

# 端面抽运固体激光器中 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体组合应用技术研究

屈鹏飞 王石语 过 振 蔡德芳 李兵斌

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

**摘要** 采用 Nd:YAG 与 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体组合应用的方案, 将具有优良导热和光电性能的 Nd:YAG 晶体作为抽运光的前端吸收晶体, 其后端放置具有较宽吸收谱的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 用来吸收由于谱宽不匹配而没有被 Nd:YAG 晶体吸收的抽运光能量成分。两种晶体在波长 1064 nm 处的发射谱相互重叠, 其吸收的抽运光能量可以转化成共同波长的振荡激光, 提高了抽运光的利用效率。这种组合应用的方式还可以有效抑制振荡光功率随抽运源工作温度变化而产生的波动。实验证明, 采用这种激光晶体的组合应用方案, 相对于单一 Nd:YAG 晶体方案, 激光器的光光转换效率可提升 22.9%, 输出功率对温度的敏感度由 7% 降到 1% 以内。

**关键词** 激光光学; 固体激光器; 端面抽运; 晶体组合; 工作温度

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0714002

## Composite Application Techonolgy of Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub> Crystal in end Pumped Solid-State Laser

Qu Pengfei Wang Shiyu Guo Zhen Cai Defang Li Bingbin

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** The scheme of Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub> crystal composite application is proposed. The Nd:YAG crystal with good thermal conductivity and optical properties is used as the front end of pump light absorption crystal, and placing a wider absorption spectrum Nd:YVO<sub>4</sub> crystal at its rear-end to absorb the pumping light energy composition, which is not absorbed by Nd:YAG crystal due to the spectral width does not match. Two kinds of crystals in the 1064 nm wavelength emission spectrum overlap each other. The absorption of pump light energy can be converted to common oscillation laser wavelength, the efficiency of pumping light is improved. The proposed composite applications can effectively reduce the oscillating light power changing with pumping source working temperature fluctuations. Experimental results show that the proposed composite application scheme improves the optical-to-optical efficiency of pump sources by 22.9%, and the sensitivity of output power affected by temperature is reduced from 7% to 1%, comparing with the single Nd:YAG crystal scheme.

**Key words** laser optics; solid-state laser; end pumped; crystal combination; working temperature

**OCIS codes** 140.3580; 140.3480; 140.3320; 140.3380

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(DPSSL)以其效率高、寿命长、结构紧凑、光束质量好等优点,广泛应用于工业、医疗、科研、信息和军事等领域<sup>[1-5]</sup>。Nd:YAG 晶体因其良好的导热特性和光学特性,成为一种普遍使用的激光工作物质。但是,对于大功率抽运的激光器,LD 的发射谱宽远大于 Nd:YAG 晶体吸收谱宽,大量吸收谱线宽度外的抽运光能量不能被吸收,导致激光器光光转换效率降低<sup>[6]</sup>。而 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶

**收稿日期:** 2016-02-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-11

**基金项目:** 国家预研基金(9140A02010514DZ01019)

**作者简介:** 屈鹏飞(1987—),男,博士研究生,主要从事新型光电子器件方面的研究。E-mail: qupengfei\_119@163.com

**导师简介:** 王石语(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事新型光电子器件方面的研究。

E-mail: yshi@mail.xidian.edu.cn

体相对于 Nd:YAG 晶体而言,虽然其导热性能较差,但却有比较宽的吸收谱,可以完全覆盖 LD 的发射谱<sup>[7-8]</sup>。同时,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体和 Nd:YAG 晶体在1064 nm 处的发射谱线又相互重叠。由此,本文提出在端面抽运的固体激光器中,将 Nd:YAG 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体组合应用的方案。该方案在 Nd:YAG 晶体后面放置一段 Nd:YVO<sub>4</sub>激光晶体,当抽运光通过 Nd:YAG 晶体时,与其吸收谱线相重合的抽运光能量成分将被完全吸收(包含了大部分抽运光能量);而剩余的吸收谱宽以外的能量成份,则由后置的 Nd:YVO<sub>4</sub>全部吸收。

Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的吸收系数较大,且导热性能较差,在大功率抽运时,强烈的热透镜效应会导致谐振腔严重失谐,甚至会出现晶体炸裂的情况。因此,对于已经成熟的单独棒状 Nd:YVO<sub>4</sub>固体激光器而言,并不适用于大功率端面抽运<sup>[9-10]</sup>。而高平均功率、高光束质量的光纤激光器,由于受到光纤非线性效应的影响,输出峰值功率较低<sup>[11-12]</sup>。本文这种晶体组合,利用 Nd:YAG 晶体良好的导热性能和 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的宽吸收谱,在大功率抽运条件下,提高了激光器光光转换效率,实现了峰值功率兆瓦级的输出,同时也使得激光器具有较好的线偏振特性<sup>[13]</sup>,对于远距离目标的探测和成像,具有较好的效果。

## 2 基本原理

### 2.1 理论分析

晶体吸收谱线与 LD 发射谱线的匹配程度是提高激光器光光转换效率的关键要素。图 1 为 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的吸收谱线、LD 发射谱线间的对比图<sup>[14-15]</sup>。由图 1 可知,对于 Nd:YAG 晶体,吸收波长峰值位于 808.6 nm,吸收峰的半峰全宽(FWHM)为 1.04 nm,全宽度不到 3 nm。而大功率的光纤耦合 LD,其发射谱在 808 nm 处的 FWHM 接近 4 nm,全宽度达到 8 nm。两者在谱线宽度方面的不匹配会导致大约 40%的抽运光能量不能被吸收。而 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体在 808 nm 附近处的吸收谱宽(全宽)高达 15 nm,远远超过了 LD 的发射带宽。

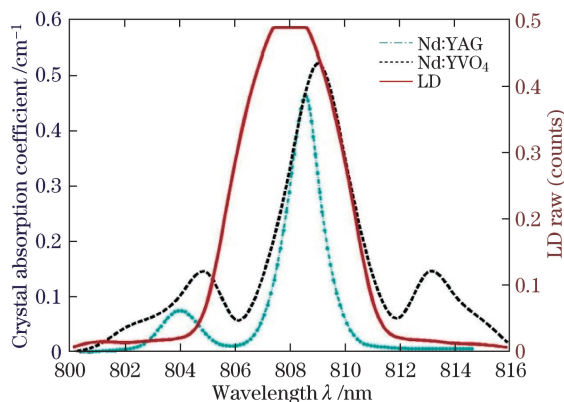


图 1 晶体吸收谱线与 LD 发射谱线

Fig. 1 Absorption spectra of crystals and emission spectrum of LD

通常情况下,LD 的中心波长会随工作温度的升高而变大,变化率为 0.3 nm/°C。对于 Nd:YAG 晶体激光器而言,其吸收谱较窄,这种变化会引起振荡光功率的大幅度波动;而对 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体激光器而言,其吸收谱较宽,LD 工作温度变化时,振荡光功率的波动要小很多<sup>[16]</sup>。图 2 为两种晶体激光器在不同 LD 工作温度情况下,两者输出功率的相对变化,其中抽运功率为 20 W,晶体掺杂浓度和长度均为 0.3% 和 16 mm。图 2(a)为 Nd:YVO<sub>4</sub>和 Nd:YAG 激光器的输出功率同二极管抽运温度关系曲线,图 2(b)为 Nd:YVO<sub>4</sub>和 Nd:YAG 激光器的输出功率变化率同二极管抽运温度关系曲线。

由图 2 可知,Nd:YVO<sub>4</sub>晶体对 LD 工作温度变化的敏感程度远比 Nd:YAG 晶体低。同时 Nd:YVO<sub>4</sub>和 Nd:YAG 晶体发射谱具有良好的匹配关系,如图 3 所示。图 3 是实验中利用光谱仪所测得的两种晶体各自的发射谱,其中纵坐标表示不同波长处输出激光所对应的相对强度,图中阴影部分为二者重叠区域。从图中

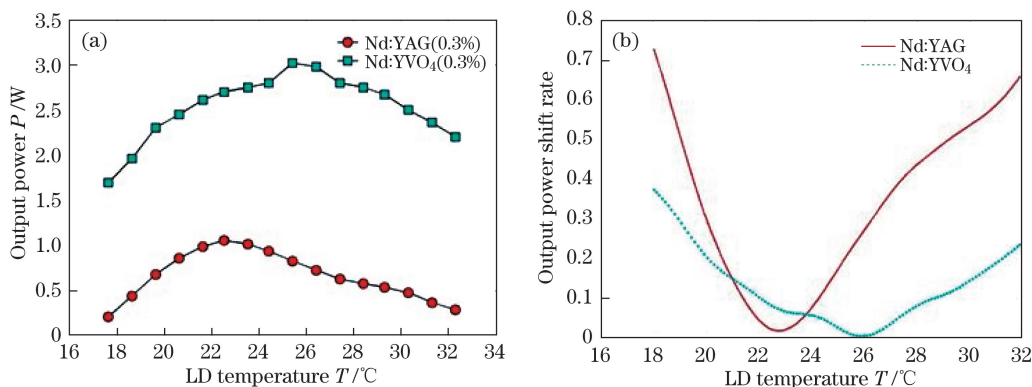


图 2 (a)输出功率和(b)输出功率变化率同二极管抽运温度关系曲线

Fig. 2 (a) Output power and (b) output power shift rate as a function of diode pump temperature

可以看出, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的中心发射波长为 1064.3 nm, 发射谱宽度为 0.8 nm; Nd:YAG 晶体的中心发射波长为 1064.4 nm, 发射谱宽度为 0.45 nm, 两者在发射谱上具有相当大的一部分重叠区域。因此, 两种晶体吸收的能量均可以转化成共同波长的振荡激光, 进而实现高效率的激光输出。

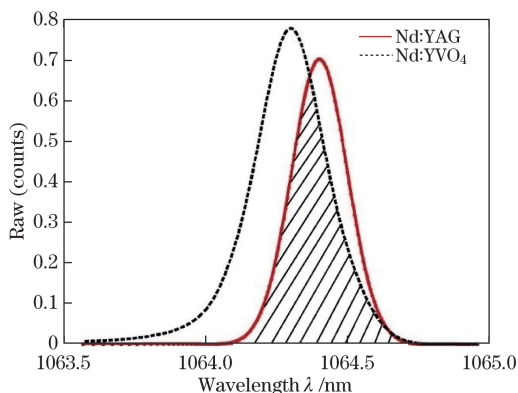


图 3 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的发射谱宽

Fig. 3 Linewidth of Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub>

表 1 为 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体各自的热性能<sup>[17-18]</sup>, 可以发现, Nd:YAG 的热导率是 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的三倍, 因此, 在大功率抽运实验中, 通常选择 Nd:YAG 作为激光晶体。

表 1 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 的热性能

Table 1 Thermal properties of Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub>

Property	Nd:YAG(300 K)	Nd:YVO <sub>4</sub> (300 K)
Thermal conductivity $K/[W/(m \cdot K)]$	14	//C: 5.23 ⊥C: 5.10
Thermal expansional $/(K^{-1} \times 10^{-6})$	7.5	aa = 4.43 ac = 11.37
$dn_0/dT /K^{-1}$	$dn_0/dT = 7.3 \times 10^{-6}$	$dn_0/dT = 8.5 \times 10^{-6}$ $dn_c/dT = 2.9 \times 10^{-6}$

但是, 由于 Nd:YAG 晶体的吸收谱比 LD 的发射谱窄的多, 不能完全吸收抽运光。为了改善这一点, 在端面抽运的 Nd:YAG 后面放置掺杂浓度适合的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体宽吸收谱的特点提高对抽运光能量的吸收效率。后端放置的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 不但可以吸收 Nd:YAG 剩余的吸收谱宽以外的能量, 有效提高抽运光的吸收效率, 而且两者的发射谱较大程度重叠, 吸收的抽运光能量可以转化成相同波长的振荡光能量。

## 2.2 实验系统

实验所用激光器结构模型如图 4 所示。抽运光选取波长为 808 nm 的 LD, 通过光纤耦合系统输出, 经

过透镜的准直和聚焦,进入到晶体棒中。对于激光晶体,选取掺杂浓度为 0.1%,长度为 30 mm,直径为 3 mm 的 Nd:YAG 晶体,对于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,选取掺杂浓度为 0.3%,长度为 16 mm,规格为 3 mm×3 mm。

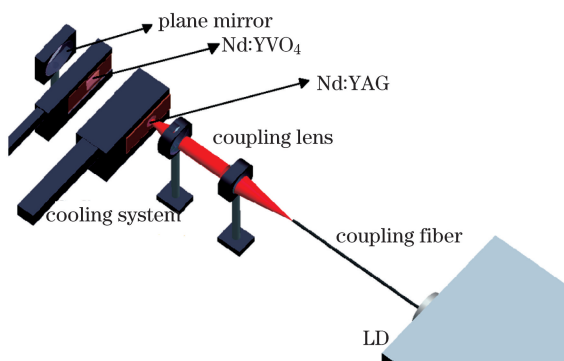


图 4 二极管端面抽运固体激光器结构简图

Fig. 4 Structure diagram of diode end-pumped solid-state laser

同时也选取长度为 16 mm 掺杂浓度 0.3% 的 Nd:YAG 晶体放在上述掺杂浓度为 0.1% 的 Nd:YAG 后面,用作对比实验。

实验系统中,抽运源光纤数值孔径为 0.22,光纤直径为 400  $\mu\text{m}$ ,晶体内光斑半径为 1 mm,晶体间距为 3 mm,谐振腔长度为 120 mm,输出镜为平面镜,透射率为 20%。Nd:YAG(0.1%)晶体在抽运光一端为 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反膜,另一端为 808 nm 增透膜和 1064 nm 增透膜,Nd:YVO<sub>4</sub>(0.3%)和另外一根 Nd:YAG(0.3%)晶体两端均为 808 nm 增透膜和 1064 nm 增透膜。晶体棒外侧用钢皮包裹,通过铜热沉进行加持,确保晶体与热沉之间充分接触,以达散热目的。

### 3 实验结果

图 5 为在 Nd:YAG(0.1%)后分别放置长度相同掺杂浓度均为 0.3% 的 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体时,激光器输出功率变化曲线图。曲线①和②为后端分别放置 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:YAG 晶体时的输出功率曲线图,曲线③为单根掺杂离子数分数 0.1% 的 Nd:YAG 时的输出功率曲线图。对比曲线②和③,可以看到在其尾端再加入一根掺杂离子数分数为 0.3% 的 Nd:YAG 时,其输出功率会提升,但提升程度较低,尤其是在抽运功率超过 120 W 时的大功率情况下,两条曲线接近重合趋势。而对比曲线①和②,在 Nd:YAG 晶体后端放置 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的优势非常明显,在抽运功率为 136 W 时,两者的输出功率相差近一倍。

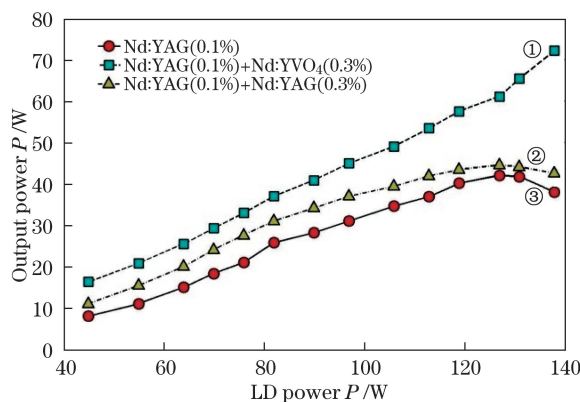


图 5 不同晶体条件下振荡光输出功率曲线图

Fig. 5 Output power curves of oscillating light with different crystals

表 2 为同一输出功率条件下光束质量  $M^2$  的变化情况,在同样输出功率条件下,Nd:YAG(0.1%)+Nd:YVO<sub>4</sub>(0.3%)的结构  $M^2$  是最小的。

表 2 同一输出功率条件下的  $M^2$   
Table 2  $M^2$  in identical output power

Output power $P/W$	$M^2$		
	Nd:YAG(0.1%)	Nd:YAG(0.1%)+Nd:YAG(0.3%)	Nd:YAG(0.1%)+Nd:YVO <sub>4</sub> (0.3%)
40.6	5.03	5.32	2.92

LD 中心波长的漂移会导致激光器输出功率的减小,如图 6 所示,在 Nd:YAG(0.1%)+Nd:YAG(0.3%)结构的实验条件下,可以看出,LD 工作温度的变化对于振荡光输出功率的影响很明显。而对 Nd:YAG(0.1%)+Nd:YVO<sub>4</sub>(0.3%)这种结构而言,抽运光中心波长的波动对激光器输出功率的影响微乎其微。

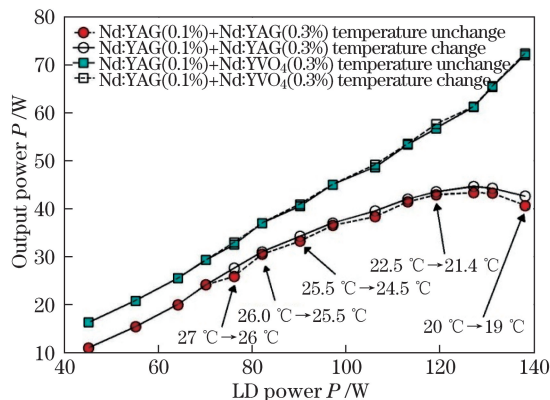


图 6 不同 LD 工作温度条件下两种结构输出功率对比图

Fig. 6 Comparison of output power in two structures under different LD working temperatures

## 4 分析与讨论

表 3 为三种结构在抽运功率 136 W 时的实验数据表。从光光转换效率上看, Nd:YAG(0.1%)+Nd:YVO<sub>4</sub>(0.3%)结构比 Nd:YAG(0.1%)+Nd:YAG(0.3%)提升了 22.9%,而两者的光束质量则基本相同,同时前者受 LD 温度变化的影响较小,最大波动值为 0.6 W,而后者的最大波动值高达 3 W。因此,在大功率端面抽运 Nd:YAG 激光器晶体后面设置一段 Nd:YVO<sub>4</sub>激光晶体,对激光器性能的提升非常显著。

表 3 实验数据表

Table 3 Experimental date

	Nd:YAG(0.1%)	Nd:YAG(0.1%)+Nd:YAG(0.3%)	Nd:YAG(0.1%)+Nd:YVO <sub>4</sub> (0.3%)
Pump power $P/W$	136	136	136
Output power $P/W$	38.6	42.1	73.2
$M^2$	5.85	6.21	6.42
Optical efficiency	28.4%	30.9%	53.8%
Max output power affected by LD temperature $P/W$		3	0.5

## 5 结 论

提出了一种 Nd:YAG 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的组合应用方案,实现了激光晶体吸收谱和中心波长 808 nm 的 LD 抽运光的良好匹配,与传统的 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器和光纤激光器相比,该方案可以在大功率抽运条件下,实现大峰值功率的输出。实验表明,Nd:YAG+Nd:YVO<sub>4</sub>结构在抽运功率 136 W 时,实现光光转换效率 53.8%,比传统双段 Nd:YAG 晶体阶梯浓度组合提高了 22.9%,同时,降低了抽运光中心波长浮动对振荡光功率产生的影响,在实际应用中具有更好的稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 Chénais S, Balembois F, Druon F, *et al.*. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers-part II: Evaluation of quantum efficiencies and thermo-optic coefficients[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2004, 40(9): 1235-1243.
- 2 Chénais S, Balembois F, Druon F, *et al.*. Thermal lensing in diode-pumped Ytterbium lasers-Part I: Theoretical analysis and wavefront measurements[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2004, 40(9): 1217-1234.
- 3 Bonnefois A M, Gilbert M, Thro P Y, *et al.*. Thermal lensing and spherical aberration in high-power transversally pumped laser rods[J]. *Optics Communications*, 2006, 259(1): 223-235.
- 4 Chénais S, Forget S, Druon F, *et al.*. Direct and absolute temperature mapping and heat transfer measurements in diode-end-pumped Yb: YAG[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(2): 221-224.
- 5 Song X, Li B, Guo Z, *et al.*. Influences of pump beam distribution on thermal lensing spherical aberration in an LD end-pumped Nd:YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(24): 4779-4783.
- 6 Safari E, Kachanov A. Estimation of thermal lensing effect in the high-power end-pumped direct-cut crystal lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, 38(7): 534-539.
- 7 Xu L, Zhang H, He J, *et al.*. Double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser at 1064 nm[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2012-2014.
- 8 Zhang H, Chao M, Gao M, *et al.*. High power diode single-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, 35(6): 445-449.
- 9 Shi Zhaohui, Liu Xuedong, Huang Yutao, *et al.*. 500 kHz, 6 ns high repetition-rate electro-optical cavity dumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1002006.  
石朝辉, 刘学松, 黄玉涛, 等. 500 kHz, 6 ns 高重复频率电光腔倒空 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1002006.
- 10 Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng, *et al.*. Thermal analysis of Nd:YVO<sub>4</sub> pumped by 808 nm and 888 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0402001.  
艾庆康, 常亮, 陈蒙, 等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>热效应分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0402001.
- 11 Wu Quan, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Research progress of nanosecond regime pulsed fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060004.  
吴权, 樊仲维, 余锦, 等. 纳秒量级脉冲光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060004.
- 12 Li Pingxue, Yang Chun, Yao Yifei, *et al.*. Research progress of 980 nm fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100001.  
李平雪, 杨春, 姚毅飞, 等. 980 nm 光纤激光器的研究发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100001.
- 13 Li Bin, Ding Xin, Sun Bing, *et al.*. Laser-diode-pumped coaxial double crystals Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> Cr:YAG passively Q-switched laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0402003.  
李斌, 丁欣, 孙冰, 等. 激光二极管抽运 Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub>共轴双晶体 Cr:YAG 被动调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0402003.
- 14 Wang Di. The effect of Nd<sup>3+</sup> doping on the LD-pumped Nd:YAG pulsed laser output characteristics[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 9-10.  
王迪. Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对 LD 泵浦 Nd:YAG 脉冲激光器输出特性影响的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 9-10.
- 15 Li Jianhong, Wang Shuhua, Nie Yi, *et al.*. Optical absorption properties for Nd:YVO<sub>4</sub> laser crystals near 808 nm wavelength[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, 31(2): 154-159.  
李建宏, 王淑华, 聂奕, 等. Nd:YVO<sub>4</sub>激光晶体对 808 nm 附近光的吸收特性[J]. *量子电子学报*, 2014, 31(2): 154-159.
- 16 Li Bin, Ding Xin, Zhang Wei, *et al.*. 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser pumped by wave-locked 878.6 nm laser diode[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0502010.  
李斌, 丁欣, 张巍, 等. 波长锁定 878.6 nm 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 1064 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502010.
- 17 Koechner W. *Solid-state laser engineering*[M]. Berlin: Springer, 2002: 63-64.
- 18 Yin Xiaoxue, Guo Zhen, Li Bingbin, *et al.*. Laser crystal thermal effect and ladder pump technology [J]. *Electronic Science and Technology*, 2010, 23(2): 39-41.  
尹晓雪, 过振, 李兵斌, 等. 激光晶体热效应的阶梯泵浦技术[J]. *电子科技*, 2010, 23(2): 39-41.