

文章编号: 1001-3806(2012)02-0285-04

## 基于 ANSYS 的圆截面激光晶体的热变形分析

樊素侯 涛

(四川建筑职业技术学院 交通与市政工程系, 德阳 618000)

**摘要:** 为了研究圆截面 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体在端面抽运下的温度场和热变形场, 考虑弹性体的协调性, 采用有限元方法进行了分析, 得到了端面抽运激光晶体棒内温度场和热形变场的数值解, 并与相同条件下传热学方法计算结果进行了比较。结果表明, 两种方法具有相同的最高温度, 但有限元法计算所得最大变形量偏小。这一分析结果对端面抽运固体激光的优化设计提供了参考。

**关键词:** 激光器; 激光晶体; 温度场; 热变形; 有限元法

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.036

### Thermal distortion analysis of laser crystal with circular cross-section based on ANSYS

FAN Su, HOU Tao

(Department of Transportation and Municipal Engineering, Sichuan College of Architecture Technology, Deyang 618000, China)

**Abstract:** To study the temperature field distribution and the thermal deformation field of the circular cross section Nd:GdVO<sub>4</sub> end-pumped laser crystals, considering the coordination of elastomers and using the finite element method for analysis, the numerical solution of the temperature field distribution and the thermal deformation field of the end-pumped laser crystal rod has been gotten and compared with the heat transfer calculation results under the same conditions. The results show that both methods have the same maximum temperature, but the maximum deformation calculated by the finite element method is small. The analysis results provide the reference for the end-pumped solid state laser optimization design.

**Key words:** lasers; laser crystal; temperature field; thermal distortion; finite element method

### 引言

激光二极管抽运的全固态激光器以其结构简单紧凑、效率高、寿命长、稳定性好等优点, 被广泛应用于工业、军事、医疗、科学研究等领域。但是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, 有一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场, 引起晶体端面变形, 严重地影响着激光器的性能<sup>[1-2]</sup>。分析解决激光晶体热效应问题的关键基础工作是对晶体内部温度场、热形变场的准确计算。目前, 国内在这方面的研究文献很多, 大都是先计算晶体内部的温度场, 然后根据温度分布计算晶体的热变形。

作者以有限元软件为工具, 再次对 LD 端面抽运棒状 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体的热变形进行了分析, 得出了晶体的温度场和热形变场, 同时与传热学中的热变

形进行比较分析。

### 1 传热学中热变形场的计算方法

#### 1.1 传热学模型

Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体因吸收部分抽运光能量产生的热量, 通过热传导的方式由周边散失。一般在激光二极管抽运的全固态激光器中用封闭冷却循环水或半导体制冷模块控制激光晶体周边冷却温度, 当抽运光通过激光晶体中心时, 热模型如图 1 所示<sup>[1]</sup>。其中, 长度为  $L$ , 半径为  $R$ 。

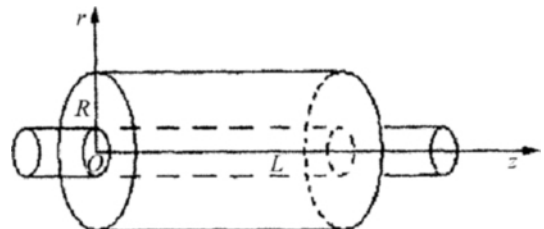


Fig. 1 Schematic diagram of laser crystal thermal model

#### 1.2 传热学中热变形计算

在激光晶体内部形成稳定温度场后, 由于温度升高使晶体产生热致形变, 热致形变是晶体产生热效应

作者简介: 樊素(1983-), 女, 助教, 硕士, 现主要从事力学应用方面的研究。

E-mail: 2007fansu@163.com

收稿日期: 2011-07-11; 收到修改稿日期: 2011-09-08

的主要原因<sup>[3-6]</sup>。设晶体内部一点( $r, z$ )处初始温度为0,晶体达到热平衡后的温度是 $u(r, z)$ ,  $r$ 为径向,  $z$ 为轴向。则 $z$ 方向线元 $dz$ 的热膨胀量为:

$$dl = \alpha u(r, z) dz \quad (1)$$

式中 $\alpha$ 为激光晶体沿 $z$ 方向的热膨胀系数。则晶体沿 $z$ 方向的总热变形量为:

$$l(r) = \int_0^l dl = \alpha \int_0^l u(r, z) dz \quad (2)$$

## 2 物理模型的描述

### 2.1 模型建立

采用有限元分析软件 ANSYS 建立计算模型<sup>[7-11]</sup>。激光介质选用 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体棒,尺寸为 $\varnothing 3\text{mm} \times 4\text{mm}$ ,掺 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 0.012,吸收系数为  $74\text{cm}^{-1}$ ,部分热力学物性参量如表 1 所示。

Table 1 Parameters of the Nd:GdVO<sub>4</sub><sup>[1,3]</sup>

thermal conductivity/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$11.36 \times 10^{-10}$
Poisson's ratio	0.49
thermal expansion coefficient	$7.3 \times 10^{-6}$
heat-transfer factor/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.24
Young's modulus/Pa	$3.17 \times 10^{11}$

根据实际温度荷载情况对激光晶体几何模型作必要简化是有限元分析建模常用的方法。作者研究的抽运光分布、边界均具有轴对称性,因此,选取沿晶体棒中心轴右半个截面建立计算模型,可以有效地减少运算量。采用 thermal solid quad 4node55 单元进行网格划分<sup>[12]</sup>,如图 2 所示。

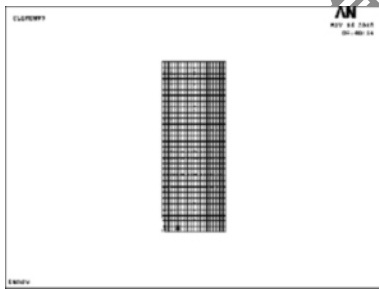


Fig. 2 Finite element analysis model

### 2.2 热传导方程

根据传热学基本理论,在 3 维轴对称稳态温度场中,物体导热的微分方程可表示为<sup>[13-16]</sup>:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{-q_v}{\lambda} \quad (3)$$

式中, $T$ 为物体的温度, $q_v$ 是物体内热源强度, $\lambda$ 为材料热导率。

### 2.3 边界条件

由于晶体放置在冷却器内,晶体侧面温度保持相对恒定,作为热模型数学处理可设其为 0(相对)。晶体两个通光面与空气接触,从两端面和空气热交换流

出的热量远远小于从晶体侧面通过热传导流出的热量,因此可假设晶体的两端面绝热。

晶体边界上的温度为已知,属于第 1 类边界条件。可表示为<sup>[17]</sup>:

$$T|_r = T_w(x, y) \quad (4)$$

式中, $r$ 为物体的边界; $T_w(x, y)$ 为边界已知温度函数。热模型的边界条件:

$$\begin{cases} T(r, z)|_{r=R} = 0 \\ \left. \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $R$ 为激光晶体的圆截面半径。

### 2.4 热源函数

抽运光入射到晶体上后,在晶体上便有了热传导的热源,内热源有发热率,温度分布是由内热源产生热引起的。抽运光斑近似为圆形高斯分布,其热源由下式决定<sup>[12]</sup>:

$$q(r, z) = \frac{2\alpha\eta P e^{-2r^2/w^2} e^{-\alpha z}}{\pi w^2} \quad (6)$$

式中 $\eta$ 为传热系数, $P$ 为抽运功率, $w$ 为抽运光高斯半径。

## 3 计算结果与分析<sup>[12-14]</sup>

### 3.1 温度分布

设定抽运功率为 15W,抽运光高斯半径为 0.0045m<sup>[11]</sup>。有限元计算结果如图 3 和图 4 所示。

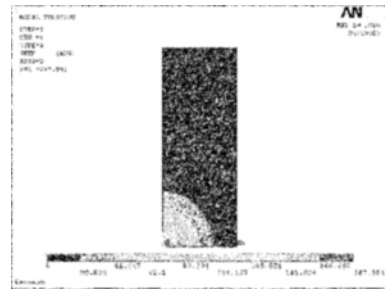


Fig. 3 Variation of temperature on the half axis surface

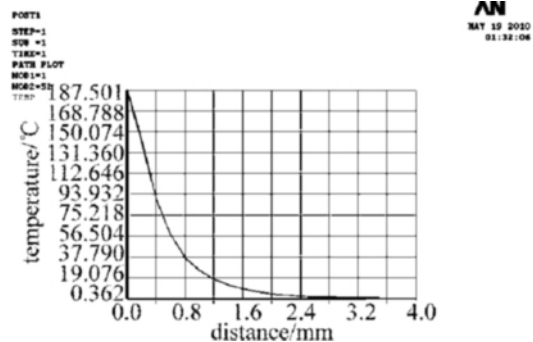


Fig. 4 Variation of temperature in the end surface versus  $r$

图 3 中,晶体端面中心到边缘的距离为 1.5mm,晶体棒长 4mm。由图 3 可以看出,晶体内部温度分布是不均匀的,晶体棒中最高温度为 187.501°C,与参考文献[1]中的最高温度 187.5°C 很接近,出现在抽运端

面中心位置,而边缘温度为 0。

为了更直观地表示温度分布,绘出了晶体的轴向温度分布的曲线图形,如图 4 所示。由图 4 可以看出,沿晶体中心轴上的温度分布是沿中心轴逐渐减小的。

### 3.2 端面形变

将热分析单元 55 转换为相应的结构单元 42,在稳态分析的基础上,使用 ANSYS 强大的后处理功能,可求得晶体的形变场。如图 5 和图 6 所示。

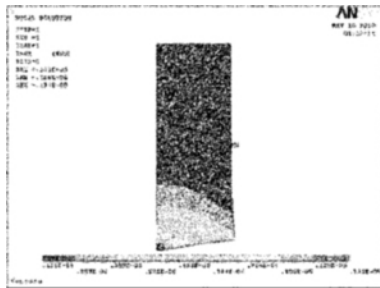


Fig. 5 Thermal deformation of the half axis

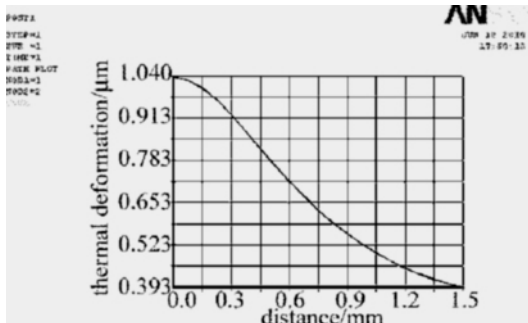


Fig. 6 Thermal deformation of the end surface versus  $z$

图 5 为沿晶体中心轴的截面的半边图。 $x$  轴(水平方向)表示从晶体端面中心到晶体的边缘, $y$  轴表示晶体的轴向。从图 5 可以看出,晶体端面中心点处变形最大为  $1.04 \mu\text{m}$ 。在温度相同的情况下,最大变形量比参考文献 [1] 中求出的最大变形量  $1.313 \mu\text{m}$  小。还可以看出,在晶体中心处发生鼓出变形,晶体边缘处有向外倾斜的趋势。由图 6 可以看出,端面形变量沿径向逐渐减小,边缘处变形量不为 0。这主要是由应力引起的。

### 4 结果对比

为了比较传热学方法和有限元方法计算的晶体变形,采用归一法将图 6 和参考文献 [1] 中的变形曲线在同一坐标系下绘出,即设最大变形量为 1,其余各点的变形量是相对最大变形量的相对值,如图 7 所示。图中  $x$  为抽运面沿径向坐标值, $y$  为相对位移量。

从图 7 可见,当晶体抽运面最大变形相同时,用传热学方法和有限元法得出的晶体抽运面变形有明显差异:(1)有限元法计算的变形大于传热学计算的变形;(2)在抽运面上,有限元法计算的变形量减少较慢,而传

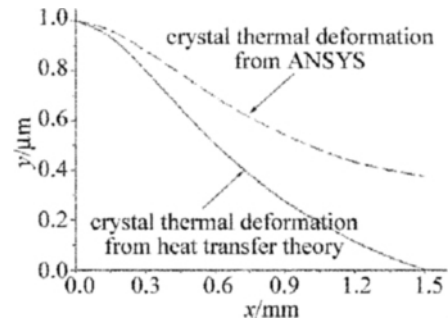


Fig. 7 Comparison between thermal distortions from heat transfer theory and numerical analysis

热学计算的变形减少较快;(3)在抽运面边缘有限元法计算的变形量不等于 0,而传热学计算的变形量等于 0。(2)和(3)中的差异是由于有限元法考虑了弹性体的协调性,而传热学计算时认为晶体各部分为自由变形。所以用有限元法计算的结果更符合实际情况。

### 5 结论

使用有限元软件 ANSYS 建立了分析模型,计算了端面抽运功率为 15W 时晶体的内部温度场分布和端面形变,并和传热学中的热变形进行对比,得出结论:(1)晶体内部温度分布不均匀是导致热变形的本质原因。由于温度场不均匀所导致的热变形使得晶体端面中心处发生鼓出变形,并在晶体的边缘处有向外倾斜的趋势。(2)在温度相同的情况下,相同点处用有限元法分析的变形量比传热学中分析的变形量大,但曲线变化较平缓些。这是因为在传热学分析中,认为晶体部分是自由热膨胀,相邻部分的热膨胀没有相互约束。

本文中的分析结果一方面为减小激光晶体的热效应,改善激光器的性能提供了理论依据,另一方面也可以应用到具有轴对称形式内热源的其他热模型计算分析中。

### 参 考 文 献

- [1] SHI P, LI L, GAN A sh. Research on thermal distortion of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal with laser diode end-pumped circular section [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(10): 1324-1328 (in Chinese).
- [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): 101-104 (in Chinese).
- [3] ZOU J, ZHAO Sh Zh, YANG K J, et al. Determining the thermal lens focus of LD end-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> solid-state laser with CCD detecting method [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 322-325 (in Chinese).
- [4] YANG H, ZHANG Y K, HE Y P. Thermal effect of end-pumped laser crystal with circular cross-section [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 49-53 (in Chinese).
- [5] SHI P, LI L, LI D L, et al. Temperature field analytical analysis of KTP crystal in laser system [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 5-8 (in Chinese).
- [6] LI B B, GUO Zh, SONG X L, et al. Direct heat dissipation form

- pumped end in laser diode end-pumped solid state laser [J]. Chinese Journal of Lasers 2009, 36(1): 59-65 (in Chinese).
- [7] ZHU G Z, CHEN P F, ZOU X F, *et al.* Finite element analysis of laser medium's thermal-lens [J]. Laser Technology, 2004, 28(2): 208-211 (in Chinese).
- [8] KONG X Q. Finite element method in heat transfer applications [M]. Beijing: Science Press, 1998: 17-91 (in Chinese).
- [9] YANG Y M. Research on the thermal effect of LD end-pumped solid-state lasers [D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 80-84 (in Chinese).
- [10] ZHOU Zh T, FENG J F. A thermal finite element analysis of the machining center machine tool with ANSYS [J]. Machine Building & Automation 2008, 37(6): 22-24 (in Chinese).
- [11] LI J, HUA W Q, HUANG Ch X, *et al.* Thermal effect of LD end-pumped laser crystal rods based on convective heat-transfer about side surface [J]. Chinese Journal of Lasers 2009, 36(7): 1754-1758 (in Chinese).
- [12] OU Q F, FENG G Y, LIU D P, *et al.* Simulation and experimental study on thermal effects of Nd:YAG lasers [J]. Laser Technology, 2002, 26(1): 15-17 (in Chinese).
- [13] GUO Y X, GONG M L, XUE H Zh, *et al.* Temperature analysis with nonuniform heat generation in the side-pumping laser rod [J]. Laser Technology 2007, 31(3): 238-241 (in Chinese).
- [14] SHENG D Ch, GONG M L, LIU Q, *et al.* Analysis of thermal effects in corner-bumped slab solid-state lasers [J]. Laser Technology 2006, 30(1): 86-89 (in Chinese).
- [15] SHI P, LI L, GAN A Sh, *et al.* Semi-analytical thermal analysis of double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> crystal [J]. Laser Technology 2004, 28(6): 616-620 (in Chinese).
- [16] MA Y T, CHEN W Y. Based on the finite element method for thermal deformation of cylindrical parts [J]. Mining Machinery, 2006, 34(7): 35-36 (in Chinese).
- [17] WANG X Ch, SHAO M. The principle and numerical method of the finite element method [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 50-281 (in Chinese).

(上接第 270 页)

为 49.78%; 如图 5a 所示, 在短波  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$  处, 分光比为 53.21%, 较接近于 50%; 如图 5c 所示, 在长波  $\lambda = 1.7\mu\text{m}$  处, 耦合臂的输出分光比为 40.13%, 在长波段分光比偏差变大。

### 3 小结

综上所述, 通过调整纤芯 A 和纤芯 B 外空气孔尺寸大小, 使得两纤芯不对称, 通过有限元法分析耦合器的耦合特性, 结果发现纤芯 B 的输出分光比与两纤芯不对称程度、两纤芯间空气孔尺寸、入射波长以及传播长度、光纤结构等参量都有关系。通过调节两纤芯的不对称程度以及两纤芯间的耦合系数, 使其满足一定的关系, 便可使耦合器在一定分光比时具有宽带效应, 这为宽带非对称双芯光子晶体光纤耦合器的制作提供理论支持。

### 参 考 文 献

- [1] HSIEH C H, WU T L, CHENG W H. An optimum approach for fabrication of low loss fused fiber couplers [J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 69(7): 199-203.
- [2] EISENMANN M, WEIDEL E. Single-mode fused biconical couplers for wavelength division multiplexing with channel spacing between 100 and 300nm [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(1): 113-119.
- [3] EISENMANN M, WEIDEL E. Single-mode fused biconical couplers optimized for polarization beam splitting [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(7): 853-858.
- [4] XU F, YE Y, ZHANG J, *et al.* Optimum of model of dual-core photonic crystal fiber coupler [J]. Laser Technology 2009, 33(3): 259-261 (in Chinese).
- [5] WRIGHT J V. Wavelength dependence of fused couplers [J]. Electron Letters, 1986, 22(6): 320-321.
- [6] MORTIMORE D B. Wavelength-flattened fused couplers [J]. Electron Letters, 1985, 21(17): 742-743.
- [7] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 1997, 22(13): 961-963.
- [8] WHITE T P, McPHERDAN R C, de STERKE C M, *et al.* Confinement losses in microstructured optical fibers [J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1660-1662.
- [9] SNYDER A W. Coupled-mode theory for optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1972, 62(17): 1267-1277.
- [10] FANG H, LOU Sh Q, GUO T Y, *et al.* Novel-high birefringence photonic crystal Fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 202-206 (in Chinese).
- [11] LAGSGAARD J, BANG O, BJARKLEV A. Photonic crystal fiber design for broadband directional coupling [J]. Optics Letters, 2004, 29(21): 2473-2475.
- [12] TAKAGI A, JINGUJI K, KAWACHI M. Broadband silica-based optical waveguide coupler with asymmetric structure [J]. Electron Letters, 1990, 26(3): 132-133.
- [13] TAKAGI A, JINGUJI K, KAWACHI M. Design and fabrication of broad-band silica-based optical waveguide couplers with asymmetric structure [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 848-855.