

文章编号:1001-5078(2007)11-1168-03

LD 端面泵浦 Nd:YVO₄/KTP 连续绿光激光器热效应研究

李明真¹, 毕云峰², 于家峰¹, 杨海莲¹

(1. 德州学院物理系, 山东 德州 253023; 2. 山东大学威海分校信息工程学院, 山东 威海 264209)

摘 要:针对 Nd:YVO₄ 晶体热传导各向异性的特点,在泵浦光为高斯光束、泵浦尺寸小于通光面的情况下,求解晶体热传导方程,得到晶体中各点的精确温度,从而分析 LD 端面泵浦固体激光器的热效应。在理论分析的基础上,优化腔形,设计了 V 形折叠腔 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频连续绿光激光器,在泵浦功率为 15W 时,1064nm 和 532nm 激光输出功率分别为 7.42W 和 4W,光-光转换效率为 49.5%,26.7%。

关键词:激光晶体;热效应;Nd:YVO₄ 晶体;端面泵浦;各向异性

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

Study on Thermal Effect of Diode End-pumped Nd:YVO₄/KTP CW Green Laser

LI Ming-zhen¹, BI Yun-feng², YU Jia-feng¹, YANG Hai-lian¹

(1. Department of Physics, Dezhou College, Dezhou 253023, China; 2. School of Information Engineering, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: For the case of anisotropic laser crystal Nd:YVO₄, Gaussian beam pumping and the pump spot size was less than the end facet size of the crystal, the temperature distribution in the crystal was obtained and the thermal effect of laser diode end-pumped solid laser was analysed. Based on the result of thermal effect study, a V-cavity CW green laser by intracavity frequency doubling was designed. The output power of 7.42 W at 1064nm and 4W at 532nm were obtained at the pumping power of 15W. The optical-optical conversion efficiencies were up to 49.5%, 26.7%.

Key words: laser crystal; thermal effect; Nd:YVO₄ crystal; end-pumped; anisotropic

1 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器(DPSL)以体积小、效率高、结构紧凑、可靠性高等特点,在激光医学诊疗、激光测量、光学信息存储等方面得到了日益广泛的应用^[1-2]。Nd:YVO₄ 晶体以其优良的物理、化学及激光特性,被广泛地应用在各种激光产品中^[3-4]。Nd:YVO₄ 具有较高的吸收系数和受激发射截面,但热导率相对较低,热效应严重,影响激光器的稳定性以及激光输出功率。本文针对 Nd:YVO₄ 各向异性激光介质的实际情况,用 MATLAB 程序精确求解热传导方程,得到激光晶体内各点的温度及温度分布,从而定量研究热形变及热致双折射效应。

532nm 绿色激光处在人眼最敏感的光波长区域,广泛应用在激光准值、医疗、印刷、标记等方面^[5]。2000 年,何京良等人实现了单一晶体

Nd:YVO₄腔内倍频 8.8W 连续绿光输出,光-光转换效率达到 31.5%;2004 年,白杨等人用 Nd:YVO₄/LBO 做腔内倍频,得到了 9.9W 的连续绿光,光-光转换效率达到了 34.8%^[6-7]。实验在理论分析的基础上,结合谐振腔理论,设计出 LD 端面泵浦 V 形折叠腔 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频绿光激光器。1064nm 和 532nm 激光输出功率分别达到 7.42W 和 4W,对应光-光转换效率分别为 49.5%,26.7%。

2 Nd:YVO₄ 晶体热效应计算

2.1 晶体内部热传导方程

在连续泵浦情况下达到动态稳定时,激光晶体内部温度分布遵循各向异性热传导 Poisson 方程:

作者简介:李明真(1981-),女,教师,硕士,主要从事非线性光学和图像处理的研究。E-mail:limingzhen1981@163.com

收稿日期:2007-04-12; **修订日期:**2007-05-19

$$K_x \frac{\partial^2 u(x,y,z)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u(x,y,z)}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u(x,y,z)}{\partial z^2} + q_v(x,y,z) = 0 \quad (1)$$

式中, $u(x,y,z)$ 为激光晶体温度; $q_v(x,y,z)$ 为泵浦光产生的热源发热率; K_x, K_y, K_z 为晶体 x, y, z 方向上的导热系数。

在晶体侧面冷却、两端绝热的情况下, 忽略晶体纵向散热, 方程(1)可写为二维热传导方程:

$$K_x \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial y^2} + q_v(x,y,z) = 0 \quad (2)$$

式中, $q_v(x,y,z)$ 可表示为^[8]:

$$q_v(x,y,z) = \frac{2Q\alpha}{\pi w_p} (1 - e^{-\alpha l})^{-1} e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{w_p^2}} e^{-\alpha z} \quad (3)$$

其中, α 为晶体吸收系数; Q 为激光晶体吸收的泵浦光热量; w_p 为泵浦光斑束腰半径; l 为晶体长度。

假设:

$$u(x,y,z) = u(x,y)u(z) \quad (4)$$

带入方程(2)得到:

$$u(z) = e^{-\alpha z} \quad (5)$$

热传导方程(1)可简化为二维求解方程:

$$K_x \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u(x,y)}{\partial y^2} + q_v(x,y) = 0 \quad (6)$$

2.2 Nd:YVO₄ 晶体内部温度场分布

晶体模型和冷却装置简图如图1和图2所示。

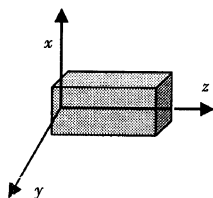


图1 晶体模型

Fig.1 the thermal model of laser crystal

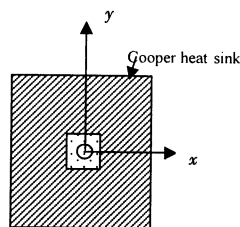


图2 冷却装置简图

Fig.2 schematic diagram of cooling setup

假设 25% 的泵浦光功率作为热沉积在晶体中, 实验中采用水冷温度控制在 16℃, 边界条件为:

$$u(0,y,z) = 289\text{K}; u(a,y,z) = 289\text{K} \quad (7)$$

$$u(x,0,z) = 289\text{K}; u(x,b,z) = 289\text{K} \quad (8)$$

晶体的两个端面滞绝热条件, 所以 z 向满足:

$$\left. \frac{\partial u(x,y,z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \left. \frac{\partial u(x,y,z)}{\partial z} \right|_{z=l} = 0 \quad (9)$$

式中, a 和 b 分别为晶体矩形截面的长和宽; l 为晶体长度。

取参数 $K_x = 0.0051/\text{mm}$, $K_y = 0.00523/\text{mm}$, $\alpha = 1.48\text{mm}$ (Nd^{3+} 掺杂浓度为 0.5 at. %), $w_p = 0.32\text{mm}$, 用 MATLAB 程序语言求解方程^[9](6), 得出 Nd:YVO₄ 晶体内部温度场分布。图3为泵浦功率为 18W 时, 晶体泵浦面上温度分布图, 由图可见晶体中心最高温度可达 619.6K, 比边界温度升高 330K 左右。图4为 Nd:YVO₄ 晶体 z 截面上的温度分布。

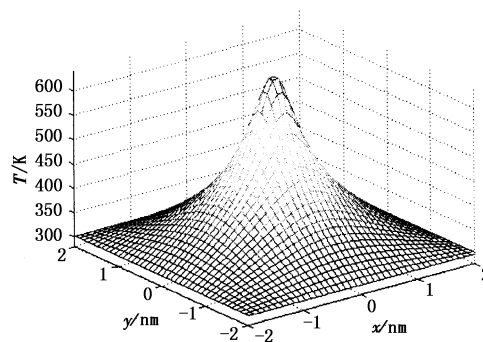


图3 Nd:YVO₄ 晶体泵浦端面温度分布图

Fig.3 temperature field distribution diagram of Nd:YVO₄

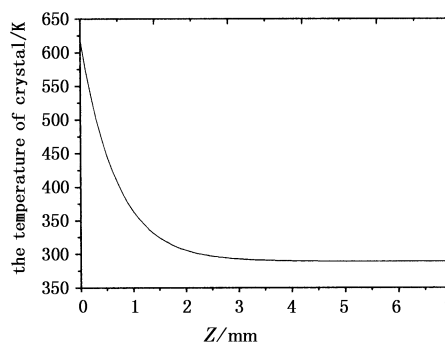


图4 Nd:YVO₄ 晶体 z 截面上的温度分布

Fig.4 the thermal distribution of a Nd:YVO₄ crystal z section

3 实验结果

利用谐振腔理论, 设计出 LD 端面泵浦 V 形折叠腔 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频绿光激光器, 实验装置如图5所示。

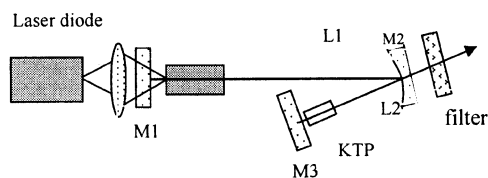


图5 实验装置图

Fig.5 schematic of the experimental

实验采用美国相干公司生产的 FAP - System TM 型光纤耦合输出半导体激光器作为泵浦源, 最大输出功率 30W, 光纤输出孔径 $D = 0.8\text{mm}$, 数值孔径 0.22, 调整 LD 温度, 使其与 Nd:YVO₄ 晶体的吸

收峰匹配。光纤输出的激光经聚焦耦合系统(Focus Lens)进行聚焦耦合,聚焦比例为1:0.8,聚焦后的光斑半径为320 μm 。Nd:YVO₄晶体为 α 轴切割,尺寸4mm $\times$ 4mm $\times$ 7mm,Nd³⁺离子掺杂浓度均为0.5at.%。KTP晶体采用II类非临界相位匹配,尺寸为3mm $\times$ 3mm $\times$ 10mm。Nd:YVO₄晶体和KTP晶体通光面均镀808nm和1064nm双色增透膜,晶体放入紫铜块内采用循环水冷却。M₁为平面输入镜,表面镀有HT@808nm和HR@1064nm介质膜,M₂为凹面折返镜兼绿光输出镜,镀有HT@532nm,HR@1064nm双介质膜;M₃为平面谐振腔端镜,表面镀有HR@532nm,HR@1064nm双高反介质膜。

实验使用LP-3C型激光功率计功率测量激光输出功率。在放入KTP晶体之前,用对1064nm透过率为10%的平面输出镜代替双反镜M₄,测量激光器1064nm基频输出特性,如图6中曲线(a)所示。放入KTP晶体,测得Nd:YVO₄KTP绿光激光器振荡阈值功率约为0.8W,在泵浦功率为15W时,得到最大绿光输出4W,光-光转换率为26.7%,如图6中曲线(b)所示。

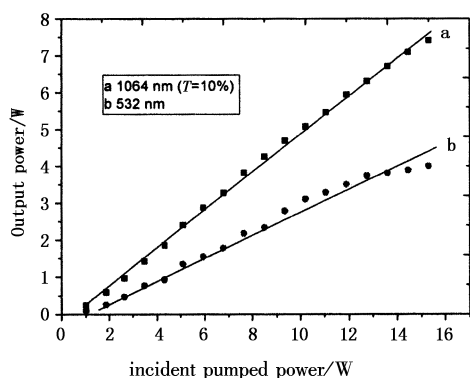


图6 激光器基频及倍频输入输出特性

Fig.6 average output power at 1064nm and 532nm as a function of incident pump power

实验还测量了在泵浦功率为10.2W时的绿光稳定性,每隔3min记录一个数据,如图7所示为1h之内所记录的激光输出功率。输出功率平均值为

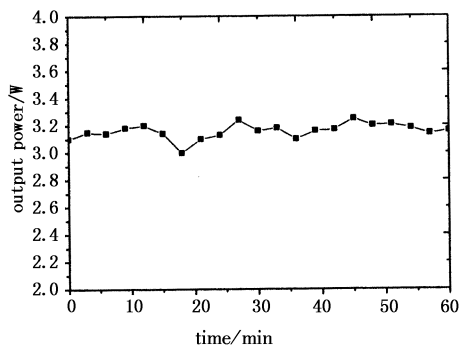


图7 泵浦功率为10.2W时1h功率稳定性

Fig.7 the stability testing at the pumped power level of 10.2W in an hour

$\bar{P}=3.14$,求方均根误差 $\Delta\bar{P}=[\sum_{i=1}^n(P_i-\bar{P})^2/n]^{1/2}=0.055$,由此可求出1h之内功率非稳定度为 $\Delta\bar{P}/\bar{P}=1.73\%$ 。由于“绿光噪声”等问题尚未解决,绿光的非稳定性很难优于1%。

4 结论

本文通过对LD端面泵浦Nd:YVO₄激光晶体特点的研究,提出了矩形截面各向异性激光晶体热模型,利用激光晶体周边恒温两端绝热的边界条件求解泊松热传导方程,得出了Nd:YVO₄激光晶体内部温度场分布。在理论分析的基础上,设计了V形折叠腔Nd:YVO₄/KTP腔内倍频连续绿光激光器,在泵浦功率为15W时,1064nm和532nm激光输出功率分别为7.42W和4W,光-光转换效率分别为49.5%和26.7%。文中温度分布方程虽然是以Nd:YVO₄为例求解但同样适用于其他晶体。

参考文献:

- [1] Jie Liu, Qianqian Peng, Jimin Yang, et al. Diode-pumped Nd:Y_xGd_{1-x}VO₄ crystal continuous-wave laser[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(1): 29-30.
- [2] 白晋涛, 张振杰, 武自录, 等. 用于飞秒紫外激光产生的LD泵浦高效Nd:YVO₄绿光激光器研究[J]. 光子学报, 2000, 29(11): 1053-1055.
- [3] Wang Changqing, Shen Deyuan, Shao Zongshu, et al. High efficient intracavity-doubled Nd:YVO₄/KTP laser pumped by a laser-diode[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(10): 1393-1394. (in Chinese)
- [4] Guo Mingxiu, Lu Yutian. Study on Nd:YVO₄/KTP all-solid-state frequency doubling laser[J]. Laser Tech., 2003, 27(3): 236-239. (in Chinese)
- [5] ZHAO Hongming, ZHAO Shengzhi, CHEN Lei, et al. Study of intra-cavity frequency-doubling of a Nd:YVO₄ laser passively Q-switched with GaAs[J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(1): 35-38. (in Chinese)
- [6] Bai Yang, Li Long, Chen Hao Wei, et al. Continuous-wave green laser of 9.9W by intracavity frequency doubling in laser-diode single-end-pumped Nd:YVO₄/LBO[J]. Chinese Physics Letters, 2004, 21(8): 1532-1534.
- [7] He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli. 8.8W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd:YVO₄ laser[J]. Chinese J. Lasers, 2000, 27(6): 481-484. (in Chinese)
- [8] Ananada K Cousins. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1992, QE-28(4): 1057-1069.
- [9] John H Mathews, Kurtis D Fink. Numerical methods using MATLAB[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 514-553.