

端泵 Nd:YVO₄ 晶体端面镀制腔镜对其热透镜影响的理论分析

肖孟超¹, 李淑静¹, 罗宁宁¹, 檀慧明²

(1. 无损检测技术教育部重点实验室(南昌航空大学), 江西 南昌 330069;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:用 ANSYS 对吸收 15 W 808 nm 泵浦光的端泵 Nd:YVO₄ 晶体进行了温度场和变形量模拟。计算了 Nd:YVO₄ 晶体单端有腔镜和两端都无腔镜情况下的热透镜解, 得到了在 Nd:YVO₄ 晶体上镀制腔镜会显著增大其热透镜的结论。用马赫-泽德干涉仪实测了 Nd:YVO₄ 晶体热透镜解, 该解与有限元模拟解相符, 证明结论可靠, 对大功率 LD 端泵的 Nd:YVO₄ 激光器的腔型设计具有指导意义。

关键词: Nd:YVO₄; 热透镜; 端面形变

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Theoretical analysis about resonator mirror on the end face of end pumped Nd:YVO₄ to affect it's thermal lens

XIAO Meng-chao¹; LI Shu-jing¹; LUO Ning-ning¹; TAN Hui-ming²

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing (Nanchang Hangkong University), Ministry of Education, Nanchang 330069, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Through simulating with the ANSYS the temperature field and deflection of the Nd:YVO₄ crystal which absorbed 15 W 808 nm light from the end face. Calculating the thermal lens of the Nd:YVO₄ crystal with and without mirror on the end face. Coming to a conclusion that coating the resonator mirror on the end face of the Nd:YVO₄ crystal can increase the thermal lens effect obviously. The thermal lens solution is verified by detecting the thermal lens by Mach-Zehnder interferometer. So the conclusion is instructive for the design of resonator of Nd:YVO₄ laser end-pumped by high power LD.

Key words: Nd:YVO₄; thermal lens; end face deflection

1 引言

作为激光晶体, Nd:YVO₄ 有着高的吸收系数和宽的受激发射截面的优异特点^[1], 特别适合低能 LD 连续端泵方式。随着激光技术的发展, Nd:YVO₄ 晶体生长工艺的成熟, 泵浦方式的改进, Nd:YVO₄ 晶体逐步涉足中等功率激光器市场。很多激光打标机中用的就是 Nd:YVO₄ 晶体。因此, 对 Nd:YVO₄ 晶体产生的热透镜进行研究变得非常必要。

2 理论分析

热透镜效应按产生方式分为三种——由热光效应产生的热透镜效应、端面形变产生的热透镜效应

和弹光效应产生的热透镜效应^[2]。因泵浦方式和晶体材料的不同, 各种热效应的比例会有所不同。

根据透镜的位相调制理论^[3], 可由式(1)计算激光晶体的热透镜焦距 $f(r)$:

$$f(r) = -\frac{r^2}{2 \times \Delta OPD(r)} \quad (1)$$

式中, r 为激光晶体径向半径, $\Delta OPD(r)$ ($\Delta OPD(r) = OPD(r) - OPD(0)$) 为热透镜径向相对光程差。其

作者简介: 肖孟超(1980-), 男, 博士, 讲师, 光学专业, 主要从事激光技术与二元光学研究。E-mail: xiaomengchao@sohu.com

收稿日期: 2009-04-01; 修订日期: 2009-06-27

表达式^[2]为:

$$\Delta OPD(r) = \int_0^L \frac{dn}{dT} \cdot [T(r,z) - T(0,z)] dz + (n_0 - 1)\Delta l(r) + \sum_{i,j=1}^3 \int_0^L \frac{\partial n}{\partial \varepsilon_{ij}} \cdot \varepsilon_{ij} dz \quad (2)$$

式中, z 为激光晶体的长度坐标; dn/dT 为晶体的热光系数; $T(r,z)$ 为晶体内 (r,z) 点的温度; $\Delta l(r)$ 为半径 r 处的端面形变量; n_0 为晶体的原始折射率; $\partial n/\partial \varepsilon_{ij}$ 为晶体的弹光系数; ε_{ij} 为晶体的应变张量。

式(2)右边第一项为由晶体热光效应产生的相对光程差,第二项为由端面形变产生的相对光程差,第三项为由弹光效应产生的相对光程差,也即应力双折射项。对于 Nd:YVO₄ 晶体,由于具有很强的自然双折射,激光输出沿着特殊的 π 向呈线性偏振^[4],式(2)中的第三项可以忽略^[2,5]。第二项适用于晶体端面未镀制腔镜的情况,如果晶体单端镀有腔镜,则应用 n_0 来代替 $(n_0 - 1)$ ^[6]。我们在设计激光腔,特别是做激光器产品时,为了减少腔镜、镀膜面的数量以及增加器件的紧凑、稳定性,往往习惯把平面腔镜镀制在晶体表面上。这样一来,如果由端面形变产生的热透镜效应不能忽略,那么将腔镜镀制在 Nd:YVO₄ 晶体端面上将增大晶体的热透镜效应。从 Nd:YVO₄ 晶体低的热导率和高泵浦光吸收系数来看,不同于 Nd:YAG 晶体^[7],其由端面形变产生的热透镜效应不能忽略。涉及端面形变产生的热透镜求解时,考虑到求解的复杂性,不适合用解析解的方法。

3 有限元模拟

本文用 ANSYS 对晶体热透镜效应进行数值求解。求解对象为 3 mm × 3 mm × 5 mm, a 切割, 0.5% Nd³⁺ 掺杂的 Nd:YVO₄ 晶体,其物性参数如表 1 所

示。泵浦条件为:吸收 15 W 808 nm 泵浦光,生热量为 30%^[8],即 4.5 W。热边界条件为:边缘制冷温度为 289 K,两端直接与空气进行对流换热。

表 1 Nd:YVO₄ 晶体物性参数

热导率	$K_x = 5.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (//c 轴), $K_y = 5.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (⊥c 轴)
弹性模量	133 GPa
泊松比	0.33
热膨胀系数	$11.37 \times 10^{-6}/\text{K}$ (//c 轴), $4.43 \times 10^{-6}/\text{K}$ (⊥c 轴)
晶体表面与环境空气的对流换热系数 ^[2]	250 W/(m ² · K)

由于热分布具有对称性,只需对 1/4 的 Nd:YVO₄ 晶体进行模拟。Nd:YVO₄ 晶体吸收泵浦光后的热分布表达式^[2]为:

$$Q(x,y,z) = \frac{2Qa}{\pi\omega_p^2} (1 - \exp(-aL))^{-1} \cdot \exp(-2 \frac{x^2 + y^2}{\omega_p^2} - a \cdot z) \quad (3)$$

式中, Q 为总生热量, $Q = 4.5 \text{ W}$; a 为晶体对泵浦光的吸收系数, $a = 1480 \text{ m}^{-1}$; ω_p 为泵浦光束束腰半径, $\omega_p = 0.2 \times 10^{-3} \text{ m}$; L 为晶体长度, $L = 0.5 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。 x, y, z 为晶体所处的空间坐标。

图 1 为模拟得到的晶体温度分布三维图。从图中可看出,方形的晶体结构并不影响晶体温度分布关于光轴的圆对称性。因此,只需研究某一径向平面的热分布即可。用式(2)的第一项对 YZ 平面的温度场进行处理 ($dn/dT = 2.9 \times 10^{-6}/\text{K}$),可得到由晶体热光效应产生的相对光程差。将其代入式(1),得到由晶体热光效应产生的热透镜,如图 2 所示。

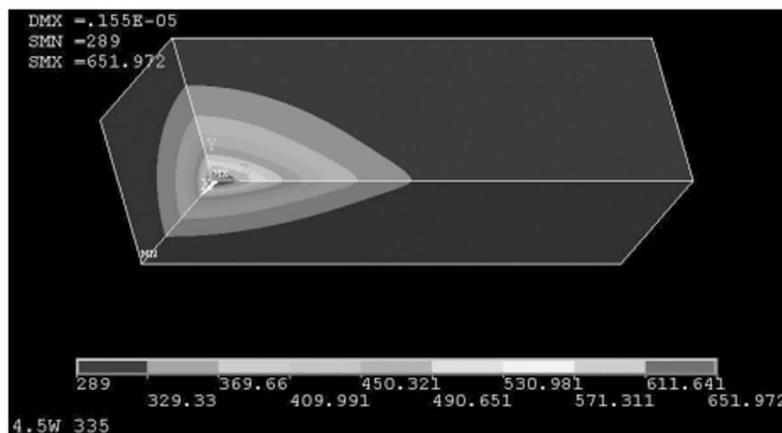


图 1 Nd:YVO₄ 晶体的温度场分布
Fig. 1 the temperature distribution of Nd:YVO₄ crystal

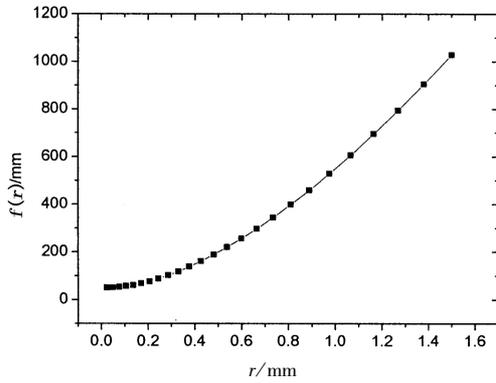


图 2 由 Nd:YVO₄ 晶体热光效应导致的热透镜焦距
Fig. 2 the focus of thermal lens formed by thermo-optic effect of Nd:YVO₄ crystal

图 3 为模拟得到的晶体形变图。从图中可看出端面形变主要发生在泵浦端的中心处。需要指出的是,由于 Nd:YVO₄ 晶体热导率和热膨胀系数的各向异性,OX,OY 方向上的端面形变有些微不同,这里只对 OY 方向上的端面形变进行处理。分晶体端面未镀制腔镜和单端镀有腔镜两种情况,可得到相应情况下由晶体端面形变产生的相对光程差。将其代入式(1),可得到相应的热透镜,如图 4 所示。对端面形变和热光效应产生的相对光程差进行求和,同样可得到两种情况下的总热透镜曲线,如图 5 所示。从图 4 和图 5 中可以看出,将腔镜镀制在 Nd:YVO₄ 晶体端面上显著增大了晶体的热透镜效应。

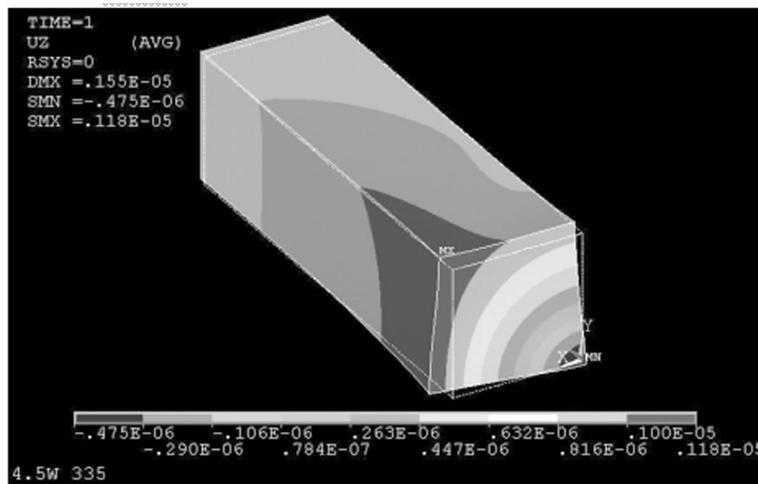


图 3 Nd:YVO₄ 晶体形变图
Fig. 3 the distortion of Nd:YVO₄ crystal

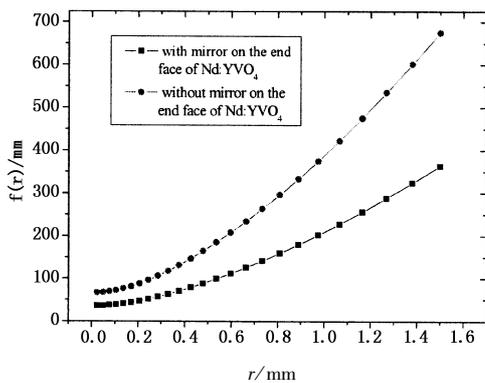


图 4 由 Nd:YVO₄ 晶体端面形变导致的热透镜焦距
Fig. 4 the focus of thermal lens formed by end-face deflection of Nd:YVO₄ crystal

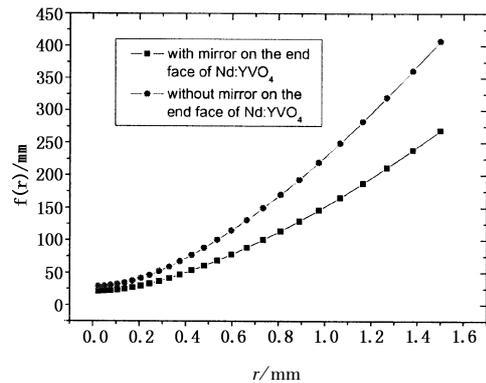


图 5 Nd:YVO₄ 晶体总热透镜焦距
Fig. 5 the total focus of thermal lens of Nd:YVO₄ crystal

4 实验测量

图 6 为测量 Nd:YVO₄ 晶体(端面有腔镜)的马赫-泽德干涉仪实验装置。当晶体因发热而产生热透镜效应时,会对通过它的物光平面波产生径向的相对相位改变,参考光与被改变的物光干涉将产生干涉条纹。图 7 为晶体吸收 15 W 808 nm 泵浦光,

1064 nm 出光功率为 9.3 W 时所得干涉图。干涉图上相邻明暗条纹所对应的光程差为 0.5λ (λ 为探测光波长)。据此可利用式(1)求得 $f(r)$ 的实验解。需要指出的是,实验所用晶体虽然单端镀有腔镜,但对于探测光来说则完全透射,所以用实验测到的数据实为单端无腔镜的热透镜。该实验解与软件模拟

单端无腔镜解一致,如图 8 所示,证明软件模拟真实可靠。

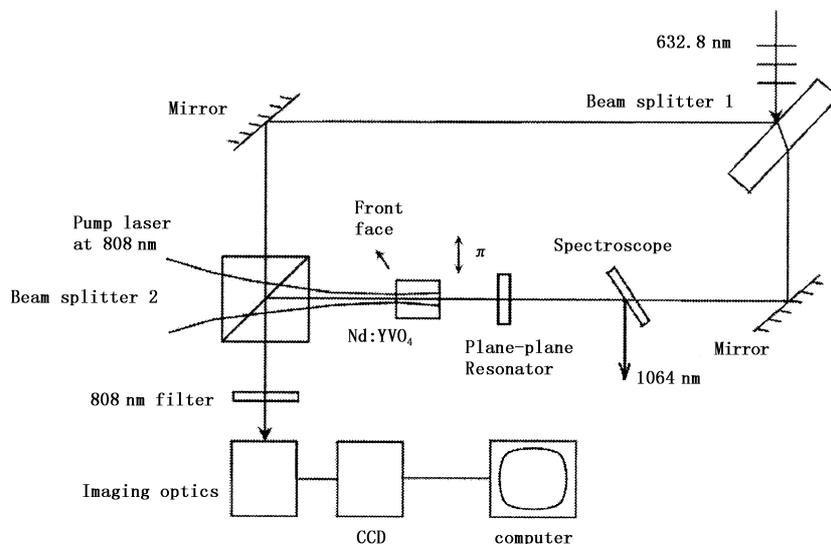


图 6 马赫-泽德干涉仪实验装置

Fig. 6 the mach-zehnder interferometer experimental set-up

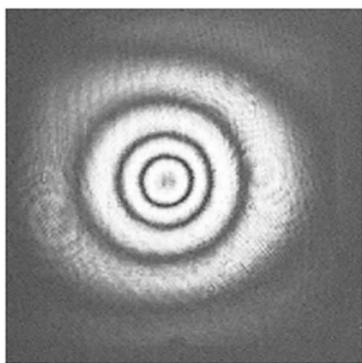


图 7 马赫-泽德干涉仪所摄干涉图

Fig. 7 the Interference fringe achieved by mach-zehnder interferometer experimental setup

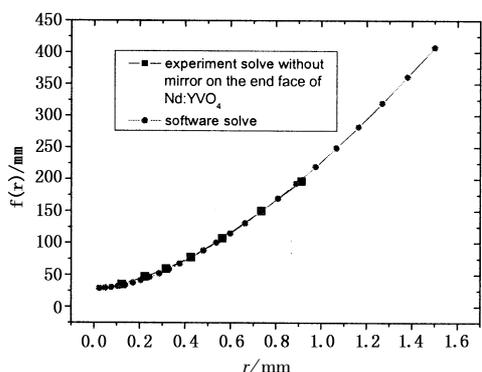


图 8 热透镜焦距实验解与软件模拟解对比

Fig. 8 the experiment solution VS the software simulating solution of the thermal lens focus

5 结论

通过 ANSYS 软件对吸收 15 W 808 nm 泵浦光的端泵 Nd:YVO₄ 晶体进行数值模拟,求解晶体由热光效应和端面形变产生的热透镜焦距,得到了将腔

镜镀制在晶体端面上将显著增大晶体热透镜效应的结论。数值模拟的热透镜焦距与马赫-泽德干涉仪所测结果相符,证明了该结论的可靠。对大功率端泵 Nd:YVO₄ 激光器的腔型设计具有指导意义。

参考文献:

- [1] 李明真,毕云峰,于家峰,等. LD 端面泵浦 Nd:YVO₄/KTP 连续绿光激光器热效应研究[J]. 激光与红外, 2007,37(11):1168-1170.
- [2] Xiaoyuan Peng, Lei Xu, Anand Asundi. Numerical and experimental study diode-pumped Nd:YVO₄ laser with undoped end cap[J]. SPIE, 5460:228-237.
- [3] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京:机械工业出版社, 1998:93.
- [4] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 第 5 版,北京:科学出版社,2002:54.
- [5] Z Xiong, Zhigang G Li, Nicholas Moore, et, al. Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd:YVO₄ lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003,39(8):979-986.
- [6] Yungfu Chen. Efficient high-power diode-end-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with a planar cavity[J]. Optics Letters, 2000,25(14):1016-1018.
- [7] 朱广志,陈培峰,邹雪芬,等. 激光棒热透镜效应的有限元分析[J]. 激光与红外,2007,33(6):833-835.
- [8] Feng Song, Chaobo Zhang, Xin Ding, et, al. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. Applied Physics Letters, 2002,81(12):2145-2147.