激光器输出不稳定。为了有效使抽运光转换成激光输出,首先要提高工作物质的吸收效率,因此在实验中,设计耦合透镜时采取选偏和调偏

措施,光路结构示意图如图 2 所示。

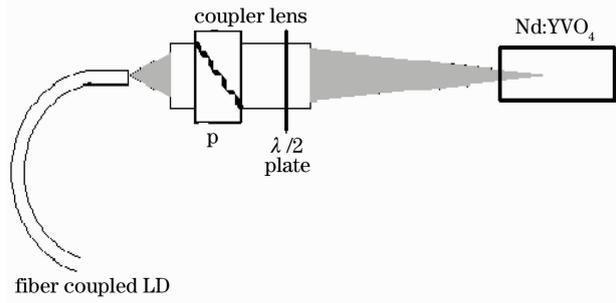


图 2 带有偏振选择及偏振调节的耦合系统

Fig. 2 Coupler system with polarization choice and modulation

用这个系统进行了晶体吸收测试,通过耦合系统的最大抽运光功率为 22.5 W,调节系统中的  $\lambda/2$  波片使得耦合输出的抽运光的偏振方向与沿  $a$  轴切割的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的  $\pi$  偏振相一致,此时透过 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的抽运光功率仅有 1.36 W,仅有 6% 的抽运光透过。因此采用这种耦合系统实现了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对抽运光的高效吸收。

### 2.2.2 环形腔理论分析

LD 抽运的固体激光器由于其抽运波长一般位于增益介质的吸收带内,具有较高的转换效率,决定激光输出效率的参数有抽运光束与激光模式在增益介质中的交叠度。针对实验中采用的端面抽运环形腔激光器,进行了如下分析。

在端抽运结构中,工作物质中的热效应是造成谐振腔工作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简单的理论分析。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<sup>[17]</sup>

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

对于沿  $a$  轴切割的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,(1)式中的相关参数如下<sup>[18]</sup>:热传导系数  $K_c = 5.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;折射率随温度的变化率  $dn/dT = 3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;抽运光在工作物质内的热转换效率  $\xi = 24\%$ ;折射率  $n = 2.183$  (对 1064 nm)。工作物质为 Nd<sup>3+</sup> 掺杂的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,其掺杂原子数分数为 0.3%,根据实验测试的结果和吸收系数公式,计算得到吸收系数  $\alpha \approx 3.51 \text{ cm}^{-1}$ 。

将上述参数代入(1)式得

$$f = 2.429 \times 10^4 \times \frac{\omega_{pa}^2}{P_{in}}. \quad (2)$$

从(2)式可以看出,在端抽运结构中,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  $\omega_{pa}$  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  $M_3$  和  $M_4$  之间的长度为  $L_1$ ;从工作物质中心经  $M_1$  到  $M_3$  的长度为  $L_2$ ;从工作物质中心经  $M_2$  到  $M_4$  的长度为  $L_3$ ;以晶体中心为参考面,则环形腔的矩阵可以写为

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

在紧凑腔型结构下,取值  $L_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 120 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 165 \text{ mm}$ 。在满足谐振腔稳定条件  $\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1$  下,抽运功率为 22.46 W 时,可求得抽运光在晶体内部平均光斑半径范围约为  $0.1744 \leq \omega_{pa} \leq 0.3629 \text{ mm}$ 。

参考面(工作物质中心)处的光斑尺寸半径为<sup>[19]</sup>

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

将(3)式计算得到的结果代入(4)式可得出  $\omega$  与  $\omega_{pa}$  对应关系为

$$\omega = 0.163 \times \left[ 1 - \left( \frac{0.079}{\omega_{pa}^2} - 1.6 \right)^2 \right]^{-1/4}. \quad (5)$$

以  $\omega_{pa}$  为变量对关系式(5)进行计算机模拟,得出如图 3 所示的曲线( $0 < \omega_{pa} \leq 0.5$ )。图中粗线为(5)式的模拟结果,细线为  $\omega = \omega_{pa}$  的一条等倾参考线。

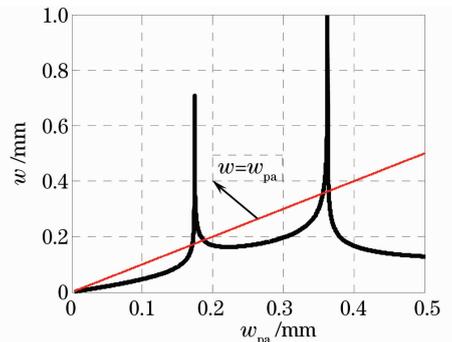


图 3  $w \propto \omega_{pa}$  的关系曲线

Fig. 3 Relation curve of  $w$  versus  $\omega_{pa}$

在高功率端面抽运的固体激光器中,由于热透镜的影响会导致高阶球差;谐振腔本征模和抽运光

束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,又要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。从图 3 中模拟的曲线分析来看,在满足谐振腔稳定(即  $0.1744 \leq \omega_{pa} \leq 0.3629$  mm)条件下,曲线上满足上述条件对应的  $\omega_{pa}$  值可作为一个较为理想的值。

### 2.2.3 最佳输出镜透射率

除了抽运光束与激光模式在增益介质中的交叠度是决定激光效率的参数外,腔的内腔损耗及光功率输出耦合率也是影响激光效率的主要参数。根据激光器的一般理论,内腔损耗越小,激光器的光-光转换效率越高,在内腔损耗和激光器的抽运功率一定的情况下,激光器的输出耦合镜在最佳透射率时,该激光器达到最大光-光转换效率。

因此在抽运功率为 22.46 W 时对不同输出镜透射率进行了激光输出功率的测试,对应的激光输出功率曲线如图 4 所示。

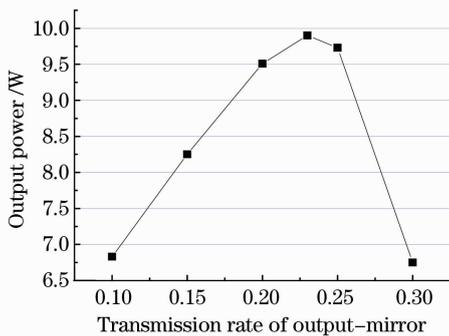


图 4 单频激光输出功率随输出镜透射率的变化曲线

Fig. 4 Output single-frequency laser versus the transmission rate of output mirror

从测试的曲线可以看出,实验中抽运功率为 22.46 W 时,激光器对应的输出透镜的最佳透射率为 23%。

## 3 实验结果

根据 2 节分析结果,通过细致的调节,在接近理论分析得出的理想值  $\omega_{pa}$  处,得到了如下的实验结果:在总抽运光功率为 22.46 W 时,获得了 1064 nm 单频激光输出功率为 9.9 W,光-光转换效率约为 44.1%;测试此功率下的线偏振性,透过检偏器(透射率为  $T_p = 97\%$ )后的最大功率为 9.56 W。图 5 为用 M-92 型激光功率计测得的激光器输出功率-

抽运功率曲线。

在激光器输出功率为 9.9 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,如图 6 所示,结果为  $M_x^2 = 1.14$  和  $M_y^2 = 1.12$ 。

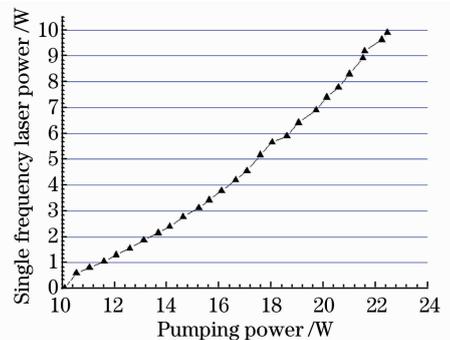


图 5 1064 nm 单频激光输出功率-抽运功率曲线

Fig. 5 Curve of single-frequency output power versus pump power at 1064 nm

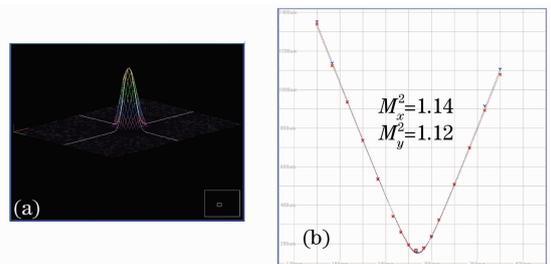


图 6 单频激光光束质量测试图

Fig. 6 Test beam quality of single-frequency laser

用 THORLABS 公司的 SA200-9A 型扫描法布里-珀罗干涉仪对输出激光进行了模式测量,结果如图 7 所示,证明输出激光为单频激光。

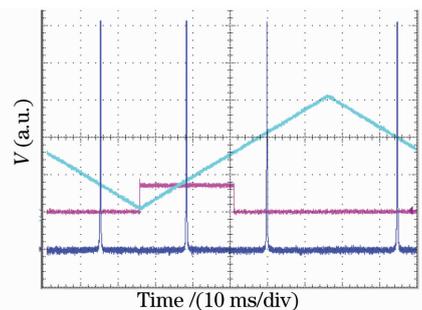


图 7 单频激光的法布里-珀罗频谱

Fig. 7 Fabry-Pérot spectrum of the single frequency

图 8 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 83.7 MHz。

激光器输出功率达到 9.5 W 时,连续运转 7 h,监测输出功率的波动如图 9 所示,测得功率的不稳定度优于 0.5%。

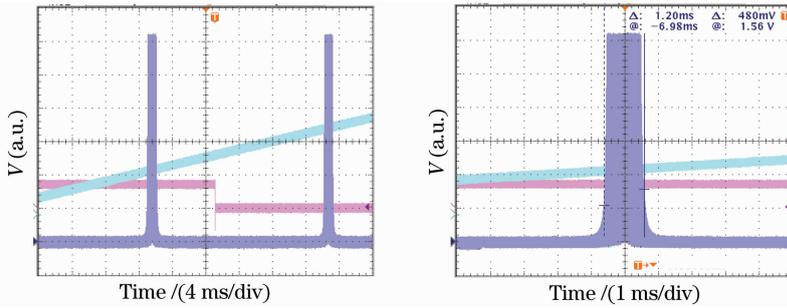


图 8 1 min 内激光的频率漂移

Fig. 8 Fluctuation of laser frequency in a minute

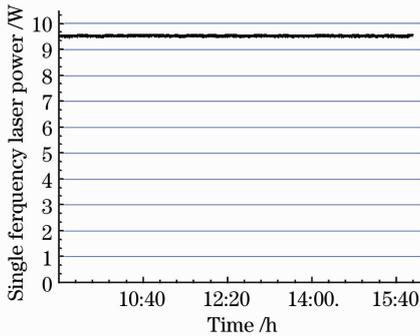


图 9 单频激光功率波动监测图

Fig. 9 Fluctuation of single-frequency laser power

## 4 结 论

在稳腔条件下对工作物质中心激光束腰与抽运平均光斑关系进行分析,结合工作物质 Nd:YVO<sub>4</sub> 特性,在此基础上对连续激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 单频激光器进行了实验研究。工作物质热沉采用自然冷却,获得了转换效率高、光束质量好以及稳定性高的连续红外 9.5 W 线偏振单频激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 T. Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9): 1175~1180
- 2 V. Evtuhov, A. E. Siegman. A "Twisted-mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(1): 142~143
- 3 K. Nakagawa, Y. Shimizu, M. Ohtsu. High power diode-laser-pumped twisted-mode Nd:YAG laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(4): 499~501
- 4 J. J. Zayhowski, A. Mooradian. Single frequency microchip Nd lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(1): 24~26
- 5 J. J. Zayhowski. Frequency-modulated Nd:YAG microchip lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(12): 618~620
- 6 T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2): 65~67
- 7 E. Zang, H. Cao, K. Zhao *et al.*. Investigation of monolithic quasi-planar ring lasers[C]. *SPIE*, 1998, **3549**: 29~34
- 8 Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin *et al.*. All-solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser of single-frequency operation [J].

*Chinese J. Laser*, 2000, **A27**(8): 694~696

张 靖,张宽收,王润林 等. 全固化单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 环形激光器 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8): 694~696

9 Zhao Jingyun, Zhang Kuanshou. High power single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser dual-end-pumped by diode laser[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **A10**(2): 87~92

赵晶云,张宽收. LD 双端面泵浦的高功率连续单频 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *量子光学学报*, 2004, **A10**(2): 87~92

10 Zhang Tiel, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous-wave single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> 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:YVO<sub>4</sub> 环形腔激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1194~1197

11 Chen Sanbin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong *et al.*. 10 W linearly polarized ring cavity configuration CW single-frequency laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 793~796

陈三斌,周寿桓,赵 鸿 等. 10 W 线偏振连续单频环形腔激光器 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 793~796

12 P. J. Hardman, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. High-power diode-bar-pumped intracavity-frequency doubled Nd:YLF laser [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(1-3): 49~52

13 Z. Zhao, T. Li, X. M. Li *et al.*. Investigation of Nd:YVO<sub>4</sub>/YVO<sub>4</sub> composite crystal and its laser performance pumped by a fiber coupled diode laser[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**(1): 176~181

14 X. Y. Peng, L. Xu, A. Asundi. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9): 1291~1299

15 Wang Changqing, Y. T. Chow, Meng Xianlin *et al.*. Fluorescence spectra and laser characteristics of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal excited by the polarized emission from a laser diode[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(12): 1129~1132

王长青, Y. T. Chow, 孟宪林 等. Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的偏振激发荧光光谱及其 LD 泵浦激光特性[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(12): 1129~1132

16 Chen Sanbin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong *et al.*. Experimental study of a ring cavity configuration single-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(1): 7~9

陈三斌,周寿桓,赵 鸿 等. 单频环形腔 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器实验研究[J]. *光学技术*, 2010, **36**(1): 7~9

17 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

18 [http://www. castech. com/newEbiz1/EbizPortalFG/portal/html/index. html](http://www.castech.com/newEbiz1/EbizPortalFG/portal/html/index.html)

19 A. Yariv. *Quantum Electronics*. [M] Liu Songhao, Wu Cunkai, Wang Mingchang Transl.. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers Press, 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