

文章编号: 1001-3806(2004)06-0616-04

双端抽运 NdYVO₄ 激光晶体的半解析热分析

史 彭¹, 李 隆^{2,3}, 甘安生¹, 李东亮¹, 白晋涛³

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055; 2. 西安交通大学 电子与信息工程学院 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049; 3. 西北大学 光子学与光子技术研究所 陕西省光电子技术重点实验室, 西安 710069)

摘要: 通过对激光二极管双端抽运 NdYVO₄ 晶体的分析, 建立符合实际工作条件的热模型和边界条件, 利用半解析热分析方法得出了激光晶体内部温度场和端面的热形变计算公式, 并对影响温度场分布的各种因素进行了理论分析与计算。所得出的结论可以推广到其它激光晶体, 为有效地解决激光晶体热效应问题提供了理论基础。

关键词: 双端抽运; NdYVO₄ 晶体; 半解析热分析方法; 温度场

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Semi-analytical thermal analysis of double-end-pumped NdY:VO₄ crystal

SHI Peng¹, LI Long^{2,3}, GAN An-sheng¹, LI Dong-liang¹, BAI Jin-tao³

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shanxi Province Key Laboratory of Photonics Technology for Information, School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Shanxi Provincial Key Laboratory of Photo-electronic Technology, Institute of Photonics & Photo-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Through LD double-end-pumped NdYVO₄ laser crystal working character analysis, laser crystal thermal model and boundary condition according with practical working condition are built. Laser crystal interior temperature field and end-face thermal distortion field calculation equations are obtained by semi-analytical thermal analysis method, simultaneity all kinds of parameters affecting laser crystal temperature field distribution are all analyzed. All research results can be generalized to other laser crystals, and these research will be theoretically established for further research to effectively resolve laser diode end-pumped laser system's thermal effect problem.

Key words: double-end-pumping; NdYVO₄ laser; semi-analytical thermal analysis method; temperature field

引 言

近些年迅猛发展的激光二极管抽运的全固态激光器(DPSSL)将二极管激光技术、固体激光技术与非线性晶体材料紧凑地而且是有机的融合在一起,并具有效率、体积小、重量轻、寿命长、稳定性好等特点,成为当今固体激光器件一个新的发展方向^[1,2]。

激光二极管抽运全固态激光器的方式,主要有端面抽运(end-pumping 或 longitudinally pumping)和侧面抽运(side-pumping)两种。采用端面抽运的方

式,抽运光可被有效地耦合进激活介质的 TEM₀₀ 模体积内,易于实现抽运光与激光腔内振荡光间的模式匹配,不仅大大地提高了对于抽运光的利用率,还可实现激光器稳定的基模输出^[3]。

虽然端面抽运的全固态激光器有较高的光-光转换效率,但仍有相当一部分抽运能量转变为激光晶体的热量并耗散在激光晶体内部,并在激光晶体内部产生非均匀的温度分布^[4]。与此同时,热还会诱导激光晶体产生热透镜效应。激光晶体的热透镜效应起因大致有 3 个方面:首先大多数激光晶体都存在不同程度的热色散,即晶体折射率随温度发生变化。激光晶体吸收抽运光能量在内部建立温度分布后,晶体的折射率不再是均匀的,势必形成相应的折射率分布。其次是热应力光弹效应,即激光晶体内部应力引起的热应变导致折射率变化。此外,高功率抽运光辐射下激光晶体的端面不再是一个平面,将产生一定量的热致形变。在引起激光晶体热透镜效

基金项目:陕西省教育厅 2004 年专项科研资助项目(04J K129)

作者简介:史 彭(1956-),男,教授,从事强激光器热分析、集成电路热分析等方面的研究工作。

E-mail: pshi56@sohu.com

收稿日期:2003-10-27;收到修改稿日期:2003-11-13

应的上述 3 种因素中,由温度引起晶体折射率变化对激光晶体热透镜效应的贡献约占 70% 以上^[5]。并且激光晶体的热透镜效应影响到激光器性能的各个方面,如谐振腔的稳定性、腔模尺寸、模式耦合效率、输出光束质量等^[6]。

单端抽运激光晶体的方式势必会造成晶体内部温度场相对于晶体两个端面严重不对称性,由此产生的热透镜效应也就具有了更大的不确定性。TIDWELL 等人的研究指出,对于 Nd:YAG 晶体单端抽运允许吸收的最大抽运功率约为 50W^[5]。双端抽运方式在激光晶体内部形成的温场相对于激光晶体的两端面而言具有对称性,与单端抽运方式相比,较好地控制了晶体的热透镜效应^[7]。

通过上述分析,激光晶体的温升是影响激光器性能的根本原因。只有对激光晶体的温度场分布进行深入的研究,才能做到有效的控制,以解决全固态激光器的稳定问题。文中对双端抽运 Nd:YVO₄ 激光晶体进行了分析,建立了符合实际工作条件的热模型和边界条件,利用半解析热分析方法得出了 Nd:YVO₄ 激光器在高功率基模工作状态下激光晶体内部温度场的计算公式和热形变计算公式,并分析了影响激光晶体温度场分布的各种因素。所得出的结论可以推广应用到其它激光晶体,为激光晶体的热形变的分析提供了理论基础,并可在激光二极管抽运的全固态激光器设计中起到一定的指导作用。

1 激光晶体内部温度场的半解析计算方法

1.1 双端抽运激光晶体实验结构及其热模型

双端抽运四镜折叠腔结构内 Nd:YVO₄ 温度场的研究,为发展以 Nd:YVO₄ 为激光增益介质的红、绿、蓝三色固态激光器提供了理论基础。双端抽运四镜折叠腔结构实验装置如图 1 所示。

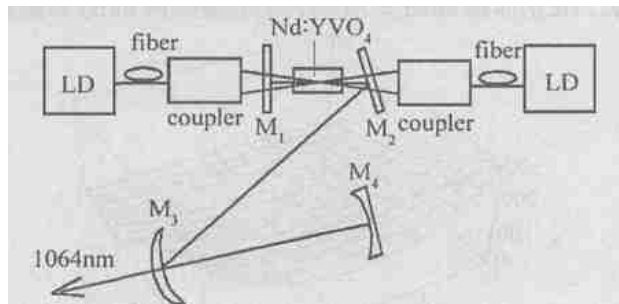


Fig. 1 Experiment arrangement of LD double-end-pumped Nd:YVO₄ laser

为了使激光晶体内的热尽可能的扩散,通常采用紫铜块通过热传导的方式带走热量。其具体方法是:根据激光晶体的尺寸,设计冷却使用的紫铜夹

块,用循环水冷却或半导体制冷的方式对于紫铜块冷却。为了保持 Nd:YVO₄ 晶体与冷却块的良好接触,在晶体侧面涂抹银粉,用铟膜包裹后,置入冷却块中。严格控制循环冷却器或半导体器件的控温模块,使冷却块周边温度保持恒定。激光晶体热模型为半径为 R 、长度为 L 的圆柱体。建立坐标系,沿轴向为 z 方向。

对激光晶体热模型进行分析,可以得出以下的结论。

(1) 采用多束光纤耦合输出激光的方式不可避免地会造成输出光束的发散。通常采用平凸透镜组成的光学系统或自聚焦透镜,将抽运光耦合到激光晶体的端面。由于二极管激光器输出光束的光强分布较为复杂,一般处理方法便将其视为具有均匀强度分布的平行平面光,但是严格地讲,用高斯光束来描述抽运光束强度分布更为合理些^[8]。

设抽运光为高斯光束,平行坐标系 z 轴。对入射到 $z=0$ 端面的抽运光进行分析,激光晶体内部光强 $I_1(r, z)$ 在 $z=0$ 面的分布为:

$$I_1(r, 0) = I_{01} \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2}\right] \quad (1)$$

式中, w 为高斯光束的半径。抽运光经耦合系统入射到激光晶体 $z=0$ 面的功率为 P_1 , 则:

$$P_1 = \int_0^\infty I_{01} \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2}\right] 2\pi r dr \quad (2)$$

可以得出:

$$I_{01} = \frac{P_1}{\int_0^\infty \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2}\right] 2\pi r dr} \quad (3)$$

设激光晶体对抽运光的吸收系数为 β , 当平行 z 轴的抽运光传播时,其光强由于被激光晶体吸收而减弱,在激光晶体 $z=z$ 面的光强为:

$$I_1(r, z) = I_{01} \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2}\right] \cdot \exp(-\beta z) \quad (4)$$

由于激光晶体存在荧光量子效应、内跃迁损耗等多种因素使得一部分抽运能量转变为激光晶体的热量。如果假设荧光量子效率等于 1, 即激光晶体内热效应完全由激光内跃迁损耗引起^[9]。在 $z=z$ 面, 由于激光晶体吸收产生的热功率密度为:

$$q_v(r, z) = \beta \eta I_1(r, z) = \beta \eta I_{01} \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2}\right] \exp(-\beta z) \quad (5)$$

式中, η 为激光晶体吸收抽运光能量的热转换系数:

$$\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_1 \quad (6)$$

式中, λ_p 为激光二极管激光器的抽运光波长 809nm, λ_1 为谐振腔的振荡激光波长。

同样, 可以得出对入射到 $z = L$ 面功率为 P_2 的右端抽运光在晶体 $z = z$ 面产生的热功率密度为:

$$q_{v_2}(r, z) = \beta \eta I_{02} \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2}\right] \times \exp[-\beta(L-z)] \quad (7)$$

$$I_{02} = \frac{P_2}{\int_0^\infty \exp\left[-2 \frac{r^2}{w^2}\right] 2\pi r dr} \quad (8)$$

(2) 由于激光晶体周边采用紫铜水冷套冷却, 紫铜热传导系数远远大于激光晶体热传导系数(铜热传导系数是掺 Nd^{3+} 晶体的 30 多倍), 热量主要沿激光晶体径向辐射状向外传导, 因此, 可以假设热流场为径向(r 方向)^[8,10], 即: $u_z(r, z) = 0$ (9)

晶体的侧面($r = R$ 处) 温度恒定为 u_w 。作为热模型数学处理可设其为 0(相对), 得出温度场后, 再叠加激光晶体的环境温度, 即: $u(R, z) = 0$ (10)

(3) 激光晶体两端面均与空气相接触, 从两端面和空气热交换流出的热量远远小于从激光晶体侧面通过传导流出的热量, 因此, 可假设激光晶体的两端面绝热, 即有: $u_z(r, 0) = u_z(r, L) = 0$ (11)

1.2 晶体内部温度场的半解析计算公式

由于激光晶体内部有热源, 则激光晶体内部热传导遵守 Poisson 方程:

$$u_{rr} + \frac{u_r}{r} + \frac{u_{\phi\phi}}{r^2} + u_{zz} + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (12)$$

式中, λ 为激光晶体导热系数或称为热导率。由于抽运光源、激光晶体内热源均具有轴对称性, 因此, 产生的温度场与 ϕ 无关, 即 $u(r, \phi, z) = u(r, z)$ 。

(12) 式的半解析解为(推导过程略):

$$u = -\frac{\beta \eta}{\lambda} \{ I_{01} \exp(-\beta z) + I_{02} \exp[-\beta(L-z)] \} \times \left[\ln \frac{r}{R} \int_0^r \exp\left[-2 \frac{\rho^2}{w^2}\right] \rho d\rho + \int_r^R \exp\left[-2 \frac{\rho^2}{w^2}\right] \rho \ln \frac{\rho}{R} d\rho \right] \quad (13)$$

计算激光晶体内各点温度数值时, 可用 Mathematica 等计算软件进行计算。

2 激光晶体轴向热膨胀场半解析方法

当激光晶体内部形成稳定温度场后, 激光晶体的热膨胀会使得晶体发生热形变, 这种热形变会给谐振腔带来损耗。激光晶体轴向热形变是热形变的主要因素, 利用半解析方法得出激光晶体轴向热形变计算公式为(推导过程略):

$$l = -\frac{\alpha \eta}{\lambda} [1 - \exp(-L\beta)] (I_{01} + I_{02}) \times \left[\ln \frac{r}{R} \int_0^r \exp\left[-2 \frac{\rho^2}{w^2}\right] \rho d\rho + \int_r^R \exp\left[-2 \frac{\rho^2}{w^2}\right] \rho \ln \frac{\rho}{R} d\rho \right] \quad (14)$$

3 NdYVO_4 晶体的温度场及轴向热膨胀场分析

在众多适于激光二极管抽运的激光增益介质中, NdYVO_4 晶体因受激发射截面大、吸收系数高以及吸收带宽等特性优于其它的激光晶体材料, 被人们普遍使用^[11~13]。

对于双端高功率抽运的 NdYVO_4 晶体, 其掺杂 Nd^{3+} 离子数分数的范围约在 0.2% 到 0.5% 之间。 NdYVO_4 晶体采用 a 轴向切割, 实现 π 形偏振。通常选用的 NdYVO_4 晶体掺杂离子数分数为 0.5%, 对于抽运光的吸收系数为 14.8 cm^{-1} , 径向热传导系数为 $5.4 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}^{[14]}$ 。为了实现 NdYVO_4 晶体双端抽运, 晶体的两个端面镀有对 810nm 和 1064nm 的双色增透膜。利用所得出的半解析解(13)式对 NdYVO_4 晶体内部温度场进行分析。

(1) NdYVO_4 晶体内部温度场分布图。双端抽运的两抽运源输出功率相同, $P_1 = P_2 = 15 \text{ W}$ 时, 抽运光斑半径 $w = 400 \mu\text{m}$, NdYVO_4 晶体尺寸为 $\varnothing 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 计算出的 NdYVO_4 晶体内部温度场的三维立体图如图 2 所示, 激光晶体内部的等温线

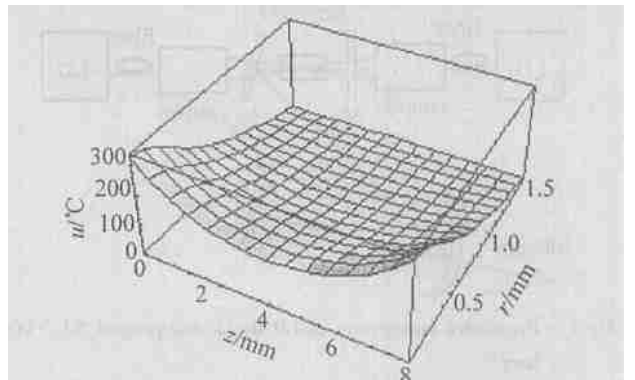


Fig. 2 Three-dimensional diagram of double-end-pumped NdYVO_4 crystal interior temperature field distribution

图如图 3 所示。

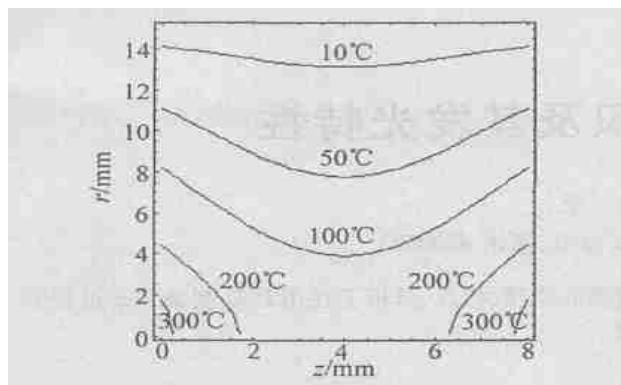


Fig. 3 Isotherm diagram of double-end-pumped NdVO₄ crystal interior temperature field distribution

(2) 抽运光斑半径的大小与激光晶体内振荡的基模光斑半径满足模匹配条件,而且模匹配问题对于发展高功率固体激光器具有重要的意义^[15]。双端抽运下,调节两抽运源输出功率相同 ($P_1 = P_2 = 15\text{W}$) 时,如果抽运光斑半径 w 分别为 $350\mu\text{m}$, $370\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$, $450\mu\text{m}$ 时,考察在激光晶体中截面 $z = L/2$ 处的温度分布,如图 4 所示。从图中可以看出:其它条件不变,如果抽运光斑半径变化时,远轴处激光晶体的温度基本不变,近轴处激光晶体的温度将随抽运光斑半径的减少而增加。

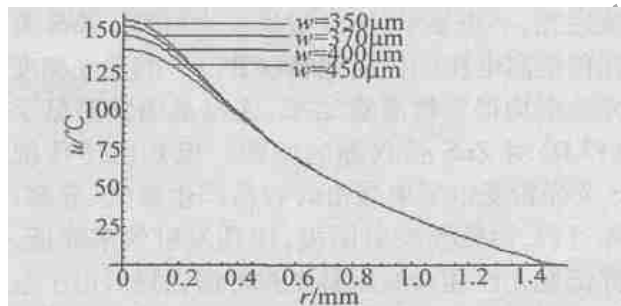


Fig. 4 NdVO₄ crystal interior temperature field distribution with different pump spot size

(3) 抽运源输出功率改变时对激光晶体内部温度场影响的分析。双端抽运方式下,抽运光斑半径为 $400\mu\text{m}$,调节抽运源工作电流的大小,保持两抽运源输出功率相同并同步增加,即 $P_1 = P_2$ 分别为 10W , 15W , 20W , 25W , 30W 时,考察在激光晶体内部 $z = L/2$ 横截面上温度分布,如图 5 所示。从图中

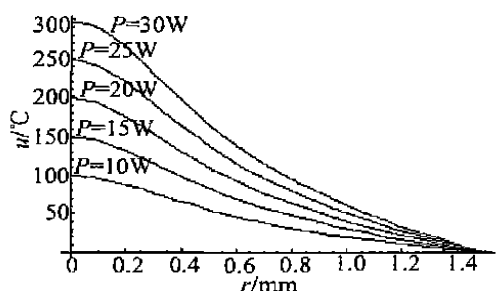


Fig. 5 NdVO₄ crystal interior temperature field distribution with different pump power

可以得出抽运光功率的改变对激光晶体近轴处温度影响较大,并且在近轴处激光晶体的温度随抽运光功率成比例变化。

(4) NdVO₄ 晶体的热形变分析。双端抽运时两抽运源输出功率相同 ($P_1 = P_2 = 15\text{W}$),抽运光斑半径为 $400\mu\text{m}$,NdVO₄ 晶体轴向热膨胀系数 $\alpha_c = 11.37 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 。由于两抽运源输出功率相同,激光晶体温度分布沿中心 z 方向两边对称,并且晶体两个端面轴向热形变量相同,一个端面轴向热形变量为(14)式计算量的一半。计算出 NdVO₄ 晶体一个端面轴向热形变量分布如图 6 所示。根据晶体端面形变后的形状,可以进一步研究光线传播方向,即热效应对激光束的影响。

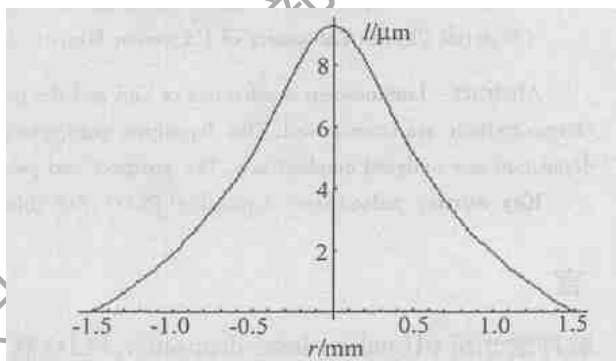


Fig. 6 NdVO₄ crystal one end face thermal deformation distribution diagram

4 结束语

对双端抽运激光晶体进行了分析,建立了符合实际工作条件的热模型和边界条件,利用半解析分析方法得出了晶体内部温度场的计算公式和热形变计算公式,以 NdVO₄ 晶体为例,分析了影响温度场分布各种因素及定量分析图。所得出的结论可以应用到其它激光晶体,对双端抽运激光系统的设计起到重要指导作用,为热形变的分析消除提供了基础。

参 考 文 献

- [1] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Q E, 1988, 24(6): 895~912.
- [2] AGNESI A, REALI G C, COBBI P G. 430mW single-transverse-mode diode-pumped NdVO₄ laser at 671nm [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(7): 1297~1300.
- [3] FIELDS R A, BIRNBAUM M, FICHER C L. High efficiency NdVO₄ diode-laser end-pumped laser [J]. A P L, 1987, 51(23): 1885~1886.
- [4] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. IEEE J Q E, 1991, 28(4): 1057~1069.

(下转第 629 页)

的温度分辨力以及 A/D 转换器件的分辨率等都是高于图 7 中给出的 0.1K 的。但依据系统的实际需要,在图 7 中,凡是计算得出 $\Delta T < 0.1\text{K}$ 的温度点处,均将取 $\Delta T = 0.1\text{K}$ 。

由图 7 可见,整个系统的测温灵敏度大大小于系统要求的测温误差(不大于 0.3%),因此能够满足需要,实验结果^[9,10]也已证实了这一结论。

3 结束语

研究了一种实用化实时测温系统的测温灵敏度。实验结果显示出:(1)在精确测温的低温段,其系统的测温灵敏度不低于 0.5K,当温度较高时,其系统的测温灵敏度不低于 0.1K;(2)系统的测温不确定度在 0.3% 以内。因此,满足实际需要和符合设计要求。

参 考 文 献

- [1] KHAN M A, ALLEMAND C, EAGAR T W. Noncontact temperature measurement I: interpolation based techniques [J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, 62(2): 392~402.
- [2] HAHN J W, RHEE C. Reference wavelength method for a two-color pyrometer [J]. *Appl Opt*, 1987, 26(24): 5276~5279.
- [3] HUNTER G B, ALLEHAND C D, EAGER T W. Multiwavelength pyrometer [J]. *Opt Engng*, 1985, 24(6): 1081~1085.
- [4] DEWITT D P. Inferring temperature from optical radiation measurements [J]. *Opt Engng*, 1986, 25(4): 596~601.
- [5] KRIVITZUM V, GRASS B, HERGENRODER R *et al.* Temperature measurement of liquids by differential absorption of two diode laser [J]. *Applied Spectroscopy*, 2001, 55(9): 1251~1258.
- [6] FAN C H, LONGTIN J P. Laser-based measurement of temperature or concentration change at liquid surface [J]. *Journal of Heat Transfer, Transactions ASME*, 2000, 122(4): 757~762.
- [7] KEE H H, LEES G P, NEWSON T P. Technique for measuring distributed temperature with 35cm spatial resolution utilizing the Landau-Placzek ratio [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(7): 873~875.
- [8] 胡瑞华, 栾松, 孙宁克. 可同时测量温度及发射率的辐射温度计 [J]. *红外技术*, 1998, 20(2): 21~22.
- [9] 施德恒, 黄国庆, 刘玉芳. 一种实用化实时测温系统的工作波长的优化设计 [J]. *中国激光*, 2003, 30(6): 545~550.
- [10] 施德恒, 黄国庆, 刘玉芳 *et al.* 一种实用化实时测温系统的优化设计 [J]. *光学学报*, 2003, 23(11): 1394~1401.
- [11] 施德恒, 黄国庆, 刘玉芳. 光源对测温系统测温精度及测温范围的影响 [J]. *光电子·激光*, 2003, 14(5): 529~533.
- [12] TAMURA Y, TATSUWAKI M, SUGIMURA T *et al.* Temperature measure of steel in the furnace [A]. *Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry [C]*. New York: American Institute of Physics, 1982. 505~512.
- [13] 王勇, 廖延标, 辛军 *et al.* 实用化双折射式光纤温度传感器系统最佳设计 [J]. *光学学报*, 1999, 19(1): 87~92.
- [14] COATES P B. Analytic estimation of systematic errors in photoelectric pyrometry [J]. *High Temperatures-High Pressures*, 1985, 17: 507~518.
- [15] Q E, 1988, 24(11): 2253~2264.
- [11] BROWN D C, NELSON R, BILLINGS L. Efficient CW end-pumped, end-cooled NdYVO₄ diode-pumped laser [J]. *A P L*, 1997, 36(33): 8611~8613.
- [12] SASAKI T, KOJIMA T, YOKOTANI A *et al.* Single longitudinal mode operation and second harmonic generation of NdYVO₄ microchip lasers [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(21): 1665~1667.
- [13] SHEN D, LIU A, SONG J *et al.* Efficient operation of an intracavity-doubled NdYVO₄/KTP laser end pumped by a high-brightness laser [J]. *Appl Opt*, 1998, 37: 7785~7788.
- [14] HE J L, HOU W, ZHANG H L *et al.* Continuous-wave output of 5.5W at 532nm by intracavity frequency doubling of an NdYVO₄ laser [J]. *Chin Phys Lett*, 1998, 15(6): 418~419.
- [15] 刘均海, 吕军华, 卢建仁 *et al.* 高功率端面抽运 NdYVO₄ 固体激光器模式匹配的研究 [J]. *光学学报*, 2000, 20(2): 186~189.

(上接第 619 页)

- [5] 刘均海. 高功率端面泵浦 NdYVO₄, NdGdVO₄ 激光器热效应及激光特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 1999. 3~4.
- [6] CHEN Y F, HUANG T M, KAO C F *et al.* Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effects [J]. *IEEE J Q E*, 1997, 33(8): 1424~1429.
- [7] BAI J T, CHEN G F. Continuous-wave diode-laser-end-pumped NdYVO₄/KTP high-power solid state green laser [J]. *Optic & Laser Technology*, 2002, 34: 333~336.
- [8] INNOCENZI M E, YURA H T, FRUCHER C L *et al.* Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers [J]. *A P L*, 1990, 56(19): 1831~1833.
- [9] 余锦. 纵向泵浦固体激光介质热透镜效应的理论研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(1): 27~31.
- [10] FARRUCH U O, BUOCRISTIANI A M, BYVIK C E. An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods [J]. *IEEE J*