

文章编号: 1001-3806(2010)03-0323-03

端面抽运 Nd: YVO₄, Nd: GdVO₄ 及 Nd: GdYVO₄ 晶体的热效应比较

张 玉, 黄春霞, 王明建, 戴 巍, 李德川, 滑文强, 李 健*
(山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

摘要: 为了改善激光晶体热效应, 建立了矩形截面激光晶体热模型, 通过求解热传导泊松方程, 比较了矩形截面 Nd: YVO₄ 和 Nd: GdVO₄ 及 Nd: GdYVO₄ 晶体的温度场分布和抽运端面的热形变, 计算了由抽运端面热形变引起的光程差和总的光程差。由比较结果可知, 在相同情况下, Nd: YVO₄, Nd: GdYVO₄ 及 Nd: GdVO₄ 晶体的端面中心最高温升分别约为 320℃, 342℃ 和 190℃, 总光程差最大为 1.7 μm, 2.11 μm 和 1.3 μm。结果表明, Nd: GdYVO₄ 晶体端面中心最高温升及总光程差均为最小, 更适用于大功率 LD 端面抽运; 对于大功率全固态激光器, 由端面热形变引起的光程差对晶体热焦距有较大影响。

关键词: 激光器; 端面热形变; 泊松方程; Nd: GdVO₄; 光程差; 热焦距

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.011

Thermal effect of end-pumped Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄/Nd: GdYVO₄ crystals

ZHANG Yu, HUANG Chun-xia, WANG Ming-jian, DAI Wei, LI De-chuan, HUA Wen-qiang, LI Jian
(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: To improve the thermal effect of laser crystal, the rectangle thermal conduct model of laser crystal was established. The temperature distribution and end-thermal deformation of rectangle Nd: YVO₄/Nd: GdVO₄/Nd: GdYVO₄ laser crystals were obtained after solving Possion equation, and the optical path difference (OPD) induced by end-thermal deformation and the total OPD were calculated. After comparison, it was shown that in the same condation, the highest central temperatures of the pumped face of Nd: YVO₄, Nd: GdYVO₄ and Nd: GdVO₄ crystals were 320℃, 342℃ and 190℃, the biggest total OPD were 1.7 μm, 2.11 μm and 1.3 μm respectively. The results show that the central temperature rise and the total OPD of Nd: GdYVO₄ crystal are the smallest and it is fitter for the pumped face of LD with high power. The study shows that the OPD induced by end-thermal deformation have a large influence on thermal focal length of laser crystals for solid-state lasers with high power.

Key words: lasers; end-thermal deformation; Possion equation; Nd: GdVO₄; optical path difference (OPD); thermal focal length

引 言

激光二极管 LD 抽运全固态激光器中, 激光晶体由于吸收能量转换时产生的热能。在晶体内部形成非均匀温度梯度场分布, 引起晶体热形变, 即激光晶体的热效应^[1]。随着 LD 抽运全固态激光器的发展和广泛应用, 热效应在很大程度上影响激光器的性能^[2], 已成为阻碍全固态激光器获得更高指标的关键因素之一, 研究并改善激光晶体热效应已经成为一个重要课题。

目前, 实际使用于全固态激光器 (diode pump sol-

id-state laser, DPSSL) 的各类激光晶体中, Nd: YVO₄ 晶体具有大的吸收系数和受激发射截面以及 Nd: GdVO₄ 晶体具有较高的热传导率^[3,4]而被广泛应用^[5,6], 沿着晶体〈110〉方向, Nd: GdVO₄ 晶体有着较高的热导率 (0.117 W · cm⁻¹ · K⁻¹)^[7,9]。晶体的基础上, 由 Y (Gd) 部分代替 Nd: GdVO₄ (Nd: YVO₄) 中的 Gd (Y) 形成的钽酸盐晶体 Nd: GdYVO₄, 具有和 Nd: YVO₄, Nd: GdVO₄ 相同的晶体结构, 由于融合了两种晶体的特点, 具有自身的优势^[10], 得到了广泛关注。作者通过求解热传导泊松方程, 对 LD 端面抽运周边恒温冷却的矩形截面 Nd: YVO₄, Nd: GdYVO₄ 和 Nd: GdVO₄ 晶体进行了研究, 比较了 3 种晶体的端面温度分布, 端面热形变引起的光程差以及晶体总的光程差。最后, 通过数值理论分析可知传统设计谐振腔求热焦距的方法没有考

作者简介: 张 玉 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器件研究。

* 通讯联系人。E-mail: lijian@sdu.edu.cn

收稿日期: 2009-03-23; 收到修改稿日期: 2009-05-07

考虑端面热形变对热焦距的影响,而实际的热焦距应用此法求得的热焦距要小,并通过对 Nd:YVO₄ 晶体的热焦距实际测量验证了数值理论分析的正确性,这对设计谐振腔时具有重要意义。

1 LD 端面抽运,周边恒温矩形截面晶体的热模型

矩形截面晶体用铜箔包裹在紫铜块内,通过循环水冷却方式保持晶体周边恒温,热模型如图 1 所示。

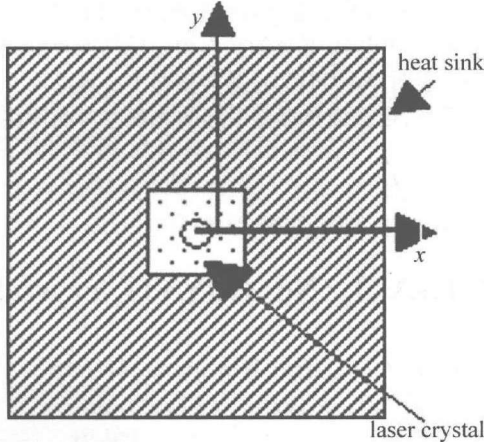


Fig. 1 Thermal model schematic diagram of laser crystal

由于紫铜的热传导系数远远大于激光晶体的热导率,所以侧面温度保持相对稳定,设温度为 20℃。另外,晶体两个端面与空气热交换流出的热量远远小于从晶体侧面流出的热量,可以假设晶体的两个端面绝热,由此可得热模型边界条件:

$$T(a, y, z) = 20^\circ\text{C}; T(-a, y, z) = 20^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$T(x, b, z) = 20^\circ\text{C}; T(x, -b, z) = 20^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0^\circ\text{C}; \left. \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=l} = 0^\circ\text{C} \quad (3)$$

式中, $2a, 2b$ 为晶体矩形截面的长和宽, l 为激光晶体的长度。

由于激光晶体内部有热源,则晶体内部热传导遵循泊松方程^[11-12]:

$$\kappa_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \kappa_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \kappa_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + q(x, y, z) = 0 \quad (4)$$

$$q(x, y, z) = \frac{2Q\alpha}{\pi w_p^2} (1 - e^{-\alpha l}) e^{-2(x^2+y^2)/w_p^2} e^{-\alpha z} \quad (5)$$

式中, α 为晶体的吸收系数, $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z$ 为晶体各个方向上的热导率, $Q = \eta P_p$ 为激光晶体中的总热耗, η 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数(计算中取 $\eta = 20\%$), P_p 为抽运功率, w_p 为抽运高斯光斑半径。

2 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdYVO₄ 晶体的温度场分析

计算中取抽运高斯光斑半径 $w_p = 320\mu\text{m}$, 晶体的

尺寸均为 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 7\text{mm}$, Nd^{3+} 的原子数分数为 0.005, 当抽运功率 $P_p = 13\text{W}$ 时, 激光晶体的抽运光端面温度场分布如图 2 所示。

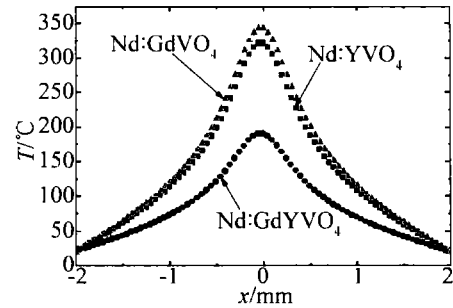


Fig. 2 Comparison of end-face temperature of crystal of Nd:YVO₄, Nd:GdYVO₄ and Nd:GdVO₄

从图 2 可以看出, Nd:YVO₄, Nd:GdYVO₄ 及 Nd:GdVO₄ 晶体的端面中心最高温升分别约为 320℃, 342℃ 和 190℃, Nd:GdYVO₄ 的热性能明显地优于 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄。

3 晶体抽运端面热形变和光程差分析

当晶体内部形成稳定温度场后,由于激光晶体受热膨胀会使得晶体发生热形变,这种热形变会严重影响激光器的性能。激光晶体 z 向的端面热形变引起的光程差:

$$l = \int_0^l dl = \sigma \int_0^l u(x, y, z) dz \quad (6)$$

式中, σ 为激光晶体 z 向热膨胀系数。

抽运光通过激光晶体产生的总光程差(optics path difference, OPD)的表达式为^[13]:

$$L_{\text{OPD}}(x, y, z) = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y, z) dz + (n_0 - 1) \times \sigma \int_0^l \Delta T(x, y, z) dz + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_{i,j}} \varepsilon_{i,j}(x, y, z) dz \quad (7)$$

式中, n 和 n_0 分别是激光晶体在温度 $T(x, y, z)$ 和初始温度(20℃)时的折射率, $\Delta T(x, y, z)$ 是激光晶体相对于初始状态的温度改变量, $\varepsilon_{i,j}$ 是晶体的热应力张量。(7)式中第 1 项是由折射率变化引起的光程差,第 2 项是由于晶体端面形变产生的光程差,第 3 项则是应力双折射的影响,对于钒酸盐晶体,最后一项对光程差的影响很小,可以忽略。

图 3、图 4 是当抽运功率 $P_p = 13\text{W}$ 时得到的激光晶体光程差,从图 3、图 4 中可以看出, Nd:YVO₄ 和 Nd:GdYVO₄ 及 Nd:GdVO₄ 晶体由端面形变引起的最大光程差分别为 $0.997\mu\text{m}$, $0.932\mu\text{m}$ 和 $0.829\mu\text{m}$, 总光程差最大为 $1.7\mu\text{m}$, $2.11\mu\text{m}$ 和 $1.3\mu\text{m}$ 。可见,对于 Nd:YVO₄, Nd:GdYVO₄ 及 Nd:GdVO₄ 晶体,由端面形

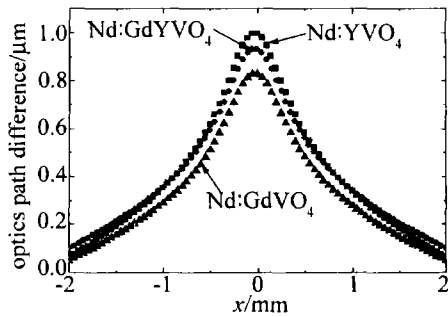


Fig. 3 The OPD of end-face deformation

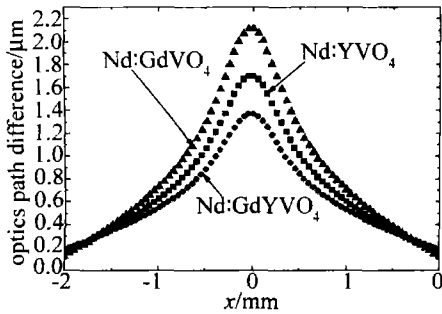


Fig. 4 The total OPD

变引起的光程差在总的光程差中占了比较大的比重,因此,对热焦距的影响不能被忽略。从以上数值理论分析可以看出,实际的热焦距应比在不考虑端面形变求得的热焦距要小,通过实验对 Nd: YVO₄ 晶体的热焦距进行了测量,图 5 为测量值和理论拟合得到的比较图。

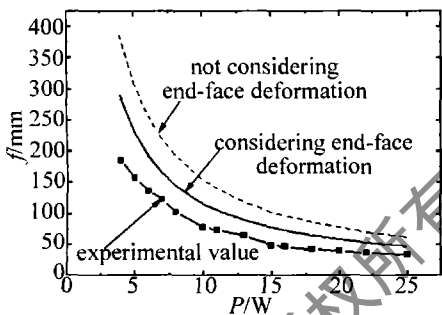


Fig. 5 Thermal focal length compared with the experimental value considering end-face deformation

从图 5 可以看出,实验结果与作者的数值理论分析相吻合,所以,在设计谐振腔求热焦距时,还应考虑到抽运端面热形变引起的光程差对热焦距的影响。

4 结 论

通过建立矩形截面晶体的热模型和求解热传导泊松方程,对 LD 端面抽运周边恒温冷却的矩形截面 Nd: YVO₄ 和 Nd: GdYVO₄ 及 Nd: GdVO₄ 晶体进行了研究,理论计算了 3 种晶体的温度场分布和抽运端面热形变以及由端面热形变引起的光程差和总光程差。当

抽运功率 $P_p = 13\text{W}$ 时, Nd: YVO₄, Nd: GdYVO₄ 及 Nd: GdVO₄ 晶体由端面形变引起的最大光程差分别为 $0.997\mu\text{m}$, $0.932\mu\text{m}$ 和 $0.829\mu\text{m}$, 总光程差最大为 $1.7\mu\text{m}$, $2.11\mu\text{m}$ 和 $1.3\mu\text{m}$, Nd: GdYVO₄ 晶体的总光程差最小,发现由端面形变引起的光程差在总的光程差中占了比较大的比重,这对晶体的热焦距有很大影响。通过对 Nd: YVO₄ 晶体的热焦距进行实验测量,对实验数据进行拟合发现,由端面形变引起的光程差对晶体热焦距有较大影响,所以,这对设计谐振腔时有重要指导作用,对改善激光器的性能有重要意义。

参 考 文 献

- [1] FRAUCHIGER J, AALBERS P, WEBER H P. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped solid state laser[J]. IEEE J Q E, 1992, 26(4): 1046-1056.
- [2] LI F, LIU R, BAI J T, et al. Investigation on temperature and thermal lens effects of laser diode pumped composite YAG rods[J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 101-105 (in Chinese).
- [3] LIU J, PENG Q Q, YANG J M, et al. Diode-pumped Nd: Y₂Gd_{1-x}VO₄ crystal continuous-wave laser[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(1): 29-30.
- [4] YOICHI S, TAKUNORI T. The studies of thermal conductivity in GdVO₄, YVO₄, and Y₃Al₅O₁₂ measured by quasi-one dimensional flash method[J]. Optics Express, 2006, 14(22): 10528-10536.
- [5] ZHAO H M, ZHAO Sh Zh, YANG K J, et al. Q-switched intracavity doubling Nd: YVO₄/KTP laser with acousto-optic[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(11): 1294-1297 (in Chinese).
- [6] ZHAO Zh M, LI L, TIAN F, et al. High power end-pumped intracavity frequency doubling Watt-level green laser[J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 331-333 (in Chinese).
- [7] QIN L J, MENG X L, DU Ch L, et al. Thermal and laser properties of Nd: GdVO₄ crystal[J]. Journal of Synthetic Crystal, 2003, 32(5): 502-507 (in Chinese).
- [8] WANG C Q, CHOW Y T, REEKIE L, et al. A comparative study of the laser performance of diode-laser-pumped Nd: GdVO₄ and Nd: YVO₄ crystals[J]. Appl Phys, 2000, B70(6): 769-772.
- [9] SHEN D Y, YANG H R, LIU J G, et al. Efficient and compact intracavity-frequency-doubled Nd: GdVO₄/KTP laser end-pump-ed by a fiber-coupled laser diode[J]. Appl Phys, 2001, B72(3): 263-266.
- [10] ZHUO Zh, JIANG Q Ch, SU Y L, et al. Study for Cr⁴⁺: YAG passively Q-switched mode-locking properties of a new mixed vanadate crystal Nd: Gd_{0.42}Y_{0.58}VO₄[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1429-1432 (in Chinese).
- [11] SHI P, LI L, LIU X F, et al. Influence of eccentricity on thermal effect of Nd: GdVO₄ crystal with rectangle-section[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(10): 1187-1192 (in Chinese).
- [12] LI T, ZHUO Zh, LI X M, et al. Study on optical characteristics of Nd: YVO₄: YVO₄ composite crystal laser[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(3): 175-177.
- [13] PFISTERER C, WEBER R, WEBER H P, et al. Thermal beam distortions in end-pumped Nd: YAG, Nd: GSGG, and Nd: YLF rods[J]. IEEE J Q E, 1994, QE30(7): 1605-1615.