

文章编号: 0258-7025(2008)03-0333-05

激光二极管端面抽运激光晶体的热效应

张帅一 黄春霞 于果蕾 刘辉兰 孙尧 李健

(山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014)

摘要 建立了激光晶体的热传导模型,通过求解泊松方程,得到激光晶体内温度和温度场分布,计算了由端面形变引起的光程差(OPD)和总的光程差,得到不同抽运功率下的热焦距,并通过实验进行了验证,实验结果与理论计算基本一致。当抽运功率为10 W,抽运光斑半径320 μm 时,Nd:YVO₄激光晶体端面形变引起的光程差占总的光程差的45%。抽运功率为24 W时,晶体热焦距为65.8 mm。提出激光晶体端面腔镜会加重激光晶体热透镜效应的结论。研究表明,对于大功率全固态激光器,由晶体端面形变引起的光程差对晶体热透镜效应有较大影响。对提高激光器的稳定性、研究晶体的热效应提供了理论依据。

关键词 激光技术;固体激光器;泊松方程;端面形变;光程差;热焦距

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Thermal Effect of Laser Crystal by Laser Diode End-Pumped

Zhang Shuaiyi Huang Chunxia Yu Guolei Liu Huilan Sun Yao Li Jian

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract The thermal conduct model of laser crystal was established. Using Poisson equation, the temperature and temperature distribution in laser crystal were obtained, and the optics path difference (OPD) induced by end-face deformation and total OPD were calculated. Based on the former calculation, the focal length of laser crystal with different pumping powers was obtained. The experimental result agrees with the calculated result very well. When the pumping power is 10 W and the radius of pumping beam is 320 μm , the OPD induced by end-face deformation is 45% of the total OPD for Nd:YVO₄ crystal. When the pumping power is 24 W, the focal length of crystal is 65.8 mm. The end-pumped resonators with one highly reflective coating directly on the laser crystal can aggravate its thermal effect. The study shows that, for the solid-state laser with high power, the OPD induced by end-face deformation has a large influence on thermal effect of laser crystal. This study provides a theoretical direction for improving the stability of laser and studying the thermal effect of laser crystal.

Key words laser technique; solid-state laser; Poisson equation; end-face deformation; optics path difference; thermal focal length

1 引言

激光二极管(LD)抽运全固态激光器具有效率高、结构紧凑、寿命长、稳定性好等优点,近年来成为人们研究的热点^[1~4]。激光晶体是全固态激光器中最重要的核心部分,在很大程度上决定了激光器的输出特性。激光晶体吸收激光二极管抽运光能量产生荧光辐射的同时,部分抽运光能量转变为晶体的热能,在晶体内部形成非均匀温度梯度场分布,引起

晶体热形变,即热透镜效应^[5]。激光晶体热效应产生的原因主要有三方面:激光晶体折射率的变化、晶体的端面形变以及双折射应力。由于折射率的变化是产生热焦距的主要原因,在建立理论模型时往往只考虑折射率变化引起的热焦距^[6]。随着大功率全固态激光器的产生,导热性能差的端面抽运激光晶体,由于入射端面温度较高,入射端面形变较大,入射端面形变对晶体热焦距的影响相应增加。

收稿日期:2007-07-16; 收到修改稿日期:2007-11-13

作者简介:张帅一(1982—),男,山东人,硕士研究生,主要从事全固态激光器件和非线性光学等方面的研究。

E-mail:shuaiyi163@163.com

导师简介:李健(1963—),男,山东人,教授,硕士生导师,主要从事全固态激光器件和非线性光学等方面的研究。

E-mail:lijian@sdu.edu.cn (通信作者)

目前有关热效应的文献大多只是给出晶体内的温度分布^[3,7],本文以 Nd:YVO₄ 激光晶体为例,利用差分迭代法求解热传导方程,得到了晶体内部温度分布、端面形变引起的光程差以及总的光程差,并根据球面透镜热焦距与光程差的关系,近似得到了热焦距的表达式,求得了 Nd:YVO₄ 激光晶体不同抽运功率下的热透镜焦距。

2 热模型的建立

矩形截面 Nd:YVO₄ 晶体被包裹在紫铜块内,通过循环水冷却的方式保持晶体周围恒温。由于激光二极管端面抽运全固态激光器的激光晶体对抽运光强烈吸收,考虑到抽运光功率密度的充分利用、激光表面膜系抗损伤阈值以及抽运光与激光的模式匹配,抽运光的光腰一般在激光晶体的表面内侧,此时端面处抽运光半径与光腰差别很小,可以认为与光腰相等,所以计算时取抽运光光腰位置在晶体表面上^[7,8]。当抽运光入射到晶体端面的几何中心时,可以建立如图 1 所示的热模型。

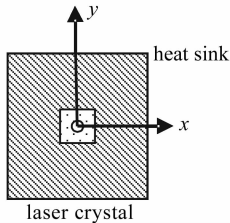


图 1 Nd:YVO₄ 晶体热模型示意图

Fig.1 Thermal model schematic diagram of Nd:YVO₄ crystal

由于激光晶体内部有热源,则其内部遵循热传导泊松(Poisson)方程^[7,9]

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

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

式中 α 为晶体的吸收系数, K_x, K_y, K_z 为晶体各个方向上的热传导系数, $Q = \eta P_{in}$ 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, P_{in} 为输入功率, w_p 为光斑半径, l 为晶体长度。

如图 1 所示,激光晶体在紫铜块中并用循环水冷却,其侧面温度保持相对稳定,假设其温度为 20 °C,即绝对温度 293 K。虽然晶体两个端面与空气接触,但由于其两个端面与空气交换的热量远远小于由于循环水从侧面流出的热量,所以可以假设晶体的两个端面绝热,由此可得热模型边界条件

$$T(a, y, z) = 20 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T(-a, y, z) = 20 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

$$T(x, b, z) = 20 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T(x, -b, z) = 20 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

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

$$\left. \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=l} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5)$$

其中矩形晶体的长为 $2a$, 宽为 $2b$ 。

3 晶体端面温度场与中心轴温度

计算中取抽运光高斯半径 $w_p = 320 \text{ } \mu\text{m}$, Nd:YVO₄ 晶体的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%, $K_x = 5.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $K_y = 5.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $K_z = 5.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\alpha = 14.8 \text{ cm}^{-1}$ ^[10], $\eta = 20\%$, 通过差分法数值求解热传导方程,当抽运功率为 10 W 时,激光晶体的抽运光入射端面温度场以及晶体内部中心轴上的温度分布如图 2 和图 3 所示。

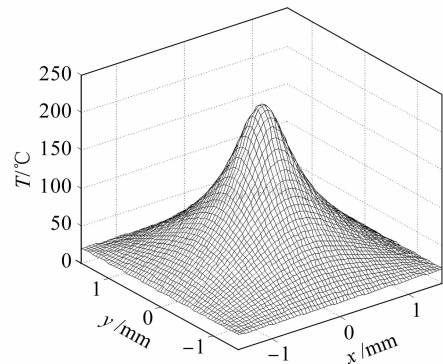


图 2 Nd:YVO₄ 晶体端面温度分布

Fig.2 Thermal distribution of Nd:YVO₄ crystal section

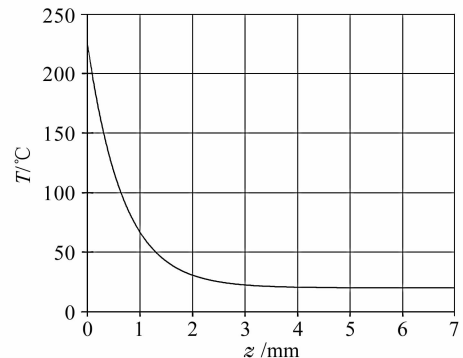


图 3 Nd:YVO₄ 晶体中心轴温度分布

Fig.3 Thermal distribution of Nd:YVO₄ central axis

由图 2,3 可以看出,激光晶体入射端面最高温度约为 226 °C,晶体中心轴温度沿着抽运光入射方向逐渐降低。

4 光程差与热焦距的计算

抽运光通过激光晶体产生的光程差(OPD)的表达式为^[11]

$$\begin{aligned}
 \text{OPD}(x,y,z) = & \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x,y,z) dz + \\
 & (n_0 - 1) \sigma \int_0^c \Delta T(x,y,z) dz + \\
 & \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{i,j}(x,y,z) dz, \tag{6}
 \end{aligned}$$

式中 n 和 n_0 分别为激光晶体在温度 T 和初始温度 ($20\text{ }^\circ\text{C}$) 时的折射率, σ 为激光晶体的热膨胀系数, $\Delta T(x,y,z)$ 为激光晶体相对于初始状态的温度改变量, $\epsilon_{i,j}$ 为晶体的热应力张量。(6)式第一项是由折射率变化引起的光程差, 第二项是由于晶体端面形变产生的光程差, 第三项则是应力双折射的影响, 对于 Nd:YVO₄ 晶体最后一项对光程差的影响很小, 可以忽略。图 4 与图 5 分别给出了抽运功率为 10 W 时由端面形变引起的光程差和激光晶体总的光程差。

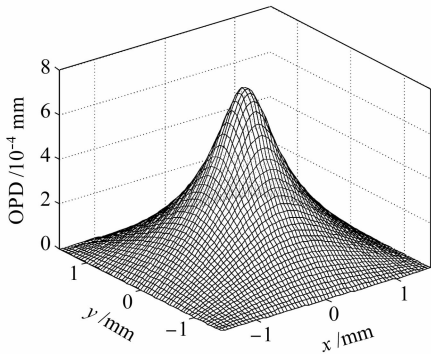


图 4 由端面形变引起的光程差
Fig. 4 OPD of end-face deformation

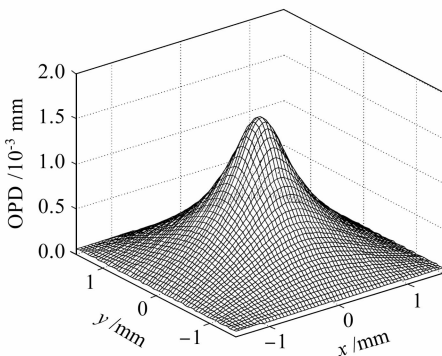


图 5 总的光程差
Fig. 5 Total OPD

由图 4,5 可以看出, 由端面形变引起的最大光程差为 $0.72\text{ }\mu\text{m}$, 总的光程差最大为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$, 由端面

形变引起的光程差约占总的光程差的 45%。可见, 对于 Nd:YVO₄ 晶体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, 其对热焦距的影响不能被忽略。

当抽运光通过激光晶体时, 通过不同位置产生不同的光程差, 在抽运光范围内可以近似通过一个焦距为 f 的球面透镜, 由球面透镜焦距和光程差的关系, 可得到

$$f(x,y) = (x^2 + y^2) / 2[\text{OPD}_0 - \text{OPD}(x,y)], \tag{7}$$

其中, x,y 为相对于抽运光中心的坐标, OPD_0 为抽运中心处的光程差。由(1)~(7)式可以得到激光晶体在不同功率下的热焦距。

5 实验测量

Nd:YVO₄ 晶体热焦距测量实验装置如图 6 所示。其中, 激光二极管为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, 发射中心波长为 808 nm, 最大输出功率 30 W, 光纤输出孔径 $D = 0.8\text{ mm}$, 数值孔径 0.22; 光纤输出的激光经聚焦耦合系统进行聚焦耦合, 聚焦比例为 1:0.8, 聚焦后的光斑半径为 $320\text{ }\mu\text{m}$, 实验采用的 Nd:YVO₄ 晶体为 a 切割, 尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 7\text{ mm}$, Nd³⁺ 离子掺杂原子数分数均为 0.5%, 晶体两面镀 808 nm 和 1064 nm 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, 表面镀有对 808 nm 增透和 1064 nm 高反的介质膜, M₂ 为平面输出镜, 表面镀有对 1064 nm 透射率 $T = 10\%$ 的介质膜; Power-meter 为测量激光输出功率的 LP-3B 型激光功率计。

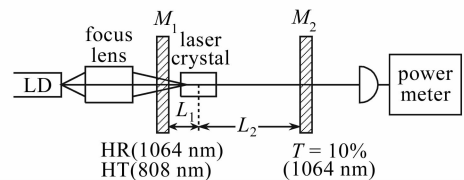


图 6 测量热焦距的实验装置图
Fig. 6 Setup of testing thermal focal length of laser crystal

设平面镜 M₁ 与 M₂ 到晶体中心的距离分别为 L_1, L_2 , 晶体的热焦距为 f , 由 ABCD 矩阵可得谐振腔的稳定性条件

$$0 < \left(1 - \frac{L_1}{f}\right) \left(1 - \frac{L_2}{f}\right) < 1. \tag{8}$$

由(8)式可知, 当 L_1 很小时, $0 < 1 - \frac{L_2}{f} < 1$, 所以

(8) 式只需满足 $0 < 1 - \frac{L_2}{f} < 1$, 由此不难看出: 当 $L_2 > f$ 时, 谐振腔为非稳腔; 当 $L_2 < f$ 时, 谐振腔为稳定腔, 当 $L_2 = f$ 时, 谐振腔近似为介稳腔。实验中固定 L_2 值, 逐渐改变抽运功率, 当激光功率变为 0 时, L_2 值便为该抽运功率下的热焦距^[12-13]。

图 7 给出了实验测量值与计算值的比较, 测量值与计算值基本吻合。但由于抽运功率较高时, 晶体热应力影响增加, 而在计算中忽略热应力的影响, 所以当抽运功率较高时, 测量值比理论值偏小。

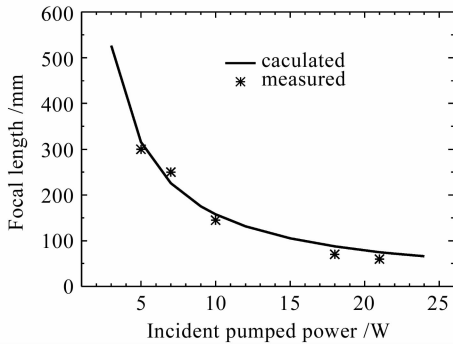


图 7 不同抽运功率下热焦距的测量值与计算值
Fig. 7 Measured and calculated thermal focal length versus pumping power

6 晶体端面腔镜对晶体热透镜效应的影响

当抽运光经过端面带腔镜(高反镜)的激光晶体与不带腔镜的激光晶体时, 其主要区别在于经过端面带腔镜的激光晶体时不需要考虑晶体端面周围空气对光程差的影响, 而经过不带腔镜的激光晶体时需要考虑晶体端面周围空气对光程差的影响, 所以其光程差的表达式分别为^[11]

$$\text{OPD}(x, y) = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y, z) dz + n_0 \sigma \int_0^c \Delta T(x, y, z) dz + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{i,j}(x, y, z) dz, \quad (9)$$

$$\text{OPD}(x, y, z) = \int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y, z) dz + (n_0 - 1) \sigma \int_0^c \Delta T(x, y, z) dz + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{i,j}(x, y, z) dz. \quad (10)$$

以 Nd:YVO₄ 激光晶体为例, 利用差分迭代的

方法分别求解了当 $P = 15 \text{ W}$, $\omega_p = 320 \mu\text{m}$, $\eta = 20\%$ 时, 端面带腔镜和 不带腔镜的 Nd:YVO₄ 晶体 ($4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$) 光程差二维分布如图 8 所示。

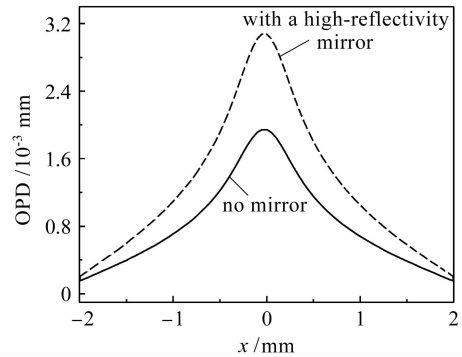


图 8 Nd:YVO₄ 晶体光程差分布图

Fig. 8 Distribution of the OPD of Nd:YVO₄

由图 8 可知, 端面带腔镜的 Nd:YVO₄ 晶体产生的光程差要大于端面不带腔镜的 Nd:YVO₄ 晶体产生的光程差, 其最大值分别为 $3.1 \mu\text{m}$, $1.9 \mu\text{m}$, 而且端面带腔镜的 Nd:YVO₄ 晶体产生的光程差变化趋势要比端面不带腔镜的 Nd:YVO₄ 晶体变化趋势大。由(7)式不难推导出, 端面带腔镜的 Nd:YVO₄ 晶体产生热焦距比端面不带腔镜的 Nd:YVO₄ 晶体小, 可见端面腔镜会加重激光晶体热透镜效应。

7 结 论

通过理论计算的方法研究了激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应。利用差分迭代法求出了晶体内部温度场分布以及由端面形变和折射率变化产生的光程差, 进而计算出 Nd:YVO₄ 晶体在不同抽运功率下的热透镜焦距。当抽运功率为 24 W 时, Nd:YVO₄ 晶体热焦距为 65.8 mm。通过理论计算, 发现对于导热性能差的 Nd:YVO₄ 晶体由端面形变引起的光程差在总的光程差中占有比较大的比重, 端面形变对于 Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应影响很大, 不可以被忽略。计算得到: 当抽运功率为 10 W 时, 由端面形变引起的光程差占总光程差的 45%, 并通过实验对 Nd:YVO₄ 晶体热焦距进行了测量, 实验值与计算值基本吻合, 并通过理论计算得到激光晶体端面腔镜会加重激光晶体热透镜效应的结论。这对于改善导热性能差的激光二极管端面抽运激光晶体的热透镜效应, 提高激光器的稳定性具有重要意义。

参 考 文 献

- Jie Liu, Qianqian Peng, Jimin Yang *et al.*. Diode-pumped Nd:Y_xGd_{1-x}VO₄ crystal continuous-wave laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1):29~30
- Y. F. Chen. Passive Q-switching of an intracavity frequency doubled diode-pumped Nd:YVO₄/KTP green laser with Cr³⁺:YAG [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(11):1481~1483
- Zheng Yi, Gao Mingyi, Yao Jianquan. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(10):1094~1098
郑义, 高明义, 姚建铨. LD 端面泵浦各向异性激光介质的热效应研究[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(10):1094~1098
- Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effect in partially laser-diode-pumped slab lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):854~858
程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6):854~858
- J. Frauchiger, Peter Albers, Heinz P. Weber. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped solid state laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1046~1056
- 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
- Shi Peng, Li Long, Liu Xiaofang *et al.*. Influence of eccentricity on thermal effect of Nd:GdVO₄ crystal with rectangle-section [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(10):1187~1192
史彭, 李隆, 刘小芳等. 偏心度对矩形截面 Nd:GdVO₄ 晶体热效应的影响[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(10):1187~1192
- Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng *et al.*. Thermal effect research of end-pumped rectangle Nd:GdVO₄ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):923~928
史彭, 李隆, 甘安生等. 端面抽运矩形截面 Nd:GdVO₄ 晶体热效应研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):923~928
- Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):175~177
- Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):359~363
孙尧, 李涛, 于果蕾等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO₄ 晶体热效应分析及倍频研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):359~363
- C. Pfister, R. Weber, H. P. Weber *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
- Liu Juhai, Lu Jianren, Lü Junhua *et al.*. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers by a simple direct approach [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(3):181~183
- Zhang Biao, Hou Xueyuan, Li Yufei *et al.*. Thermal focal length and fundamental mode operation of a LD end-pumped Nd:GdYVO₄ [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(9):920~922
张彪, 侯学元, 李宇飞等. 端面泵浦 Nd:GdYVO₄ 的热焦距及基频运转[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(9):920~922