

文章编号: 0258-7025(2008)03-0328-05

# 高效率连续波运转的激光二极管端面抽运 914 nm Nd:YVO<sub>4</sub>激光器

石朝辉<sup>1,2,3</sup> 樊仲维<sup>3</sup> 王培峰<sup>1,2,3</sup> 张晶<sup>1,2,3</sup> 牛岗<sup>1,2,3</sup> 崔建丰<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039  
<sup>3</sup> 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085

**摘要** 利用激光二极管(LD)抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体产生 914 nm 谱线振荡, 再通过腔内倍频技术获得 457 nm 激光输出, 是获得大功率蓝光激光器的一条重要的技术路线, 因而实现高效率运转的 914 nm 激光输出则是方案的关键。报道了激光二极管端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体、连续波运转的大功率 914 nm 准三能级激光器, 方案中采用掺杂原子数分数为 0.1% 的低掺杂 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 有效地降低了热效应的影响, 并通过准三能级理论模型的模拟计算选择了最佳晶体长度; 通过对腔镜介质膜参数的适当控制, 有效地抑制了波长为 1064 nm 和 1342 nm 的高增益谱线。实验中, 914 nm 激光器的阈值抽运功率仅为 8.5 W, 在 31 W 的抽运功率下 914 nm 激光输出功率高达 7.2 W, 激光器的斜率效率为 32%, 光-光转换效率为 23.2%。

**关键词** 激光器; 全固态激光器; 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>; 914 nm 准三能级; 最佳晶体长度

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## High Efficiency Continuous-Wave Laser-Diode-End-Pumped Vanadate Laser Operating on 914 nm

Shi Zhaohui<sup>1,2,3</sup> Fan Zhongwei<sup>3</sup> Wang Peifeng<sup>1,2,3</sup>

Zhang Jing<sup>1,2,3</sup> Niu Gang<sup>1,2,3</sup> Cui Jianfeng<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China  
<sup>3</sup> Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China

**Abstract** Means of intra-cavity frequency doubling 914 nm transition of Nd:YVO<sub>4</sub> pumped by laser diode (LD) is an important technical scheme to get high power blue laser output, thus achieving high efficiency 914 nm laser is the key point. A high power continuous-wave (CW) end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser operating at 914 nm by utilizing a quasi-three-level transition was demonstrated. A 0.1% Nd-doped bulk Nd:YVO<sub>4</sub> was applied to reduce the thermal effect in the laser crystal. In order to avoid re-absorption losses further, a suitable length of the crystal was chosen based on a careful calculation. Two wavelengths of 1064 nm and 1342 nm with high gain were restrained effectively by suitable control of the parameters of the medium film on cavity mirrors. Finally, the laser was operated at a very low threshold at the pumping power of 8.5 W, and a 914 nm laser with power of 7.2 W was gotten at the pumping power of 31 W. The slope efficiency of the laser was 32%, and the optical-to-optical efficiency was 23.2%.

**Key words** lasers; all-solid-state laser; end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>; 914 nm quasi-three-level; optimum crystal length

收稿日期: 2007-07-09; 收到修改稿日期: 2007-09-24

作者简介: 石朝辉(1980—), 男, 河南人, 博士研究生, 主要从事高功率全固态激光器及其频率变换技术研究。

E-mail: shizh@126.com

导师简介: 樊仲维(1965—), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 主要从事衍射光学理论与器件、光学仪器设计与研制、大功率全固态激光技术与谐波产生技术、全色激光显示技术、高亮度半导体激光耦合技术等方面的研究。E-mail: fanzw@gklaser.com

# 1 引言

大功率全固态蓝光激光器在科研、生物、医疗、存储、娱乐、通信和军事等方面有着广阔的应用,使之成为继绿光之后全固态激光研究的又一个热点。通过激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 晶体产生 914 nm 激光谱线振荡,利用 LBO/BiBO 腔内倍频获得 473 nm 连续波蓝光输出,是获得大功率全固态连续波蓝光的首选技术路线<sup>[1~8]</sup>。但是由于 Nd:YAG 晶体的自身特点,使得获得高于 3 W 输出(单路)的 473 nm 蓝光非常困难;另一方面由于 473 nm 激光颜色略浅,不能很好地满足激光显示的配色要求。近两年研究者的目光逐渐转向了激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 产生 914 nm 激光谱线振荡,然后再利用腔内倍频技术获得深蓝色的 457 nm 激光输出的技术路线<sup>[9~12]</sup>。为了获得高功率的 457 nm 蓝光激光输出,首先应当得到高功率、高效率工作的 914 nm 红外激光器<sup>[13]</sup>。本文通过优化设计,合理选择晶体的长度、掺杂浓度、适当地分配谐振腔内各光学元件的镀膜参数,成功地实现了常温下 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体的准三能级 914 nm 谱线的高效率运转,为下一步获得高功率 457 nm 蓝光输出创造了必要的条件。

# 2 理论分析

## 2.1 Nd:YVO<sub>4</sub> 914 nm 准三能级谱线的高效振荡条件

图 1 为 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的能级结构示意图, Nd<sup>3+</sup> 离子在基质晶格场的作用下,各个能级发生斯塔克分裂,激光的上能级 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 分裂成两个距离很近的子能级 R<sub>2</sub> 和 R<sub>1</sub>,这两个子能级的粒子数分布遵守玻耳兹曼分布规律,可以计算 R<sub>2</sub> 和 R<sub>1</sub> 分别占上能级粒子总数的 45% 和 55%<sup>[13]</sup>。激光的下能级 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 由斯塔克分裂成 5 个子能级 Z<sub>1</sub> ~ Z<sub>5</sub>,各子能级粒子数分布也遵守玻耳兹曼分布规律,914 nm 谱线则是 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 的 R<sub>1</sub> 子能级向 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 的 Z<sub>5</sub> 子能级跃迁的结果。激光的下能级 Z<sub>5</sub> 按照玻耳兹曼分布占 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 能级粒子总数的 5% (f<sub>1</sub> = 5%),同 Nd:YAG 晶体的

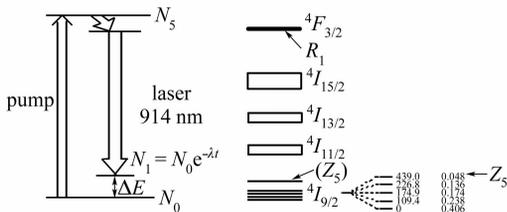


图 1 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的能级结构

Fig. 1 Structure of energy level for Nd:YVO<sub>4</sub> at 914 nm

f<sub>1</sub> = 0.74% 相比,该能级占 <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 能级的粒子总数比例很大,激光的下能级存在如此多的粒子数是造成 914 nm 激光阈值极高的根本原因,因此与 Nd:YAG 晶体相比,实现 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的准三能级激光的高效运转将更加困难。然而,由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体具有自然双折射的特性,使其准三能级运转的 914 nm 基频光呈线偏振状态,与 Nd:YAG 晶体的各向同性特性相比, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体线偏振的 914 nm 基频激光输出,使其在 I 类倍频时更容易获得高的倍频转换效率。

## 2.2 最佳晶体长度

准三能级激光系统的阈值功率公式为<sup>[14~17]</sup>

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_p^2 + \omega_l^2) (\delta + 2f_1 N^0 \alpha l)}{4\sigma (1 - e^{-\alpha l}) \eta_p (f_1 + f_2)} \quad (1)$$

式中  $h\nu_p$  为抽运光子能量;  $\delta$  为腔内损耗;  $\omega_p$  为抽运光束腰半径;  $\omega_l$  为振荡激光的束腰半径;  $f_1$  为激光下能级占能级总粒子数的比例;  $f_2$  为激光上能级占能级总粒子数的比例;  $N^0$  为由掺杂浓度决定的总粒子数密度;  $\sigma$  为激光发射截面;  $\tau$  为上能级寿命;  $\eta_p$  为量子效率;  $\alpha$  为晶体的吸收系数;  $l$  为晶体长度。

由(1)式可见:1) 激光阈值功率与  $(\omega_p^2 + \omega_l^2)$  成正比,即抽运光和振荡激光光斑越小激光阈值功率就越低;2) 下能级粒子的存在相当于增加了谐振腔的损耗,使激光阈值功率提高,这与普通的四能级系统有明显区别;3) (1) 式中分子与分母同时存在晶体长度项,说明存在一个最佳晶体长度能使激光阈值功率最低。

最佳晶体长度满足数学条件

$$\frac{\partial P_{th}}{\partial l} = 0, \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式并化简后,可得最佳晶体长度  $l_0$  满足

$$\alpha \exp(-\alpha l_0) \left( \frac{2\sigma N_1^0}{\alpha} + \delta + 2\sigma N_1^0 l_0 \right) - 2\sigma N_1^0 = 0, \quad (3)$$

式中  $N_1^0$  为激光下能级粒子数。

由文献[15]可得,激光的输出功率  $P_{out}$  与内部斜率效率  $dS/dF$  的关系为

$$P_{out} = \frac{T}{\delta_0 + T} \frac{\lambda_l}{\lambda_p} (1 - e^{-\alpha l}) \frac{dS}{dF} (P_{in} - P_{th}), \quad (4)$$

式中  $T$  为谐振器的透射率损耗;  $\delta_0$  为谐振器的固有损耗;  $\lambda_l$  为激光波长;  $\lambda_p$  为抽运激光波长;  $P_{in}$  为抽运激光功率。

为了计算方便,通常采用近阈值条件来估算激光器的最大输出功率,这时激光内部斜率效率可表

示为

$$\frac{dS}{dF} \Big|_{s \rightarrow 0} = \frac{1 + 2a^2}{(1 + a^2)^2} \frac{1}{(1 + B/2)/(1 + a^2)}, \quad (5)$$

式中  $a = \omega_p/\omega_l$ ;  $B = 2dN_1^0/\delta$ 。

联立(4)和(5)式,即可求得近阈值近似条件下的激光输出功率。实际上由于掺杂浓度还影响着晶体的吸收系数和激光的上能级寿命,因此为了获得高的激光斜率效率和输出功率,应在最佳晶体长度的前提下,综合选取晶体的掺杂浓度和晶体长度等参数。

### 2.3 晶体参数选取

为了对比,利用传统的四能级理论模型,针对四能级系统做了最优化的理论设计,选取的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体参数为:掺杂原子数分数 0.5%,晶体长度为 6 mm,图 2(a) 为不同抽运功率下晶体的三条谱线(1064 nm, 1342 nm, 914 nm)的输出功率曲线。可以看到在 30 W 的抽运功率下,四能级运转的 1064 nm 激光输出功率为 14 W,光-光转换效率接近 50%;而同样抽运条件下的准三能级运转的 914 nm 激光输出功率只有 5.2 W。

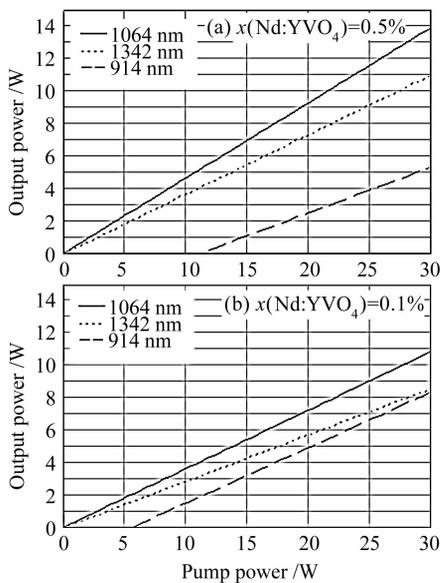


图 2 激光输入输出功率曲线

Fig. 2 Laser pump power versus output power

根据准三能级理论模型,对准三能级运转的 914 nm 激光进行了优化:为了降低晶体热效应,并且在保证晶体有足够吸收效率的前提下,选择了掺杂原子数分数仅为 0.1% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体,经过计算选取的最佳晶体长度为 6 mm。优化后的激光输出功率如图 2(b) 所示。可以看到优化后 914 nm 激光阈值功率明显下降:由优化前的 12 W 下降到优化后的 6 W 左右,同时激光的最大输出功率提高

了近 3 W。

### 3 实验装置

由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的三条激光谱线中 914 nm 谱线的增益最低,为了获得 914 nm 基频激光输出,必须通过镀膜抑制 1064 nm 和 1342 nm 激光的增益,使这两条谱线没有足够的增益形成激光振荡。

图 3 为 914 nm 基频激光器的实验装置图,抽运源为德国 LIMO 公司生产的大功率激光二极管光纤耦合模块(HLU32F400-808),模块最大输出功率为 32 W,出口光纤直径为 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 NA = 0.22,激光中心波长为 807 ~ 810 nm (25  $^{\circ}\text{C}$ ),通过调节 TEC 制冷系统的工作温度使其工作波长接近 808.7 nm,与 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的吸收峰相匹配。通过采用 1:1 的成像系统将抽运光整形为直径为 400  $\mu\text{m}$  的圆形光斑聚焦到激光晶体端面,系统的传输透射率为 95%。为了减小晶体热透镜效应及降低热致衍射损耗,并且在保证晶体有足够吸收系数的前提下,选择了掺杂原子数分数仅为 0.1% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体,并且利用(1)~(5)式理论模型对晶体的最佳长度进行计算,最终选用的晶体长度为 6 mm,横截面尺寸为 3 mm  $\times$  3 mm。晶体的两个通光面分别镀 808 nm, 914 nm, 1064 nm 和 1342 nm 的多波长增透膜,晶体的侧面用铝箔包住,装在用循环水冷却的紫铜块内,温度设定在 15  $^{\circ}\text{C}$ 。 $M_1$  为平面镜,一面镀 808 nm 增透膜,另一面镀 914 nm 高反膜和 808 nm, 1064 nm 和 1342 nm 增透膜; $M_2$  是对 914 nm 基频激光耦合透射率为 4.5% 的输出镜 OC (同时镀 1064 nm 和 1342 nm 的高透膜),凹面的曲率半径为 75 mm。根据腔型设计 ABCD 矩阵计算<sup>[18]</sup>,选择  $M_1$  和  $M_2$  两个镜片之间的距离为 50 mm。

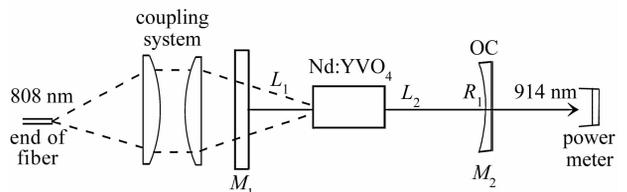


图 3 914 nm 基频激光器的实验装置

Fig. 3 Configuration of high power 914 nm laser

准三能级激光器镜片镀膜设计的基本原则是,要尽量提高膜系对基频光的反射率 ( $R_{914 \text{ nm}} > 99.9\%$ ),在满足基频光反射率的前提下努力提高 808 nm, 1064 nm 和 1342 nm 的透射率,目的是为了 提高 914 nm 基频激光的增益,并有效地抑制

1064 nm和1342 nm谱线,从而使914 nm激光高效地起振。值得注意的是  $M_1$  镜片中914 nm高反面的镀膜,由于高反波长和增透波长离得比较近,这一面的镀膜是一个技术难点。图 4 为实验中使用的镜片的镀膜测试曲线图,可见,  $R_{914\text{ nm}} = 99.9\%$ ,  $T_{808\text{ nm}} = 98\%$ ,  $T_{1064\text{ nm}, 1342\text{ nm}} > 80\%$ ,完全满足了设计要求。

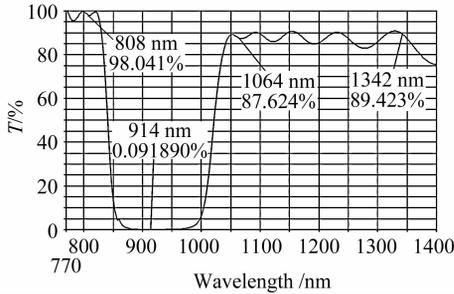


图 4  $M_1$  镜片镀膜测试曲线

Fig. 4 Test data of  $M_1$  mirror coating

### 4 实验结果和讨论

按照实验设计参数,仔细调节谐振腔及抽运光焦点在晶体中的位置,得到了914 nm激光输出,图 5 为不同注入功率下914 nm激光的输出功率曲线。激光器的阈值抽运功率为8.5 W左右,随着注入功率不断提高激光的输出功率也在增加,在31 W的抽运功率下激光输出功率达到了最大值——7.2 W,相应的光-光转换效率为23.2%。与图 2(b)的914 nm激光理论输出功率曲线对照,可以发现实际输出结果与理论计算基本一致。在7.2 W最大输出功率条件下,测试了激光器8 h连续工作时的稳定性,计算出稳定性的均方根值为0.92%,激光器具有比较好的稳定性。

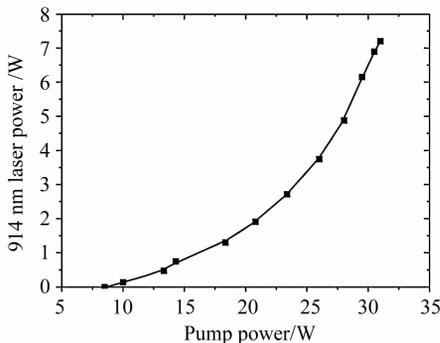


图 5 914 nm 基频激光的输入输出关系

Fig. 5 914 nm laser power versus pump power

由图 5 可以看出,20 W左右的抽运功率处存在一个斜率效率的临界点,从8.5 W阈值抽运功率到20 W抽运功率这一段,激光的斜率效率较低。但是

当抽运功率超过20 W以后,激光斜率效率急剧增加,直到最大注入功率激光器都保持了较高的斜率效率。文献[13]对这一现象作了理论分析,认为其产生原因是准三能级系统的再吸收损耗:由于在20 W抽运功率之前抽运功率较低,相应的粒子数反转也比较少,激光的增益就比较小,再吸收损耗的存在使激光效率很低;随着注入功率的不断加,粒子数反转比较多,激光的增益变大,高的激光增益逐渐平衡了再吸收造成的损耗,因此激光器的斜率效率变大,激光输出功率增加很多。即,在功率反转点(即增益平衡了再吸收损耗)之后,准三能级激光系统的运转接近于普通的四能级激光系统,此时由再吸收造成的损耗基本上可以忽略。

### 5 结 论

通过对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 914 nm 准三能级激光系统的分析,了解到准三能级激光系统不同于四能级激光系统的特点,在此基础之上优化了晶体掺杂浓度,并计算了晶体的最佳长度。通过优化谐振腔设计和器件参数,并通过对腔镜介质膜参数的适当控制,有效地抑制了波长为1064 nm和1342 nm的两条高增益谱线,使准三能级方式运转的914 nm激光得以高效率工作。在抽运功率为31 W时,准三能级运转的914 nm激光输出功率达7.2 W,激光器的斜率效率为32%,相应的光-光转换效率为23.2%,激光器8 h连续工作的输出功率稳定性优于1%。

### 参 考 文 献

- 1 T. Kellner, F. Heine, G. Huber. Efficient laser performance of Nd:YAG at 946 nm and intracavity frequency doubling with LiJO<sub>3</sub>,  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> [J]. *Appl. Phys. B*, 1997, **65**: 789~792
- 2 C. Q. Wang, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Efficient blue light generation from a diode laser pumped Nd:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **167**:155~158
- 3 Gao Lanlan, Tan Huiming. Laser diode array pumped Nd:YAG/LBO high power blue laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1033~1035  
高兰兰,檀慧明. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG/LBO 大功率蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9):1033~1035
- 4 Li Dehua, Li Pingxue, Zhang Zhiguo *et al.*. Compact high-power blue light from a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(11):1632~1634
- 5 C. Czranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BiBO laser with 2.8 W output power at 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 432~434
- 6 Zheng Quan, Zhao Ling, Dong Shengming. High efficient blue laser generation at 473 nm by BiBO crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1030~1032  
郑权,赵岭,董胜明. BiBO 晶体腔内倍频高效率 473 nm 蓝

- 光激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(9):1030~1032
- 7 Rui Zhou, Enbang Li, Haifeng Li *et al.*. Continuous-wave 15.2 W diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 946 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12):1869~1871
- 8 Y. Chen, H. Peng, W. Hou *et al.*. 3.8 W of CW blue light generated by intracavity frequency doubling of a 946-nm Nd:YAG laser with LBO [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**:241~243
- 9 Liu Weiren, Huo Yujing, He Shufang. Diode-pumped all solid state 457 nm deep blue laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8):980~982  
刘伟仁,霍玉晶,何淑芳. 激光二极管抽运的全固体 457 nm 深蓝激光器[J]. 光学学报, 2002, **22**(8):980~982
- 10 C. Czeranowsky, M. Schmidt, E. Heumann *et al.*. Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with 840 mW output power at 456 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **205**:361~365
- 11 Bu Yikun, Chen Yingxin, Zheng Quan *et al.*. LD-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> crystal LBO frequency-doubling 457 nm blue laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):336~339  
卜轶坤,陈颖新,郑 权等. LD泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体 LBO 倍频 457nm 蓝色激光器[J]. 光子学报, 2005, **34**(3):336~339
- 12 Qinghua Xue, Yikun Bu, Fuqiang Jia *et al.*. Compact efficient 1.5 W continuous wave Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO blue laser at 457 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **258**:67~71
- 13 P. Zeller, P. Peuser. Efficient multiwatt continuous wave laser operation on the <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> transitions of Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):34~36
- 14 Tso Yee Fan, Robert L. Byer. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(5):605~612
- 15 W. P. Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(7):1412~1423
- 16 Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing *et al.*. Experimental investigation of laser diode end pump Tm:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):181~185  
林志锋,高明伟,高春清等. 激光二极管端面抽运 Tm:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):181~185
- 17 Tian Yubing, Tan Huiming, Cao Hongzhong *et al.*. Low power laser diode-pumped solid-state Yb:YAG laser at room temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):633~636  
田玉冰,檀慧明,曹洪忠等. 低功率激光二极管抽运的室温运转 Yb:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(5):633~636
- 18 Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi *et al.*. High power diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):19~21  
张红瑞,高明义,郑 义等. 大功率激光二极管端面抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(1):19~21