

非平面环形腔激光器中的热透镜效应数值建模

龚 鹏, 潘一锋, 周渝承, 吴仕军, 邱仕强, 周庆红*

西南科技大学数理学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2025年1月9日; 录用日期: 2025年2月14日; 发布日期: 2025年2月25日

摘 要

本文使用有限元分析(FEA)计算了非平面环形腔激光器中的热透镜效应。光程差(OPD)方法表明, 热透镜受到应变和端面膨胀的显著影响。实验得到了非平面环形腔激光器的斜效率为0.17, 实验结果证实了晶体结构的正确性。

关键词

数值建模, 热透镜效应, 非平面, 环形振荡器激光器, 光程差

Numerical Modeling of Thermal Lens Effects in a Nonplanar Ring Oscillator Laser

Peng Gong, Yifeng Pan, Yucheng Zhou, Shijun Wu, Shiqiang Qiu, Qinghong Zhou*

School of Mathematics and Physics, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: Jan. 9th, 2025; accepted: Feb. 14th, 2025; published: Feb. 25th, 2025

Abstract

The thermal lens effect in a nonplanar ring oscillator laser was calculated using finite element analysis (FEA). The optical path difference (OPD) method shows that the thermal lens is significantly affected by strain and end face bulging. The skew efficiency of the non-planar ring cavity laser is 0.17, and the experimental results confirm the correctness of the crystal structure.

Keywords

Numerical Modeling, Thermal Lens Effects, Nonplanar, Ring Oscillator Laser, Optical Path Difference

*通讯作者。

文章引用: 龚鹏, 潘一锋, 周渝承, 吴仕军, 邱仕强, 周庆红. 非平面环形腔激光器中的热透镜效应数值建模[J]. 应用物理, 2025, 15(2): 103-112. DOI: 10.12677/app.2025.152011



1. 引言

连续波(Continuous-Wave, CW)单频窄线宽激光器在精密激光光谱学[1] [2]和卫星测距[3]等领域引起了广泛关注。近几十年来, 激光器在引力波探测[4]、光学频率标准[5]-[8]等应用中面临着严格的性能要求。在众多激光器类型中, 非平面环形腔(nonplanar ring oscillator, NPRO)激光器[9] [10]由于其高功率、结构紧凑和频率稳定等优点, 成为这些应用的最佳选择。然而, 随着泵浦功率的增加, 由于量子缺陷, 晶体内部会产生过多热量, 从而形成热透镜效应。该现象严重影响了激光束的质量和输出效率[11]-[14]。

许多研究人员对热效应的研究和发展做出了重大贡献, 热透镜效应最早由 Gordon 等人发现, 他们为实际应用奠定了理论基础[15]。Innocenzi M. E.等人假设热流总是沿径向传播, 并由此推导出稳态热传导方程[16]。Frauchiger J.等人采用数值计算方法建立了线性热传导方程[17]。Weber 等人在掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)固体激光器中发现了热效应, 并指出晶体端面存在严重变形[18]。Pinto Robledo V. J.研究了侧面泵浦固体激光器中的热效应, 计算了温度分布和热透镜焦距[19]。Zhongsheng Y 等人计算了矩形激光晶体中的圆柱形热透镜效应[20]。

在之前的报道中, 热透镜效应是基于激光晶体条形体通过热传导方程计算的。然而, 在 NPRO 激光器中, Nd:YAG 晶体是一个几何对称性差的多面体, 使用这些方法进行准确的温度计算非常困难。此外, NPRO 激光器中的应变和端面膨胀问题此前尚未有相关研究。

在本文中, 我们提出使用有限元分析(FEA)方法, 将复杂的 Nd:YAG 晶体简化为有限数量的单元, 并建立热模型。我们得到了 Nd:YAG 晶体在不均匀热源、对流和局部冷却下的温度分布、热应变和端面膨胀。此外, 我们还使用光程差(OPD)方法量化热透镜效应。通过这种方法, 我们旨在阐明热透镜效应与损耗变化之间的关联性。

2. 热物理建模

NPRO 激光器的配置如图 1 所示。808 nm 的泵浦光束从激光二极管(LD)发出, 并通过光纤和耦合系统聚焦到 Nd:YAG 晶体中。通过精心设计的晶体结构, 泵浦光束在不同的光学工作面上来回反射, 形成独特的环形光路。在磁场 H 的作用下, 两个环形方向上的偏振损耗变得不同, 从而实现单向输出。经过晶体内的振荡后, 最终输出 1064 nm 的激光光束。

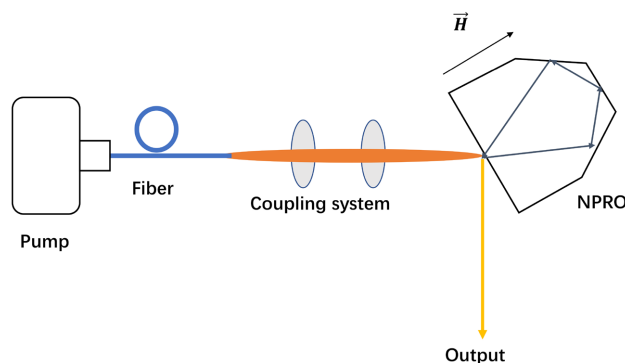


Figure 1. Schematic diagram of NPRO laser

图 1. NPRO 激光器原理图

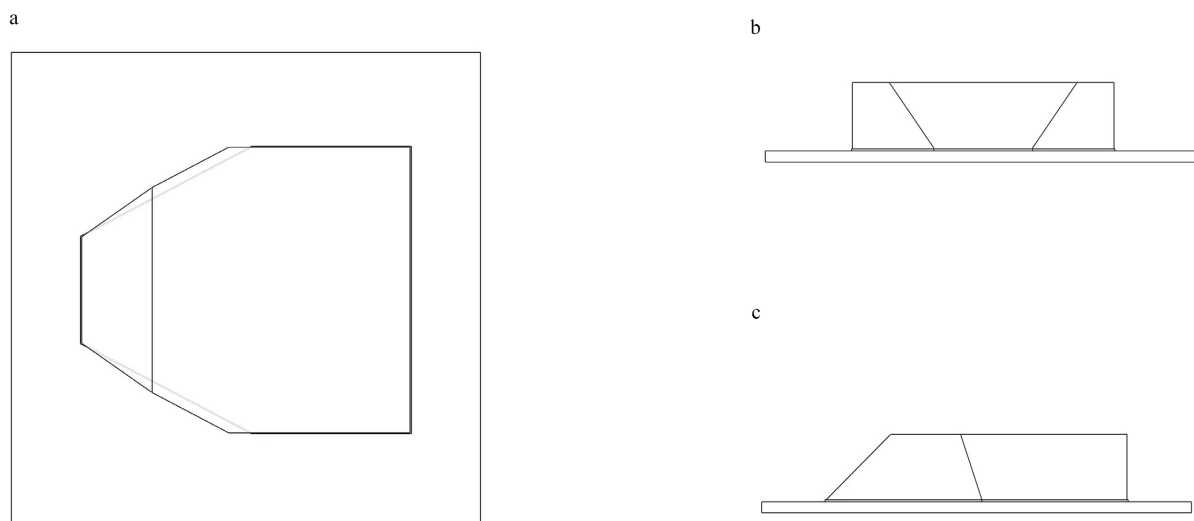


Figure 2. The three views of the experimental model
图 2. 实验模型的三视图

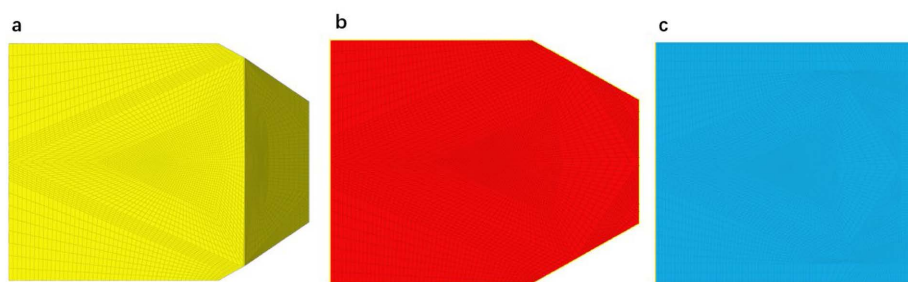


Figure 3. Mesh map for each part of the thermal model: (a) the mesh of the Nd:YAG crystal; (b) the mesh of Indium, and (c) the mesh of TEC
图 3. 热模型各部分网格图: (a) Nd:YAG 晶体网格图; (b) 铜网格图; (c) TEC 网格图

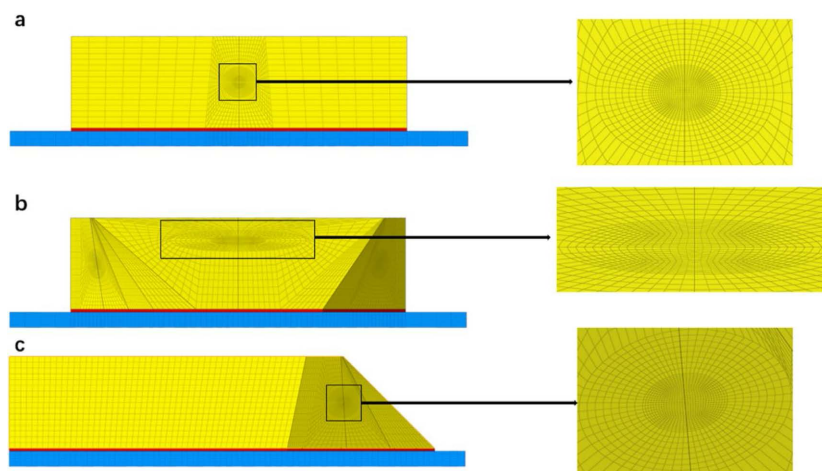


Figure 4. Enlarged views of the local mesh
图 4. 局部网格的放大视图

Nd:YAG 晶体尺寸为 $14 \times 12 \times 3$ mm 并且具有半非平面结构[21]。由于其体积小、温度控制精确

($\pm 0.001^\circ$)、响应快和无振动的特点，激光器采用了热电制冷器(TEC) [22]。如图 2 所示，晶体焊接在散热器[18]上，以确保晶体和 TEC 之间有良好的热接触。此外，在进行网格化之前，需要考虑细化晶体的特定部分。由于激光在晶体内部形成一个环形光路，能量分布集中在这个区域。因此，这部分需要特殊处理，我们将其分离出来进行详细分析。

网格化是有限元分析(FEA)中的关键步骤。我们展示了 Nd:YAG 晶体的网格化，它是一个不规则的八面体。如图 3(a)所示，网格化沿着光路的传播方向进行了细化，泵浦光束的半径仅约为 100 微米。其他两个部分的网格化与晶体接触表面一致，如图 3(b)和图 3(c)所示。整个模型由 394,356 个元素组成。

细化网格的大小大约为 1.25 微米，这是通过扫描实现的，如图 4 所示。经过多次尝试，我们获得的网格化既满足了所需的网格质量，也满足了计算精度的要求。

Table 1. Boundary conditions
表 1. 边界条件

初始温度	初始位移	温度约束	位移约束
293.15K	$U_x = 0$	293.15K	$U_x = 0$
	$U_y = 0$		$U_y = 0$
	$U_z = 0$		$U_z = 0$

初始条件值显示在表 1 中。热生成率和对流条件被应用于 Nd:YAG 晶体。在泵浦过程中，晶体可以被视为具有泵浦光束空间分布的体积热源，表达如下[23]：

$$h(x, y, z) = \frac{2\chi P_p}{\pi\omega_{px}(z)\omega_{py}(z)} \frac{\alpha_p}{1 - \exp(-\alpha_p L)} \exp\left(-\frac{2x^2}{\omega_{px}^2(z)} - \frac{2y^2}{\omega_{py}^2(z)} - \alpha_p z\right) \quad (1)$$

其中， P_p 是泵浦功率， α_p 是吸收系数， L 是吸收长度， χ 是量子缺陷效率，其表达式如下所示：

$$\chi = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \quad (2)$$

$\omega_{px}(z)$ ， $\omega_{py}(z)$ 分别是在子午面和弧矢面中泵浦光束的光斑半径包络线。它们初始的形式可以如下写出[24]：

$$\omega_{px}(z) = \omega_{px0} \sqrt{1 + \frac{\left(z - \frac{l}{2}\right)^2 \lambda_p^2}{\pi^2 \omega_{px0}^4 n_p^2}} \quad (3)$$

$$\omega_{py}(z) = \omega_{py0} \sqrt{1 + \frac{\left(z - \frac{l}{2}\right)^2 \lambda_p^2}{\pi^2 \omega_{py0}^4 n_p^2}} \quad (4)$$

在这里， ω_{px0} ， ω_{py0} 是 Nd:YAG 晶体两个正交面上的激光光束半径。该模型与空气接触，空气的热对流系数为 $10W/(m^2 K)$ [23]。

3. 结果与讨论

3.1. 热模型的温度、应变和端面膨胀

以下列参数计算为例： $P_p = 3W$ ， $\omega_{px0} = 10^{-4}m$ ， $\omega_{py0} = 10^{-4}m$ ， $\lambda_p = 808nm$ ， $\lambda_c = 1064nm$ ， $\alpha_p = 4cm^{-1}$ 。

热模型的温度、应变和端面膨胀如图 5 所示。

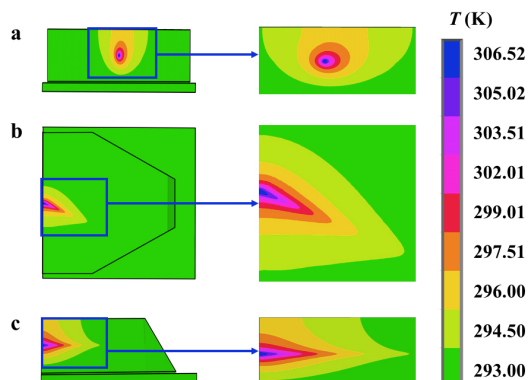


Figure 5. Views of the temperature distribution at 3 W pump power include: (a) the temperature distribution on the end face and an enlarged view of the partial area; (b) the temperature distribution on the cross section and an enlarged view of the local area, and (c) the temperature distribution on the longitudinal section and an enlarged view of the local area

图 5. 3 W 泵浦功率下的温度分布视图包括: (a) 端面的温度分布和部分区域的放大视图; (b) 横截面的温度分布和局部区域的放大视图, 以及(c) 纵向截面的温度分布和局部区域的放大视图。

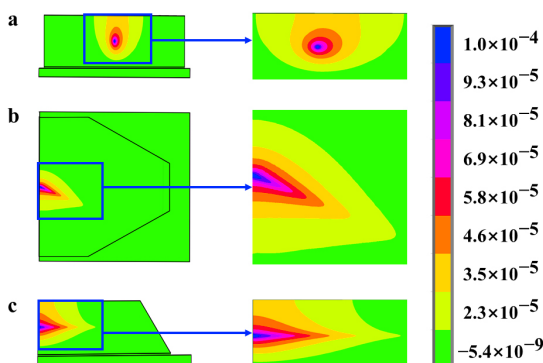


Figure 6. Views of the x component of thermal strain at 3 W pump power

图 6. 3 W 泵浦功率下热应变的 x 分量视图

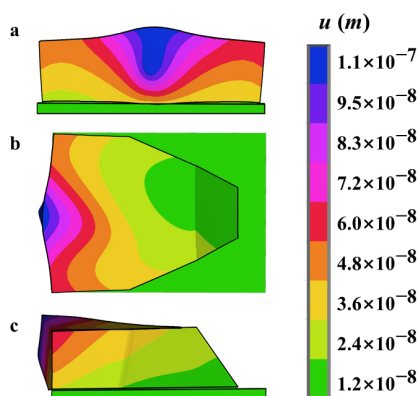


Figure 7. Views of the displacement of the model at 3 W pump power. The displacement vector sum is represented by u . (a) (b) and (c) show front view, vertical view and end view of displacement vector sum of the model

图 7. 3 W 泵浦功率下模型的位移视图。位移向量用 u 表示。(a)、(b)和(c)分别展示了模型位移向量的正面视图、垂直视图和端面视图

图 5 显示了模型顶部的高温和底部的低温。这种温度分布是由于不对称的边界条件造成的。模型顶

部与空气接触，其边界条件是热对流，而模型底部是 TEC，其边界条件是恒温，换句话说，这是由于局部冷却导致的不均匀散热所引起的。

在没有外力影响的情况下，应变场是由不均匀的温度场引起的，其中温度越高导致应变越大。热应变 x 分量的结果如图 6 所示，由于在加热条件下 Nd:YAG 晶体保持各向同性， y 和 z 分量的热应变与 x 分量相同。

在本文中，为了更好地观察位移，将其放大了 9158 倍。位移集中在端面的上部，如图 7(a)所示。图 7(b)显示位移分布呈抛物线形状，随着深度的增加而不规则变化。这一结果是由于吸收方向[25]所导致的。图 7(c)中显示的位移分布差异是由于局部冷却和短吸收长度造成的。

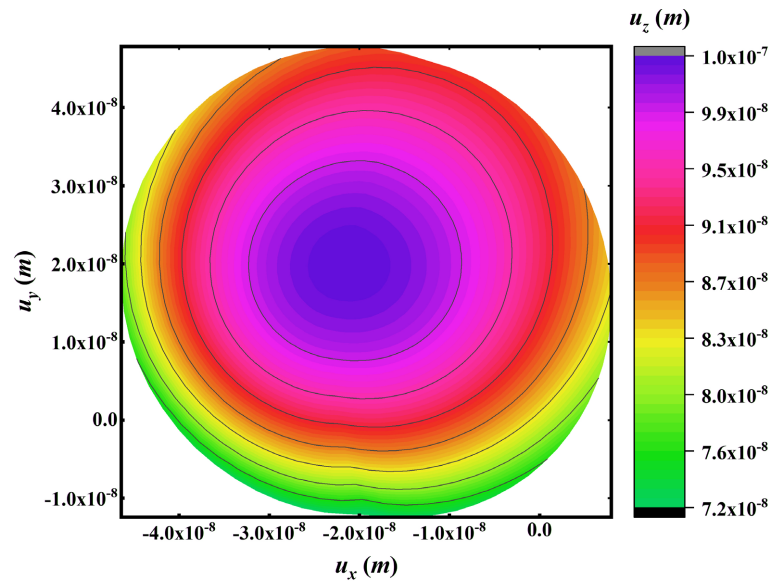


Figure 8. Contour map of the displacement vector, u_x , u_y , u_z represent the displacements of x , y , z components of the end face, respectively

图 8. 位移向量的等高线图， u_x , u_y , u_z 分别代表端面 x , y , z 分量的位移

图 8 显示中心等高线已经偏离原点，集中在热源的中心。由 x 和 y 分量引起的位移非常有限，位移主要由 z 分量引起。这些结果表明，位移形成了端面膨胀，导致热透镜的产生。

3.2. 热透镜效应

在前一节中，我们得到了温度、应变和端面膨胀的分布，这允许我们使用光程差(OPD)来计算热透镜。表达式如下[26]：

$$\Delta OPD = (OPD(x, y) - OPD(0, 0)) \quad (5)$$

由温度变化引起的折射率变化被称为热光效应。热光系数 $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} (1/K)$ [27]，由温度引起的 ΔOPD (光程差)可以使用这个系数来计算。首先，我们利用热光系数将模拟得到的温度分布转换为折射率分布。然后，以 $100 \mu m$ 的间隔对光路进行切片，假设在每个切片内，折射率沿光路方向的变化可以忽略不计。接下来，我们将相应的折射率乘以光路长度，最后将结果相加，得到光程差。应变的分布以及由此产生的折射率变化可以使用线性弹光效应来计算[28] [29]。计算结果如下：

图 9(a)显示了温度引起的 ΔOPD 。与应变相关的 ΔOPD 如图 9(b)所示。 ΔOPD 在中心区域的两面重叠良好，两条曲线均呈抛物线形状。由于激光斜入射，远离中心的两个平面上的 ΔOPD 不一致。将应变结

果与温度引起的 ΔOPD 和计算云图进行比较,认为应变和温度的变化是线性的。应变引起的 ΔOPD 小于温度引起的 ΔOPD 。

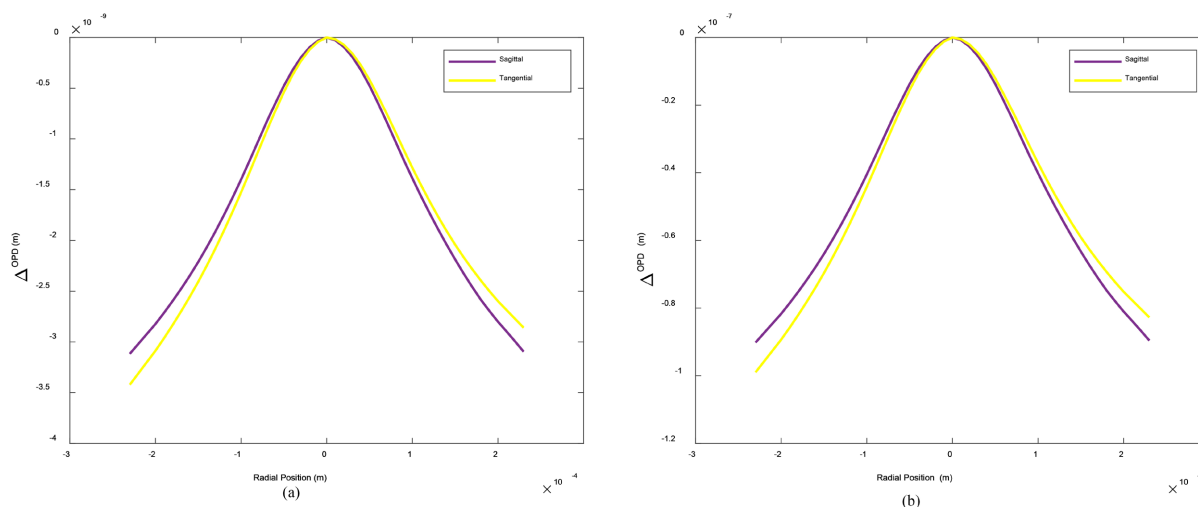


Figure 9. Figure (a) shows the ΔOPD caused by thermal strain at 3 W pump power. the yellow denotes the tangential plane while the purple represents the sagittal plane; Figure (b) shows the ΔOPD caused by temperature distribution at 3 W pump power

图 9. 图(a) 显示了在 3 W 泵浦功率下由热应变引起的 ΔOPD ; 紫色表示弧矢面, 而黄色代表子午面; 图(b) 显示了在 3 W 泵浦功率下由温度分布引起的 ΔOPD

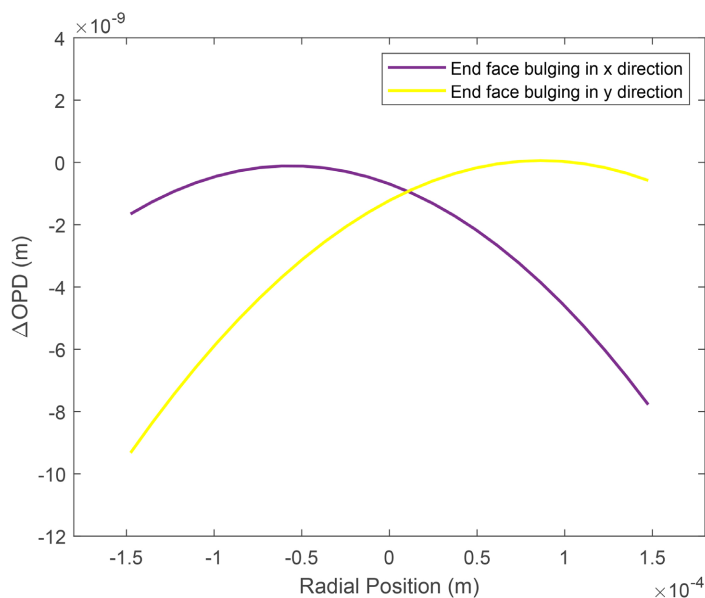


Figure 10. ΔOPD caused by end face bulging at 3 W pump power; the purple denotes end face bulging in the x direction while the yellow denotes end face bulging in the y direction

图 10. 在 3 W 泵浦功率下, 由端面膨胀引起的 ΔOPD ; 紫色表示 x 方向上的端面膨胀, 而黄色表示 y 方向上的端面膨胀。

图 10 显示, 由于激光的斜入射, y 方向的端面膨胀和 x 方向的端面膨胀分布不一致且不对称。这也是在分析温度和热应变对 ΔOPD 影响时, ΔOPD 局部差异的主要原因。这种不对称性是热透镜效应的第三个原因。

4. 实验

实验的光路图如图 1 所示, 泵浦源采用光纤输出的半导体激光器, 波长为 808 nm, 光纤的纤芯直径为 400 μm , 数值孔径为 0.22, 耦合系统采用两块焦距为 15 mm 的平凸透镜。采用功率计测量得到了 NPRO 激光器的输出功率曲线, 如图 11 所示, 通过线性拟合的方式算出激光器的斜效率为 0.17。

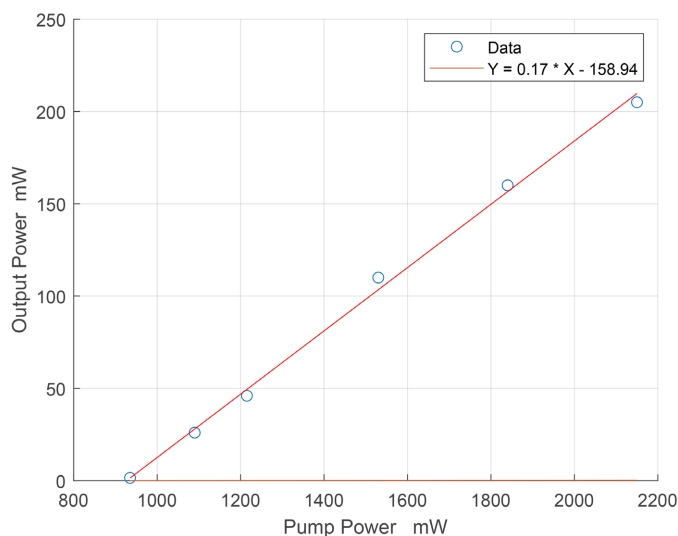


Figure 11. Spot diagram of the NPRO laser

图 11. NPRO 激光器的输出功率曲线

采用光束质量分析仪得到了 1064 nm 输出光的光斑, 如图 12 所示, 光斑 x 方向的尺寸为 1064.6 μm , y 方向的尺寸为 1279.5 μm 。

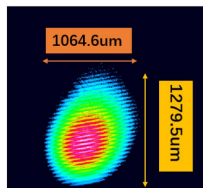


Figure 12. The output power curve of the NPRO laser

图 12. NPRO 激光器光斑图

5. 结论

在本文中, 我们使用有限元分析(FEA)来计算热透镜, 这降低了理论研究的难度。结果证实了热模型的可靠性, 同时设计了实验, 实验结果证实了晶体结构的正确性, 为下一步的实验分析奠定了基础。

OPD 计算结果表明, 在 3 W 泵浦功率下, 温度、应变和端面胀形对热透镜的贡献依次减小。最大的影响因素是温度。有限元分析结果表明不对称的边界条件会导致不均匀的温度分布, 不均匀的温度场会形成不均匀的应变场, 应变和温度的变化是线性的, 同时位移会形成端面膨胀, 从而产生热透镜。接下来, 我们将利用该方法研究热透镜对损耗差的影响。

参考文献

- [1] Hall, J.L., Ye, J., Diddams, S.A., Ma, L.-S., Cundiff, S.T. and Jones, D.J. (2001) Ultrasensitive Spectroscopy, the

- Ultrastable Lasers, the Ultrafast Lasers, and the Seriously Nonlinear Fiber: A New Alliance for Physics and Metrology. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **37**, 1482-1492. <https://doi.org/10.1109/3.970893>
- [2] Yang, T., Li, Y., Zhao, Y., Peng, Y., Cao, J., Fang, Z., *et al.* (2011) Modulation Transfer Spectroscopy of $^{127}\text{I}_2$ Hyperfine Structure at 561 Nm. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **60**, 2517-2521. <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2108555>
 - [3] Li, Z., Duan, H., Huang, X., Ming, M., Liu, P., Zou, S., *et al.* (2021) Design and Performance Test of the Spaceborne Laser in the Tianqin-1 Mission. *Optics & Laser Technology*, **141**, Article ID: 107155. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107155>
 - [4] Savage, R.L., King, P.J. and Seel, S.U. (1998) A Highly Stabilized 10-Watt Nd:YAG Laser for the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO). *Laser Physics*, **8**, 679-685.
 - [5] Willke, B., Danzmann, K., Fallnich, C., *et al.* (2006) Stabilized High Power Laser for Advanced Gravitational Wave Detectors. *Journal of Physics: Conference Series*, **32**, 40.
 - [6] Li, L., Shen, H., Bi, J., Wang, C., Lv, S. and Chen, L. (2014) Analysis of Frequency Noise in Ultra-Stable Optical Oscillators with Active Control of Residual Amplitude Modulation. *Applied Physics B*, **117**, 1025-1033. <https://doi.org/10.1007/s00340-014-5923-x>
 - [7] Shen, H., Li, L., Bi, J., Wang, J. and Chen, L. (2015) Systematic and Quantitative Analysis of Residual Amplitude Modulation in Pound-Drever-Hall Frequency Stabilization. *Physical Review A*, **92**, Article ID: 063809. <https://doi.org/10.1103/physreva.92.063809>
 - [8] Yang, T., Meng, F., Zhao, Y., Peng, Y., Li, Y., Cao, J., *et al.* (2011) Hyperfine Structure and Absolute Frequency Measurements of $^{127}\text{I}_2$ Transitions with Monolithic Nd:Yag 561 nm Lasers. *Applied Physics B*, **106**, 613-618. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4750-6>
 - [9] Gao, C., Gao, M., Lin, Z., *et al.* (2009) LD Pumped Monolithic Non-Planar Ring Resonator Single Frequency Lasers. *Chinese Journal of Lasers*, **36**, 1704-1709.
 - [10] Deng, W., Yang, T., Cao, J., Zang, E., Li, L., Chen, L., *et al.* (2018) High-Efficiency 1064 nm Nonplanar Ring Oscillator Nd:Yag Laser with Diode Pumping at 885 nm. *Optics Letters*, **43**, 1562-1565. <https://doi.org/10.1364/ol.43.001562>
 - [11] Foster, J.D. and Osterink, L.M. (1970) Thermal Effects in a Nd:Yag Laser. *Journal of Applied Physics*, **41**, 3656-3663. <https://doi.org/10.1063/1.1659488>
 - [12] Metcalf, D., de Giovanni, P., Zachorowski, J. and Leduc, M. (1987) Laser Resonators Containing Self-Focusing Elements. *Applied Optics*, **26**, 4508-4517. <https://doi.org/10.1364/ao.26.004508>
 - [13] Chen, Y.F., Huang, T.M., Kao, C.F., Wang, C.L. and Wang, S.C. (1997) Optimization in Scaling Fiber-Coupled Laser-Diode End-Pumped Lasers to Higher Power: Influence of Thermal Effect. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **33**, 1424-1429. <https://doi.org/10.1109/3.605566>
 - [14] Hoos, F., Li, S., Meyrath, T.P., Braun, B. and Giessen, H. (2008) Thermal Lensing in an End-Pumped Yb:KGW Slab Laser with High Power Single Emitter Diodes. *Optics Express*, **16**, 6041-6049. <https://doi.org/10.1364/oe.16.006041>
 - [15] Gordon, J.P., Leite, R.C.C., Moore, R.S., Porto, S.P.S. and Whinnery, J.R. (1965) Long-Transient Effects in Lasers with Inserted Liquid Samples. *Journal of Applied Physics*, **36**, 3-8. <https://doi.org/10.1063/1.1713919>
 - [16] Innocenzi, M.E., Yura, H.T., Fincher, C.L. and Fields, R.A. (1990) Thermal Modeling of Continuous-Wave End-Pumped Solid-State Lasers. *Applied Physics Letters*, **56**, 1831-1833. <https://doi.org/10.1063/1.103083>
 - [17] Frauchiger, J., Albers, P. and Weber, H.P. (1992) Modeling of Thermal Lensing and Higher Order Ring Mode Oscillation in End-Pumped C-W Nd:YAG Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **28**, 1046-1056.
 - [18] Weber, R., Neuenschwander, B., MacDonald, M., Roos, M.B. and Weber, H.P. (1998) Cooling Schemes for Longitudinally Diode Laser-Pumped Nd:YAG Rods. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **34**, 1046-1053. <https://doi.org/10.1109/3.678602>
 - [19] Bermudez G, J.C., Pinto-Robledo, V.J., Kir'yanov, A.V. and Damzen, M.J. (2002) The Thermo-Lensing Effect in a Grazing Incidence, Diode-Side-Pumped Nd:YVO4 Laser. *Optics Communications*, **210**, 75-82. [https://doi.org/10.1016/s0030-4018\(02\)01752-2](https://doi.org/10.1016/s0030-4018(02)01752-2)
 - [20] Yu, Z.S., *et al.* (2013) Study of the Distributed Thermal Lens of LD End Pumped Rectangular Gain. *Optics Express*, **21**, 23197-23205. <https://doi.org/10.1364/oe.21.023197>
 - [21] Zang, E.J., Cao, J., Zhong, M., Li, C., Shen, N., Hong, D., *et al.* (2002) Output Power and Frequency Stability of Monolithic Semi-Nonplanar Ring Lasers. *High-Power Lasers and Applications II. SPIE*, **4914**, 281-284. <https://doi.org/10.1117/12.481809>
 - [22] Lee, H.J., Yoon, J.S. and Kim, C. (2001) Numerical Analysis on the Cooling of a Laser Diode Package with a Thermo-electric Cooler. *Heat Transfer—Asian Research*, **30**, 357-370. <https://doi.org/10.1002/htj.1023>
 - [23] Wagner, G., Shiler, M. and Wulfmeyer, V. (2005) Simulations of Thermal Lensing of a Ti:Sapphire Crystal End-Pumped

-
- with High Average Power. *Optics Express*, **13**, 8045-8055. <https://doi.org/10.1364/opex.13.008045>
- [24] Siegman, A.E. (1986) *Lasers*. University Science Books.
 - [25] Nilsson, A.C., Gustafson, E.K. and Byer, R.L. (1989) Eigenpolarization Theory of Monolithic Nonplanar Ring Oscillators. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **25**, 767-790. <https://doi.org/10.1109/3.17343>
 - [26] Chénais, S., Druon, F., Forget, S., Balembois, F. and Georges, P. (2006) On Thermal Effects in Solid-State Lasers: The Case of Ytterbium-Doped Materials. *Progress in Quantum Electronics*, **30**, 89-153. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2006.12.001>
 - [27] Bass, M. (1995) *Handbook of Optics*. McGraw-Hill.
 - [28] Nye, J.F. (1985) *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. Oxford University Press.
 - [29] (2003) *International Tables for Crystallography: Volume D: Physical Properties of Crystals*. Kluwer Academic Publishers.