

文章编号: 0258-7025(2010)07-1673-05

# 基于 LAS-CAD 优化设计的高功率高重复频率 激光二极管双端抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器

侯军燕<sup>1</sup> 陈卫标<sup>2</sup> 汪岳峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003

<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

**摘要** 基于 LAS-CAD 软件, 设计并优化出结构紧凑的激光二极管(LD)双端抽运声光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器。采用双凹折叠腔结构, 808 nm 光纤耦合输出 LD 双端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体, 腔长 185 mm, 耦合输出镜透射率为 15%。在 44 W 抽运功率时, 连续激光最高输出功率达到 18.6 W, 光-光转换效率为 42.3%, 斜率效率为 47.8%, M<sup>2</sup> 因子约为 1.5。在重复频率为 100 kHz 时, LD 抽运功率为 41 W, 获得激光最大平均功率输出为 11.3 W, 光-光转换效率约为 27.6%, 相应单脉冲能量约为 113 μJ, 脉冲半峰全宽(FWHM)为 25 ns, 峰值功率为 4.52 kW。

**关键词** 激光器; 激光二极管双端面抽运; 全固态激光器; Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1673

## Optimal Design of High Power High Repetition Laser Diode Dual-End-Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Laser with LAS-CAD Software

Hou Junyan<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>2</sup> Wang Yuefeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Teaching & Research Section of Optics Engineering, Ordnance Engineering College,  
Shijiazhuang, Hebei 050003, China

<sup>2</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and  
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** According to LAS-CAD software, a compact laser diode (LD) dual-end-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser is designed and optimized. In the experiment, an 808 nm fiber-coupled system and double concave face mirror folded cavity are adopted. The length of resonance cavity is 185 mm and the transmission of output coupler is 15%. A TEM<sub>00</sub> mode output of 18.6 W is obtained under the condition of continuous waves (CW) at a pump power of 44 W, resulting in an optical conversion efficiency of 42.3%, and a slope efficiency of 47.8%, and M<sup>2</sup> of 1.5. An 11.3 W of 1064 nm average power at a repetition rate of 100 kHz is generated with a 41 W LD as pump source, and an optical-to-optical conversion efficiency of 27.6% is obtained. The steady operation is achieved with pulse width of 25 ns, peak power of 4.52 kW and single pulse energy of 113 μJ at the repetition rate.

**Key words** lasers; laser diode dual-end-pumped; all solid-state laser; Nd:YVO<sub>4</sub> crystal

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运全固态激光器(DPSSL)因其光-光转换效率高、热负载小、结构紧凑、使用寿命长、光束质量优良,越来越引起人们的关注<sup>[1~7]</sup>。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体在较宽的抽运波长范围内都有很好的吸收,在发射波长上有很大的受激发射截面,对于产

生高平均功率(大于 3 W)、高重复频率(大于 10 kHz)的短脉冲激光是有利的<sup>[8]</sup>。Nd:YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 脉冲激光器已被广泛应用于激光测距、大气监测、激光雷达、光电对抗、激光加工和医疗等领域<sup>[9~11]</sup>。

LAS-CAD 是一套全固态激光器的专用辅助设计软件,提供了介于热学和光学之间的复杂多物理

收稿日期:2009-08-12;收到修改稿日期:2009-09-09

作者简介:侯军燕(1982—),女,博士研究生,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail:junyan\_hou@yahoo.com.cn

导师简介:汪岳峰(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高功率固体激光器及全固态激光器件与应用方面的研究。

E-mail:yfwang\_oec@163.com

系统交互分析,这种分析通常用于热透镜效应的固态光学器件。这种效应的建模和它对光束质量的影响以及光束的稳定性和光效率等对于激光谐振腔的分析和优化是十分必要的。本文利用这套软件设计紧凑型、高重复频率全固态激光器,并通过实验装置来验证设计结果。通过 LAS-CAD 软件对 LD 抽运的固体激光器的激光介质产生的热透镜效应对模式匹配的影响进行了分析,优化了腔型设计。按照设计参数,构建了一套双端抽运 Z 型折叠腔的声光(AO)调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>全固态激光器,并报道设计参数和实验结果。

## 2 谐振腔设计

折叠腔结构如图 1 所示,激光晶体的热透镜效应对谐振腔的稳定性和腔内各处的模参数有较大的影响。此外,要使输出光束有较高的质量,必须限制它在基模下工作,而要实现高功率运转,则必须在激

活介质中有较大的模体积(同时要考虑与抽运光束的模匹配)。把谐振腔的稳定工作区设计在较高的抽运功率范围,以实现激光器的高功率运转,同时,谐振腔的稳定区要足够宽,使一定的抽运功率扰动不致于影响激光器的正常工作<sup>[12]</sup>。基于以上考虑,用 LAS-CAD 软件对谐振腔进行了分析和计算,结果如图 2 所示。其中稳定性参数  $g_1^* = A_1, g_2^* = D_1, A_1, D_1$  分别为腔内单程传输矩阵阵元。

$M_2, M_3$  均为平面镜,  $R_1 = 150 \text{ mm}, R_4 = 80 \text{ mm}, L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 173 \text{ mm} (L_1 = 55 \text{ mm}, L_2 = L_3 = 5 \text{ mm}, L_4 = 108 \text{ mm}),$  折叠角  $\theta = 60^\circ$ 。对于掺杂原子数分数为 0.27% 的 Nd:YVO<sub>4</sub>, 各参数的取值为:晶体尺寸  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 12 \text{ mm},$  热导率  $K_{cx} = 0.0523 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K}), K_{cy} = 0.051 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K}),$   $dn/dT = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6} / \text{K},$  抽运光产热效率  $\eta_p$  约为 20%, 吸收系数  $\alpha = 21 \text{ cm}^{-1},$  光纤芯径  $\omega_p = 0.4 \text{ mm},$  振荡光波长  $\lambda = 1064 \text{ nm}.$

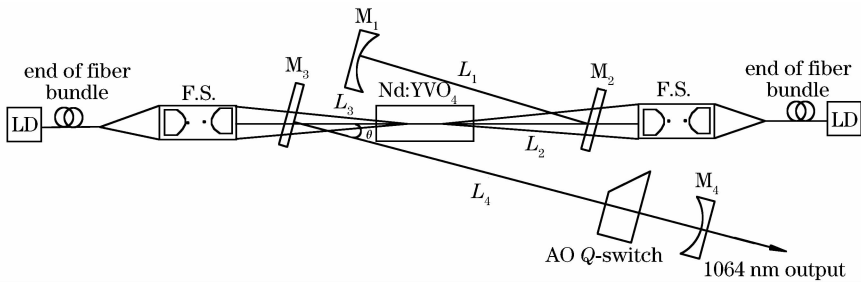


图 1 Z 型折叠腔示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of Z-folded resonator

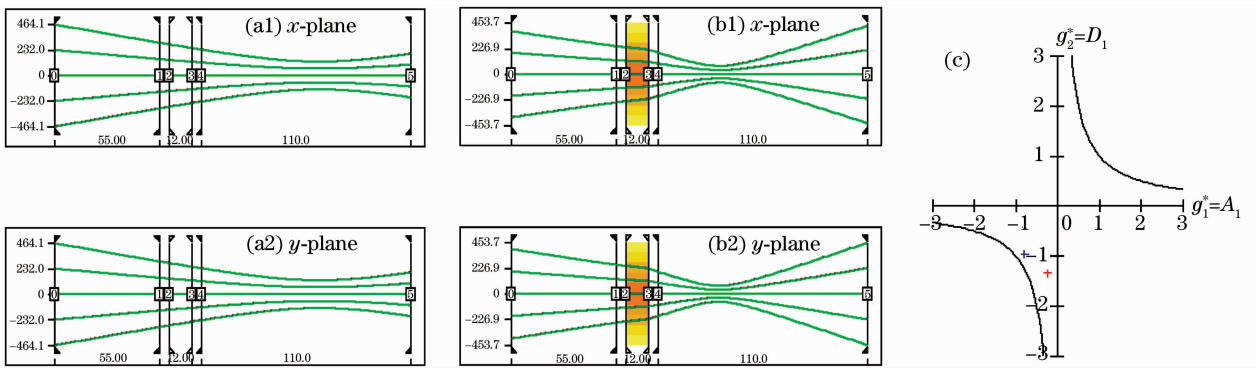


图 2 激光腔内模式分布图。(a) 未插入晶体热透镜情况;(b)  $P=40 \text{ W},$  插入晶体热透镜情况;  
(c) 插入晶体热透镜前后激光腔的稳定性

Fig. 2 Mode plot of the resonance cavity. (a) resonance cavity without thermal lens; (b)  $P=40 \text{ W},$  the resonance cavity with thermal lens; (c) stability parameters of resonance cavity with thermal lens and without it

LAS-CAD 软件模拟结果如表 1 所示,可见抽运功率小于 40 W 时激光腔均处于稳定区域。谐振腔的稳定区比较宽 ( $10 \text{ W} < P < 40 \text{ W}$ ), 一定的抽运功率扰动不会影响激光器的正常工作,而且谐振腔的稳定工作区在较高的抽运功率,可实现激光器的

高功率运转。图 3 显示晶体的温度分布图,图 4 给出了晶体左端面的温度分布和压强分布。假设以晶体的左端面中心为原点,模拟中抽运光采用的是超高斯分布,光束的能量大部分集中于中心区域内且由中心向四周递减。由于中心区域集中了大部分的

表 1 LAS-CAD 软件模拟结果  
Table 1 Results of simulated by the LAS-CAD software

Parameters		Without thermal lens	With thermal lens			
			$P=10\text{ W}$	$P=20\text{ W}$	$P=30\text{ W}$	$P=40\text{ W}$
Stability parameter	Meridian plane	0.33	0.40	0.60	0.51	0.73
	Sagittal plane	0.33	0.41	0.60	0.53	0.73
Far-field divergence /mrad	Meridian plane	3.21	3.39	3.75	4.28	5.47
	Sagittal plane	3.21	3.40	3.77	4.33	5.74
Max spot radius / $\mu\text{m}$	Meridian plane	464	383	351	342	431
	Sagittal plane	464	382	350	343	454
Beam waist radius / $\mu\text{m}$	Meridian plane	126	119	108	95	74
	Sagittal plane	126	119	107	94	71
BPP		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

能量,以至于外围的能量大大减小,导致图 4 的压强分布图上出现阶梯式变化过程。在晶轴  $z$  方向上,由于是端面抽运且聚焦位置在距端面约 4 mm 处,所以在抽运光抽运过程中能量会逐渐减小,越接近晶轴的中心,温度较端面处会越低,相应的温度梯度也会越小。因此晶体的最高温度和最大压强均出现在两个端面上。当抽运功率  $P=40\text{ W}$  时,晶体内最高温度为 357.3 K。由于是双端面抽运的对称结构,所以左右端面的温度分布和压强分布是对称的,晶体的最高温度出现在两个端面上,且最大压强也位于端面,约为  $21.54\text{ N/mm}^2$ 。

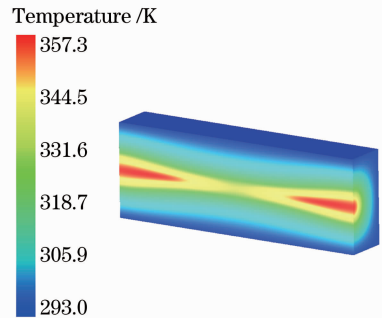


图 3 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体温度分布图

Fig. 3 Temperature field distributing of Nd:YVO<sub>4</sub>

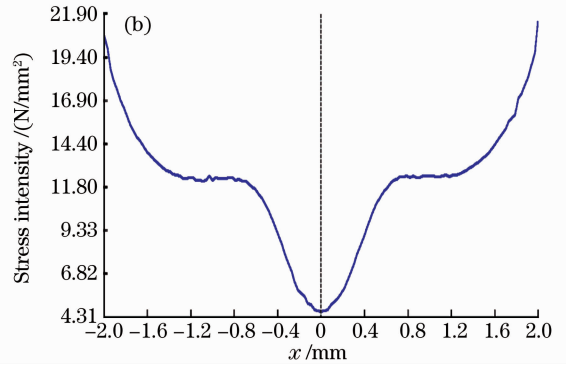
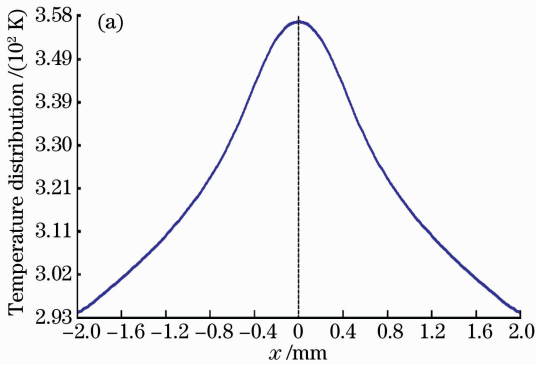


图 4 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体左端面温度(a)和压强(b)分布图

Fig. 4 Temperature (a) and equivalent thermal stress (b) field distributing of Nd:YVO<sub>4</sub> left face

抽运功率为 40 W 时,将晶体插入激光腔,对于腔内模体积的改变和热聚焦现象如图 2(b)所示,使得振荡光的束腰半径减小并逐渐向平面镜  $M_3$  靠近,束腰的减小对于今后添加 Q 开关是有帮助的。激光的模体积在抽运功率大于 30 W 时增大,所以可以保证在高功率运转时,在激活介质中有较大的模体积,而且与抽运光束的模匹配更好,这在图 5 中也得到证明,热聚焦的结果使得作为抽运功率的函数——激光模体积增大,从而导致非线性的斜率效率。

### 3 实验装置

折叠腔的各参数按前面筛选出的数据进行设置,实验装置如图 1 所示。系统中使用的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ,  $a$  轴切割,掺杂原子数分数为 0.27%,由山东大学提供。晶体两个端面镀 808 nm 和 1064 nm 双波长增透膜。将 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体与冷却铜块保持良好的热接触,晶体使用钢皮紧裹,分别被置入精心设计的三面通有冷却水的铜块中,热沉中的水温为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

如图 1 所示,激光腔有 4 面镜子组成,后腔镜

$M_1$  为平凹镜, 曲率半径  $R = 150 \text{ mm}$ , 凹面镀  $808 \text{ nm}$  和  $1064 \text{ nm}$  高反膜; 输出镜  $M_4$  也是平凹镜, 曲率半径  $R = 80 \text{ mm}$ , 凹面镀  $808 \text{ nm}$  高反膜和透射率  $T = 15\%$  的  $1064 \text{ nm}$  增透膜, 平面镀  $1064 \text{ nm}$  增透膜; 折叠镜  $M_2, M_3$  是 2 个平面镜, 一面镀入射角为  $30^\circ$  的  $808 \text{ nm}$  高透膜, 另一面镀入射角为  $30^\circ$  的  $808 \text{ nm}$  增透膜和入射角为  $30^\circ$  的  $1064 \text{ nm}$  高反膜。抽运源由 2 个  $30 \text{ W}$  光纤耦合激光二极管阵列组成, 在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 输出波长为  $808.6 \text{ nm}$ 。尾纤输出芯径为  $0.4 \text{ mm}$ , 数值孔径为  $0.17$ 。抽运光由聚焦耦合透镜组整形并聚焦在晶体内部。

### 4 实验结果及分析

图 5 为  $808 \text{ nm}$  LD 输入功率与  $1064 \text{ nm}$  TEM<sub>00</sub> 连续输出功率的函数关系。热聚焦的结果使得作为抽运功率的函数——激光模体积增大, 从而导致非线性的斜率效率, 这使得实验曲线中间部分与理论计算偏离较大。在  $44 \text{ W}$  抽运功率时, 最高输出功率达到  $18.6 \text{ W}$ , 光-光转换效率为  $42.3\%$ , 斜率效率达到  $47.8\%$ , 这与 LAS-CAD 计算出的光-光转换效率

$45\%$  非常接近。在重复频率为  $100 \text{ kHz}$  时, 激光二极管抽运功率为  $41 \text{ W}$ , 获得激光最大平均功率输出  $11.3 \text{ W}$ , 光-光转换效率约为  $27.4\%$ , 相应单脉冲能量约为  $113 \text{ } \mu\text{J}$ , 脉冲半峰全宽 (FWHM) 为  $25 \text{ ns}$ , 峰值功率为  $4.52 \text{ kW}$ , 脉冲时间波形和检测到的脉冲序列如图 6 所示。

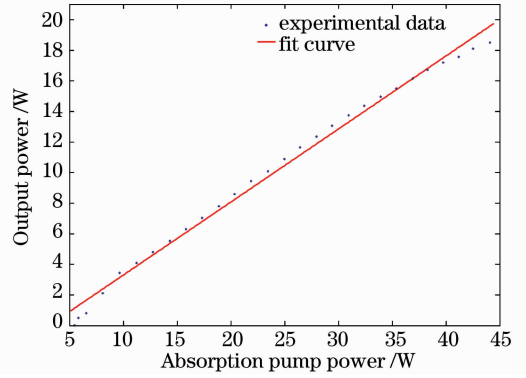


图 5 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器抽运功率与连续输出功率的关系曲线

Fig. 5 Curve of the CW output powers as a function of incident pump power of LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser

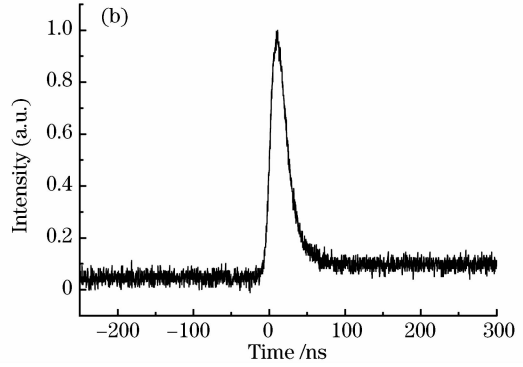
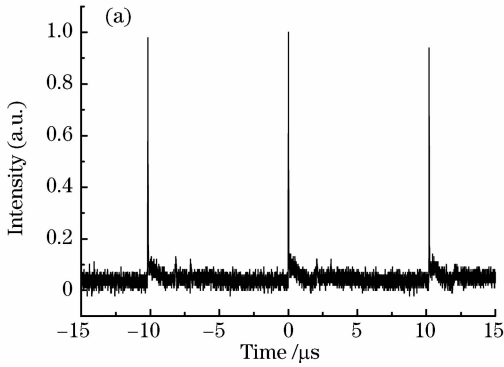


图 6 重复频率为  $100 \text{ kHz}$ , 抽运功率为  $41 \text{ W}$  时, 脉冲时序图 (a) 和单脉冲波形 (b)

Fig. 6  $P = 41 \text{ W}$ , pulse timing diagram (a) and single-pulse waveform (b) at  $100 \text{ kHz}$  repetition rate

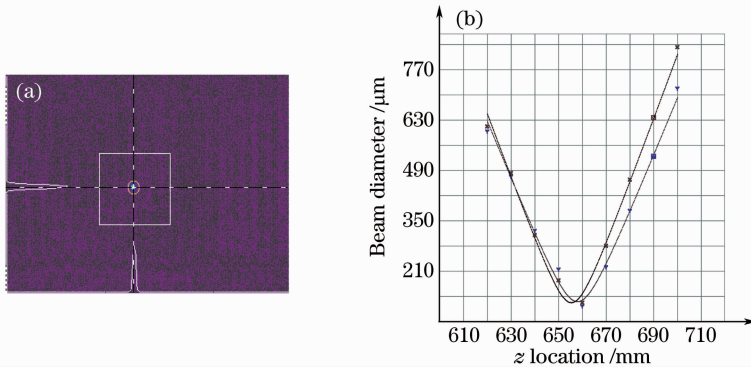


图 7 抽运功率为  $37 \text{ W}$  时,  $M_x^2 = 1.51, M_y^2 = 1.55$ 。(a) 远场光强分布; (b) 测量图

Fig. 7  $P = 37 \text{ W}$ ,  $M_x^2 = 1.51, M_y^2 = 1.55$ . (a) beam intensity distribution in far-field; (b) measure plot

当抽运功率高于 45 W 时,激光器输出功率还有增长空间,但是功率的增加会导致光束质量的下降。抽运功率为 37 W 时,光束质量测量图如图 7 所示,图 7(a)为激光能量远场空间分布,图 7(b)为于  $M^2$  测量仪入射口不同距离处的光斑直径。在抽运功率为 37 W 时,输出激光的光束质量  $x$  方向  $M_x^2 = 1.51$ ,  $y$  方向  $M_y^2 = 1.55$ , 光束束腰半径  $w_x = 3$  mm,  $w_y = 2.4$  mm, 发散角  $\theta_x = 0.37$  mrad,  $\theta_y = 0.42$  mrad。 $M^2$  因子较预设值偏大,可能是因为在高功率抽运时激光增益介质的热效应比设定情况更加严重,可以考虑增大输出镜的耦合透射率,也可以考虑增加输出镜的曲率半径。

## 5 结 论

通过在 LAS-CAD 辅助设计的基础上构建了全固态激光器实验装置。在 44 W 抽运功率时,连续激光最高输出功率达到 18.6 W,光-光转换效率为 42.3%,斜率效率为 47.8%, $M^2$  因子约为 1.5。在 41 W 抽运功率下,连续输出重复频率为 100 kHz 的脉冲激光,平均功率为 11.3 W,光-光转换效率大于 27%。实验结果与设计模拟结果较吻合,腔参数对输出功率的影响趋势也是吻合的,表明利用 LAS-CAD 辅助优化设计端面抽运的紧凑型高重复频率全固态激光器是现实可行的。

## 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6):895~912
- 2 Du Chenlin, Ruan Shuangchen, Yu Yongqin *et al.*. High power

- diode-end-pumped intra-cavity frequency doubled Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO red laser [C]. *SPIE*, 2005, **6028**:86~91
- 3 Du Chenlin, Ruan Shuangchen, Yu Yongqin *et al.*. 6 W diode-end-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO quasi-continuous-wave red laser at 671 nm [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6):2013~2018
- 4 Wang Chunyu, Kong Yong, Guo Mingxiu *et al.*. High-repetition-rate LD-pumped solid state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):601~603  
王春雨,孔勇,郭明秀等. 输出高重复频率脉冲列的全固态激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):601~603
- 5 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):461~465  
冯立春,霍玉晶,何淑芳等. 激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率 532 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):461~465
- 6 Zhang Tieli, 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
- 7 Wang Chunyu, Li Xiaoli, Zang Huaguo *et al.*. Laser diode continuous-wave-pumped repetitive electro-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1441~1446  
王春雨,李小莉,臧华国等. 激光二极管连续抽运电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1441~1446
- 8 William L. Nighan Jr.. Diode bars pump solid-state crystals to high powers [J]. *Lasers Focus World*, 1995, **31**(5):97
- 9 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. C. Liao *et al.*. Efficient high-power diode-end-pumped TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(10):1241~1243
- 10 Aiyun Yao, Wei Hou, Yupeng Kong *et al.*. Double-end-pumped 11-W Nd:YVO<sub>4</sub> cw laser at 1342 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(10):2129~2133
- 11 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
- 12 Vittorio Magni. Resonator for solid-state lasers with large volume fundamental mode and high alignment stability [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1):107~117