

# 高功率全固态连续单频 1342 nm Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器的设计及实现

王珪廷 张瑞红 李武军

西安工业大学物理系, 陕西 西安 710021

**摘要** 为提高 1342 nm 波段全固态连续单频 Nd:GdVO<sub>4</sub> 红外激光器的输出功率, 本文选用复合式 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体为激光介质, 并对其相关参数进行优化, 以提高激光输出功率。研究表明, 热致衍射损耗正比于激光介质横截面尺寸, 热损伤阈值抽运功率随横截面尺寸的减小而增加。通过环形腔选模的方法实现激光器单频运转, 并选用横截面尺寸较小的激光晶体。实验证明, 1342 nm 激光最大输出功率为 3.1 W, 较前期激光器输出功率提高 30%。

**关键词** 激光器; 单频; 环形腔; 复合激光介质; 热损伤; 热致衍射损耗

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111402

## High Power All-Solid-State Continuous-Wave Nd:GdVO<sub>4</sub> Laser of Single-Frequency Operation at 1342 nm

Wang Yaoting Zhang Ruihong Li Wujun

Department of Physics, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** To scale the output power of all-solid-state continuous-wave Nd:GdVO<sub>4</sub> laser of single-frequency operation at 1342 nm, the composite Nd:GdVO<sub>4</sub> laser crystal is used as laser medium, and its relevant parameter is optimized. The theoretical calculation shows that the thermally induced diffraction losses is proportional to the cross-section dimension of laser medium, and the pump power of thermal fracture limit is the decreasing function of it. A ring laser resonator is designed to make the laser single-frequency operation. The experimental result shows that the maximum output power is 3.1 W, and the conversion efficiency increases by 30%.

**Key words** lasers; single-frequency; ring cavity; composite laser medium; thermal fracture; thermally induced diffraction losses

**OCIS codes** 140.3560; 140.3430; 140.6810

### 1 引言

全固态激光器是指用激光二极管代替闪光灯抽运固体激光增益介质的激光器, 也称激光二极管抽运的固体激光器, 具有转换效率高、器件结构紧凑、体积小、寿命长、可靠性高、结构牢固、光束质量好、峰值功率高、工作介质覆盖的波段广及运转方式多样等优点, 成为当前激光技术发展的主要方向, 也进一步推动了众多激光应用技术的发展。虽然全固态激光器具有上述优点, 但随着抽运功率的提高, 相对严重的热效应仍然是限制激光转换效率进一步提高的主要因素。热效应包括热透镜效应<sup>[1]</sup>、热退偏<sup>[1]</sup>、热致衍射损耗效应<sup>[2-4]</sup>及热损伤<sup>[5]</sup>。热透镜效应可以通过谐振腔的设计得到补偿, 不会给激光器带来较大影响; 对于双折射激光介质, 例如钒酸(VO<sub>4</sub>)类化合物, 热退偏效应可以忽略; 但热致衍射损耗和热损伤目前还没有较有效的方法来补偿和消除。近些年的研究表明<sup>[1]</sup>, 复合激光介质可以在一定程度上减小热效应, 尤其是在大功率激光器中, 已成为常用的增益介质类型。复合激光介质是指通过扩散键合的方式, 将不掺杂的激光介质基质和掺杂部分永久性的结合在一起, 其优点在于, 不掺杂部分并不吸收抽运光, 从而不会产生热量, 但可以为掺杂部分提供更多的散热空间, 降低激光介质温度; 同时可以防止热致端面畸变, 一定程度上减小热透镜效应和热损伤效应。

收稿日期: 2015-01-30; 收到修改稿日期: 2015-03-01; 网络出版日期: 2015-10-20

作者简介: 王珪廷(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光技术方面的研究。E-mail: 1173408090@qq.com

二极管端面抽运的 1342 nm 波段的全固态红外激光器在光谱学、医疗、光纤光学、光纤通信和激光加工等方面有着重要的应用。另外,通过倍频 1342 nm 波段的红外激光而得到的 671 nm 波段的红光激光器在激光彩色显示、激光医学以及在使用 Cr:LiSAT 激光器抽运源等方面也有着重要的应用。近些年来,Nd:GdVO<sub>4</sub>作为一种相对新型的激光晶体,已经展现出其在物理性能、机械性能方面许多优势<sup>[6-10]</sup>,例如:吸收效率高、受激辐射截面大、热导率高等。因此,在高功率激光二极管抽运固体激光器方面,Nd:GdVO<sub>4</sub>激光晶体优势很有可能超过目前常用的激光晶体 Nd:YAG、Nd:YVO<sub>4</sub>。对 808 nm 波段的抽运光,Nd:GdVO<sub>4</sub>的吸收系数为 74 cm<sup>-1</sup>,远大于 Nd:YVO<sub>4</sub>(31.4 cm<sup>-1</sup>)和 Nd:YAG(7.1 cm<sup>-1</sup>);在中心波长 1342 nm 处,Nd:GdVO<sub>4</sub>的受激辐射截面为 1.8×10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup>,稍大于 Nd:YAG(0.7×10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup>),但稍小于 Nd:YVO<sub>4</sub>(2.8×10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup>);Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体的热导率为 11.7 W/(m·K),和 Nd:YAG 热导率相当[14 W/(m·K)],但大于 Nd:YVO<sub>4</sub>[约为 5 W/(m·K)]。因此,Nd:GdVO<sub>4</sub>激光晶体用于获得 1342 nm 波段的高功率激光方面值得研究。

前期研究工作中,已经得到了输出功率为 2.4 W 的连续单频 1342 nm Nd:GdVO<sub>4</sub>红外激光器,但随着抽运功率的增加,输出功率出现了饱和现象,其原因在于严重的热效应。基于此,本文选用了单端复合的 Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体为激光介质实现 1342 nm 波段的高功率激光器,通过减小热效应提高激光器输出功率。

## 2 激光介质横向尺寸参数优化

已知热致衍射损耗  $\delta_d$  和热损伤阈值抽运功率  $P_{\text{abs-lim}}$  可以表示为<sup>[2-5]</sup>

$$\begin{cases} \delta_d = 1 - \left| \frac{\int_0^{r_b} \exp[i\Delta\varphi(r)] \exp(-2r^2/\omega_0^2) r dr}{\int_0^{r_b} \exp(-2r^2/\omega_0^2) r dr} \right|^2, \\ P_{\text{abs-lim}} = \frac{4\pi K_c \eta_{\text{abs}} \sigma_{\text{max}}}{\alpha_T E \xi \alpha \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{\omega_p(z)}{r_b} \right]^2 \right\}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $r_b$  为激光介质半径,  $\omega_0$  为介质中振荡激光光斑半径,  $K_c$  为激光介质热导率,  $\alpha_T$  为热膨胀系数,  $E$  为杨氏模量,  $\sigma_{\text{max}}$  为损伤极限应力,  $\alpha$  为激光介质相对于抽运波长的吸收系数,  $\eta_{\text{abs}}$  为介质对抽运光的吸收效率,  $\xi$  为抽运能量转化为热量的百分比,  $\omega_p(z)$  为介质中抽运光的光斑半径,  $\Delta\varphi(r)$  为热效应导致的波前畸变而产生的相对于参考球面的相位差,并表示为

$$\Delta\varphi(r) = \frac{P_p \eta_{\text{abs}} \xi (dn/dT)}{\lambda K_c} \times \left[ \ln\left(\frac{r_b^2}{r^2}\right) - E_1\left(\frac{2r^2}{\omega_{\text{pa}}^2}\right) - \ln\left(\frac{2r_b^2}{\omega_{\text{pa}}^2}\right) - \ln 2 - \gamma + \frac{2r^2}{\omega_{\text{pa}}^2} \right], \quad (2)$$

式中  $P_p$  为抽运功率,  $\frac{dn}{dT}$  为热光系数,  $\omega_{\text{pa}}$  为激光介质中抽运光平均光斑半径,  $E_1$  为指数积分函数,  $\gamma$  为指数积分函数中的常数。相位差  $\Delta\varphi(r)$  取决于激光介质的温度分布,而温度分布函数  $\Delta T(r, z)$  表示为<sup>[11]</sup>

$$\Delta T(r, z) = T(r, z) - T(r_b) = \frac{\alpha P_p \eta_{\text{abs}} \xi \exp(-\alpha z)}{4\pi K_c} \times \left[ \ln\left(\frac{r_b^2}{r^2}\right) + E_1\left(\frac{2r_b^2}{\omega_{\text{pa}}^2}\right) - E_1\left(\frac{2r^2}{\omega_{\text{pa}}^2}\right) \right], \quad (3)$$

式中  $T(r, z)$  为激光介质中任意位置  $(r, z)$  处的温度,  $T(r_b)$  为介质的边界温度。

图 1 是根据(3)式数值计算的抽运功率 20 W 时,激光介质抽运端面中心相对于边界的温度差  $\Delta T(0, 0)$  和激光介质(Nd:GdVO<sub>4</sub>)半径  $r_b$  的关系图,其中用到抽运光斑平均半径为 350 μm。从计算结果可以看出激光介质的中心温度远高于边界温度,但随着介质半径的减小,温度差也减小,其意义在于,实际中可以通过减小激光介质半径来有效地降低介质温度,例如,从图中可以看出,半径值减小 0.2 mm,中心温度就可以降低近 20 °C,但通过控温系统直接将激光介质中心温度降低 20 °C 是很困难的。研究表明,介质的热导率  $K_c$  反比于激光介质温度<sup>[12-13]</sup>,但热膨胀系数  $\alpha_T$  和热光系数  $\frac{dn}{dT}$  都正比于温度<sup>[14-16]</sup>。根据(1)式,热膨胀系数  $\alpha_T$ 、热光

系数  $\frac{dn}{dT}$ 、及热导率  $K_c$  的变化会影响热致衍射损耗  $\delta_d$  和热损伤阈值抽运功率  $P_{\text{abs-lim}}$ 。因此,综合考虑上述各因素,利用(1)式数值计算了热致衍射损耗  $\delta_d$  和热损伤阈值抽运功率  $P_{\text{abs-lim}}$  与激光介质半径  $r_b$  的关系,结果分别如图 2 和图 3 所示。可以看出,随着激光介质半径的减小,热致衍射损耗也会降低,但同时热损伤阈值

抽运功率会增加,这都有利于激光输出功率的提高。如前文所述,即使热致衍射损耗效应和热损伤效应难以根除,但可以通过减小激光介质半径的方法适当减弱此类热效应。

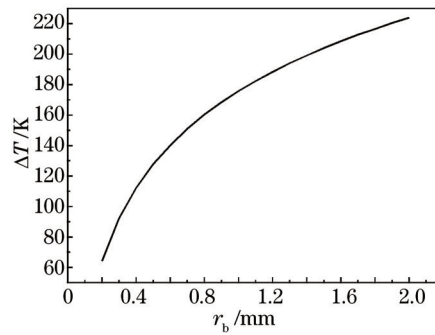


图1 温差  $\Delta T(0,0)$  和激光介质半径  $r_b$  关系图

Fig. 1 Dependence of temperature difference  $\Delta T(0,0)$  on the laser medium radius  $r_b$

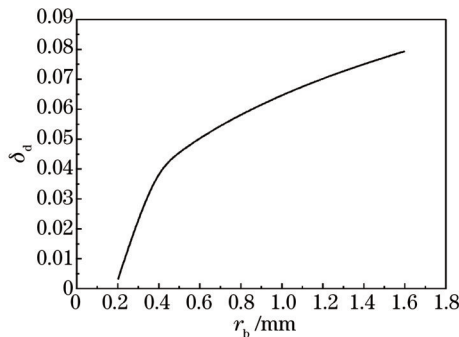


图2 热致衍射损耗  $\delta_d$  和激光介质半径  $r_b$  关系图

Fig. 2 Dependence of thermally induced diffraction losses  $\delta_d$  on the laser medium radius  $r_b$

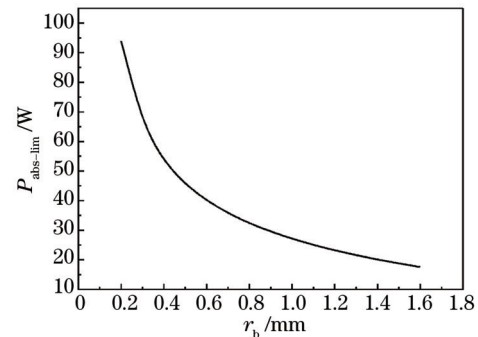


图3 热损伤阈值抽运功率  $P_{\text{abs-lim}}$  和激光介质半径  $r_b$  关系图

Fig.3 Dependence of thermal fracture limit pump power  $P_{\text{abs-lim}}$  on the laser medium radius  $r_b$

### 3 实验装置及结果

实验装置如图4所示,实验中设计了四镜环形谐振腔。抽运源为中心波长为 808 nm 的光纤耦合激光二极管(LD),光纤数值孔径为 0.12,芯径为 300  $\mu\text{m}$ 。经光纤耦合输出的抽运光经 1:1 的光学传输系统聚焦到激光介质内约 1.5 mm 处。激光介质为复合的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体,其中不掺杂部分长度为 3 mm,掺杂部分长度为 8 mm,且掺杂原子数分数为 0.2%。根据本文第二部分研究结果,Nd:GdVO<sub>4</sub> 的横向尺寸为 2.5 mm×2.5 mm,较常用的横向尺寸减小了 0.5 mm。Nd:GdVO<sub>4</sub> 两端面都镀 1342 nm 减反膜(反射率  $R_{1342 \text{ nm}} < 0.2\%$ )和 808 nm 高透膜(透射率  $T_{808 \text{ nm}} > 95\%$ ),同时要求 1064 nm 波段透射率  $T_{1064 \text{ nm}} > 90\%$ ,以抑制该波段的寄生振荡。整个 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体被热导率极高的钢铂包裹并置于紫铜制作的晶体炉中,整个晶体炉被精密控温,控温精度达 0.1  $^{\circ}\text{C}$ ,实验中 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度被控制在 20  $^{\circ}\text{C}$ 。平面镜 M1 和 M2、凹面镜 M3 和 M4 组成四镜环形谐振腔,其中 M1、M2 镀对 1342 nm 高反膜和 808 nm 高透膜,M3 镀对 1342 nm 高反膜和 671 nm 高透膜,M4 为输出耦合镜,且 1342 nm 波段透射率为 5%,另外,M1 和 M2 在 1064 nm 波段透射率均大于 60%,从而抑制 1064 nm 波段激光的起振。半波片和置于磁场中的磁光晶体组成光学单向器,迫使振荡激光单向运转,以消除空间烧孔效应,实现激光器单纵模运转,半波片和磁光晶体都镀对 1342 nm 减反膜。

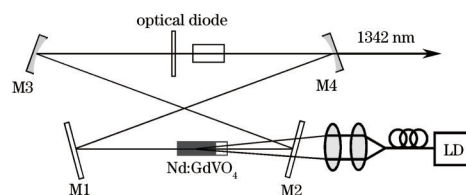


图4 实验装置示意图

Fig.4 Schematic of experimental setup

实验测量的 1342 nm 激光输出功率和抽运功率关系如图 5 所示(圆点), 阈值为 4 W, 最大输出功率为 3.1 W, 对应抽运功率为 21.6 W, 但随着抽运功率的继续增加, 输出功率出现了饱和现象, 因此该抽运功率值可以近似认为热损伤阈值抽运功率  $P_{\text{abs-lim}}$ 。将复合的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体更换成传统的激光介质, 尺寸为 3 mm×3 mm×8 mm, 掺杂原子数分数 0.2%, 即传统的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光介质并不包括不掺杂部分。实验测量的该激光介质对应的输出功率也如图 5 所示(方点), 可以看出其振荡阈值为 4.8 W, 最大输出功率为 2.4 W, 对应泵浦功率为 18.5 W, 当然随着抽运功率的增加, 输出功率也出现了饱和, 则该抽运功率值可以近似认为是更换的激光介质对应的热损伤阈值抽运功率。两种不同的激光介质对应的实验结果相比较, 可以看出复合激光介质的阈值明显低于传统激光介质, 这就证明了复合激光介质热效应确实低于传统激光介质。另外, 复合激光介质对应的最大输出功率和热损伤阈值抽运功率也明显高于传统的激光介质, 这也证明了前文相关理论分析的合理性。用扫描共焦法布里-珀罗(F-P)腔对输出激光进行扫描, 并用数字示波器记录(型号: RIGOL DS1302CA), 记录结果如图 5 中子图所示, 结果说明该激光器为单纵模运转。实验测得的激光输出功率稳定性如图 6 所示, 结果说明在 2 h 内输出功率相对于平均输出功率的波动优于 ±1%。另外, 在不同的连续单频激光输出功率条件下, 实验测量的输出激光的光束质量因子  $M^2$  均小于 1.2。将谐振腔改为“平-平腔”, 可以实际测量激光介质的热焦距<sup>[17]</sup>, 实验中用到的输出耦合透射率为 10%。实际测量的两种不同的激光介质对应的热焦距值和抽运功率关系图如图 7 所示, 可以看出, 复合激光介质的热焦距大于传统激光介质的热焦距, 即复合激光介质的热效应确实低于传统激光介质。

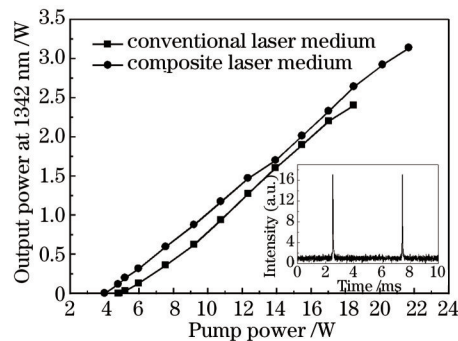


图5 1342 nm 激光输出功率和抽运功率关系图

Fig.5 Output power at 1342 nm versus pump power

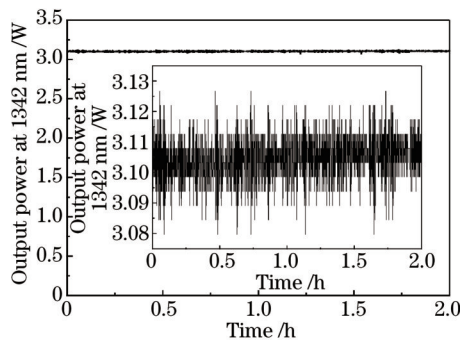


图6 1342 nm 激光输出功率长期波动曲线

Fig.6 Output power fluctuations of 1342 nm laser

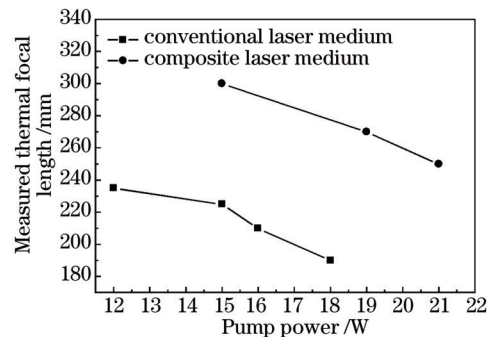


图7 实验测量的热焦距和抽运功率关系图

Fig.7 Measured thermal focal length versus pump power

## 4 结 论

理论计算证明减小激光介质横向尺寸可以减小热致衍射损耗并提高热损伤阈值抽运功率, 因此实验中选择横向尺寸为 2.5 mm×2.5 mm 的复合式 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体为激光介质, 实验证明该激光介质性能优于传统的激光介质。

实验上观察到大功率抽运条件下, 优化的激光介质仍然出现了输出功率饱和的现象, 同时激光介质温度急剧升高, 因此激光介质参数及控温系统需要进一步优化。

## 参考文献

- 1 Koechner W. Solid-state Laser Engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl. Beijing: Science Press, 2002: 356-409.  
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002: 356-409.
- 2 Y F Chen, T M Huang, C F Kao, *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped laser to higher power: influence of thermal effect[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(8): 1424-1429.
- 3 Yaoting Wang, Wujun Li, Leilei Pan, *et al.*. Diode-end-pumped continuous wave single-longitudinal-mode Nd:GdVO<sub>4</sub> laser at 1342 nm[J]. Appl Opt, 2013, 52(9): 1987-1991.
- 4 Zheng Jiaan, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, *et al.*. Influence of thermal effect in gain-media on optimum design of LD-end-pumped solid-state laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(6): 724-729.  
郑家安, 赵圣之, 王青圃, 等. 晶体热效应对LD端面泵浦固体激光器优化设计的影响[J]. 光子学报, 2001, 30(6): 724-729.
- 5 Y F Chen. Design criteria for concentration optimization in scaling diode end-pumped laser to high powers: influence of thermal fracture[J]. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35(2): 234-239.
- 6 Jensen T, Ostroumov V G, Meyn J P, *et al.*. Spectroscopic characterization and laser performance of diode-laser-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>[J]. Applied Physics B, 1994, 58(5): 373-379.
- 7 Zhao Weifang, Hou Wei, Guo Lin, *et al.*. 7.5 W Nd:GdVO<sub>4</sub> single-frequency ring laser[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0514003.  
赵伟芳, 侯玮, 郭林, 等. 7.5 W Nd:GdVO<sub>4</sub>环形腔单频激光器[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0514003.
- 8 Wang Yaoting, Zhou Qianqian, Li Yuanji, *et al.*. All-solid-state CW Nd:YAG blue laser of single frequency operation with 770 mW output power[J]. Chinese J Laser, 2009, 36(7): 1714-1718.  
王垚廷, 周倩倩, 李渊骥, 等. 输出770 mW的全固态连续单频蓝光激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1714-1718.
- 9 Yang Xiaoping, Wang Chunxiang, Feng Jinxia, *et al.*. 9 W all-solid-state continuous-wave single-frequency 1.34 μm Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602019.  
杨小平, 王春香, 冯晋霞, 等. 9 W全固态连续单频1.34 μm Nd:YVO<sub>4</sub>激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602019.
- 10 Du Chenlin, Qin Lianjie, Meng Xianlin, *et al.*. Study of high-power continuous-wave 1.34 μm Nd:GdVO<sub>4</sub> laser end-pumped by laser-diode-array[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(8): 681-683.  
杜晨林, 秦连杰, 孟宪林, 等. LD抽运高功率连续波1.34 μm Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器研究[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 681-683.
- 11 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.
- 12 S Bjurshagen, R Koch. Modeling of energy-transfer upconversion and thermal effects in end-pumped quasi-three-level lasers[J]. Appl Opt, 2004, (24): 4753-4567.
- 13 C Pfistner, R Weber, H P Weber, S Merazzi, *et al.*. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods[J]. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(7): 1605-1615.
- 14 R Wynne, J L Daneu, T Y Fan. Thermal coefficients of the expansion and refractive index in YAG[J]. Appl Opt, 1999, 38(15): 3282-3284.
- 15 T Y Fan, J L Daneu. Thermal coefficients of the optical path length and refractive index in YAG[J]. Appl Opt, 1998, 37(9): 1635-1637.
- 16 D C Brown. Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1998, 34(12): 2383 - 2392.
- 17 F Song, C Zhang, X Ding, *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers[J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(12): 2145 - 2147.

栏目编辑: 宋梅梅