

# 端面抽运激光晶体热形变及温度场分布研究\*

张小龙, 沈金华, 蔡德芳, 王石语, 文建国, 过振

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

**摘要:**用有限元方法研究了端面抽运 Nd:YAG 激光器中激光晶体的温度和端面热形变分布规律. 研究表明, 激光晶体的端面热形变分为端面伸长形变和鼓出形变两种, 晶体的热形变透镜效应是由鼓出形变引起的. 在端面抽运的 Nd:YAG 晶体中采用第三类热传导边界条件, 实验测量了晶体的端面伸长和端面鼓出形变, 结果与理论分析相一致.

**关键词:**二极管抽运固体激光器; 端面热形变; 形变测量; 端面泵浦

**中图分类号:** TN248.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2007)02-0197-4

## 0 引言

在二极管抽运激光器(DPL)中,采用光纤耦合激光二极管(LD)进行端面抽运,可以实现抽运光和谐振腔中振荡光有效匹配.这种激光器转换效率高,有利于取得好的光束质量,在激光测距、激光雷达等各个领域得到广泛应用.

端抽 DPL 中, Nd:YAG 晶体产生不均匀的温度分布. 温度场分布的不均匀产生了晶体的热效应<sup>[1-2]</sup>. 目前对于热效应的研究主要集中在折射率变化所引起热透镜,而对端面形变研究比较少.

本文在热弹性理论基础上,采用有限元方法(FEM)数值模拟了不同热边界下的晶体端面形变,并利用干涉法对端面热形变进行了实验测量.

## 1 理论分析

### 1.1 晶体中热源分布

在 LD 抽运 Nd:YAG 激光器中,激光晶体对振荡光的吸收远远小于晶体对抽运光的吸收<sup>[2-3]</sup>. 假定晶体对振荡光透明,仅吸收 LD 抽运光. 晶体对抽运光的吸收是吸收系数与吸收长度相乘之积的指数函数. 介质的光热系数(即热耗与抽运功率之比)与激光器是否有振荡光等因素有关<sup>[4-5]</sup>. 本文中实验和计算均在无出射光条件下进行.

在端抽 DPL 中,抽运光与晶体均为柱对称结构. 柱坐标中,介质中热耗分布  $q(r, z)$  为

$$q(r, z) = \frac{2Qa}{w_p^2} (1 - \exp^{-a \cdot L})^{-1} \exp\left(\frac{2z^2}{w_p^2} - az\right) \quad (1)$$

式中  $a$  为吸收系数;  $L$  为晶体棒长度;  $w_p$  是抽运光的束腰半径;  $P$  为抽运光总功率;  $\eta$  是光热系数,取 0.43<sup>[9]</sup>. 介质中总热耗  $Q = P \times \eta$ . 文中所用晶体棒

的吸收系数  $a = 1/2 \text{ mm}^{-1}$ , 直径  $\phi = 4.0 \text{ mm}$ , 长度  $L = 10.0 \text{ mm}$ .

### 1.2 等侧面温度时,温度和形变分布

对于 Nd:YAG 这样的各向同性晶体,柱坐标下稳态热传导方程为<sup>[4-6]</sup>

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = - \frac{q(r, z)}{K} \quad (2)$$

式中  $K = 0.14 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$  为介质的热传导系数;  $q(r, z)$  为热耗分布(如式(1)).

设晶体侧面与热沉温度相同,即在晶体侧面上有等温边界条件

$$T|_{r=r_0} = T_0 \quad (3)$$

晶体棒两个端面的对流热传导边界条件写成

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0, L} = h_a (T(z=0, L) - T_a) \quad (4)$$

式中,  $T_0$  为金属热沉温度;  $T_a$  为室内的空气温度;  $h_a$  是端面与空气间的对流传热系数. 室温条件(300 K)下,即使在  $T - T_a = 100 \text{ K}$  时,  $h_a$  小于  $10^{-3} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$  量级,远小于晶体的热导率  $K$ ,故认为在晶体两个端面都是绝热的( $h_a = 0$ )<sup>[2]</sup>.

由热传导方程式(2)、热耗分布式(1)和热传导边界条件式(3)、(4),即可求解出定侧面温度条件下的晶体内温度分布. 如图 1.

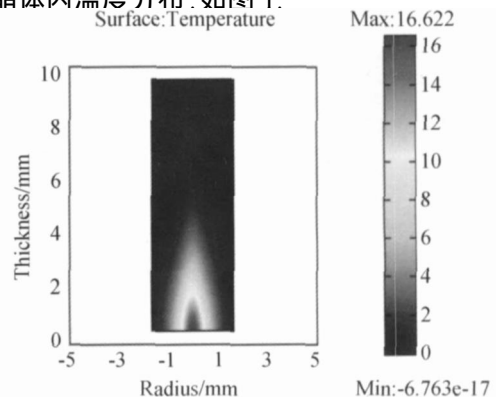


图 1 定侧温, 4.31 W 抽运时温度分布

Fig. 1 Temperature distribution, when side face is isothermal and pump power is 4.31 W

\*国防科技固体激光技术重点实验室基金(51456050104DZ0101)资助

Tel: 029-88202574 Email: zhangxiaolong1980@tom.com

收稿日期: 2005-08-31

根据晶体夹持的特点,约束晶体棒后端面边缘的纵向位移为0.用FEM耦合温度与形变,数值模拟抽运功率4.31W、束腰1.0mm时,抽运端面的热形变分布<sup>[7-8]</sup>,如图1.

可见即使晶体棒侧面为定温,抽运端面也会因为晶体的连续性而使产生0.16μm的端面伸长形变量.据此,将端面形变分为伸长和鼓出形变.如图2,  $L_1$  称为端面伸长形变,  $L_2$  称为端面鼓出形变.

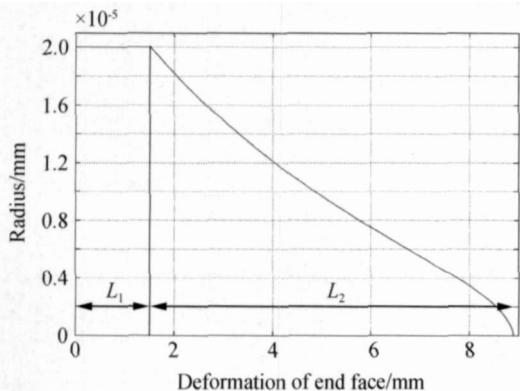


图2 端面热形变分类原理图  
Fig.2 The principle of classification of End-face thermo-deformation

1.3 侧面定导热系数,温度和形变分布

实际中,晶体棒的侧面热传导系数总为有限值<sup>[11]</sup>.在晶体棒侧面采用第三类热传导边界,则晶体侧面有热传导边界条件

$$-K \left. \frac{\partial T}{\partial R} \right|_{R=r_0} = K_c (T(r=r_0) - T_{cool}) \quad (5)$$

介质棒端面的热传导边界绝热,如式(4).式中,  $T_{cool}$  是热沉的温度;  $K_c$  是晶体棒侧面与金属热沉之间的热传导系数.

图3中是不同侧面热传导率时,晶体端面上距离中心0.0mm、0.5mm、2.0mm(即,端面中心、抽运光束腰半径和边缘处的纵向位移).图4中曲线描述了端面最大纵向位移会随侧面热传导率减小而增大.

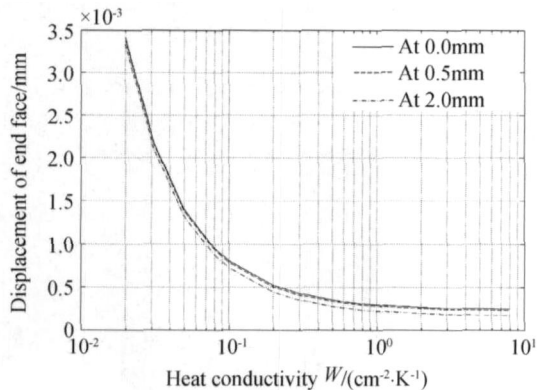


图3 端面不同处热形变与导热系数  
Fig.3 Displacement vs. conductivity at different points of the end face

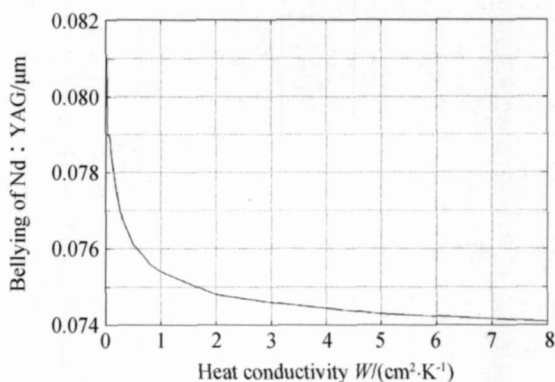


图4 最大鼓出形变与侧面热导率  
Fig.4 Maximal belying displacement vs. Conductivity of the side face

在侧面导热系数变小时,介质棒的整体温度升高.介质棒的抽运端面端面伸长形变远大于侧面等温条件下的端面伸长形变,图5给出了在侧面热导率为有限值和无穷大(等侧面温度)时,泵浦端面上的形变分布.

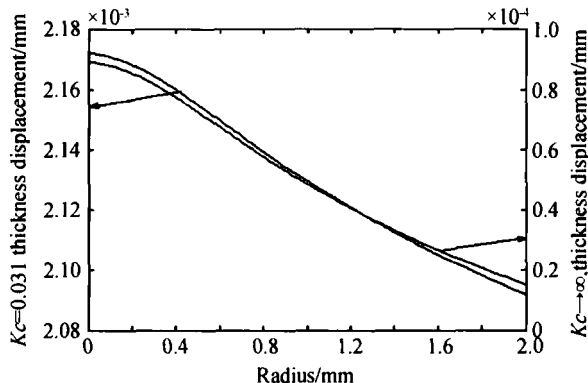


图5 定侧温和  $K_c = 0.031$  时的晶体形变  
Fig.5 The displacement vs. Radius under and  $K_c = 0.031 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^{-1}$

图6为晶体棒侧面的导热能力有限时,  $r_z$  面上温度场分布图.可得出,此时介质棒两端面中心之间的温度差增大、径向温差减小,但径向温度差之和(即从晶体流出侧面的总热流)保持不变.

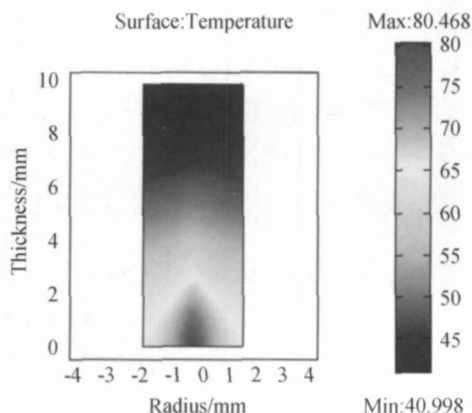


图6  $K_c = 0.031$  时,温度分布云图  
Fig.6 The Temperature distribution at  $K_c = 0.031$

此时因为晶体棒中的径向温度差变小,晶体纵向热膨胀时受到的约束减小,纵向热应变增大.据热应变和位移之间关系<sup>[7-8]</sup>,可得到介质棒端面热形变,如图 5.由此可见,介质晶体端面最大鼓出形变会随着侧面热导系数的减小而略有增大.

## 2 实验装置与测量方法

利用干涉原理测量晶体端面的热形变.实验装置如图 7,图中  $L_1$  为 He-Ne 激光器;P 为光屏;M 为参考平面镜;L 为耦合透镜;F 为光纤耦合 LD;E 为扩束透镜;CCD 为 CCD 相机; $a$  为探测光入射角.

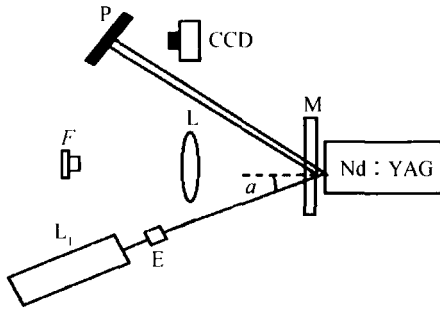


图 7 实验原理装置图  
Fig. 7 Schematic diagram of experiment

从 F 出射的抽运光,经过耦合透镜 L 在晶体端面中心成一个束腰为 1.0 mm 的光斑.因为平面镜 M 和晶体端面总存在一个夹角,所以平面镜与晶体端面之间空气夹层前、后面的反射光形成干涉图样.为避免晶体后端面反射光对实验的影响,入射角  $a = \arcsin(1.8 \cdot \arctan(2/10)) = 21^\circ$ .实验中入射角  $a = 28.4^\circ > 21^\circ$ ,所以经介质棒后端面反射的 He-Ne 光,不会从抽运端面出射影响实验.

图 8 为抽运功率为 0 时的干涉条纹,其中纵向条纹为参考平面镜 M 前、后表面反射光的干涉条纹,横向条纹为平面镜与晶体棒端面反射光干涉形成的.

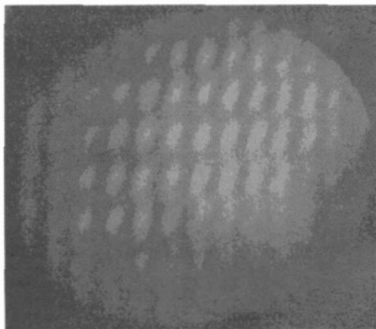


图 8 无 LD 抽运光时的干涉图样  
Fig. 8 Interference fringes at no pump

抽运功率从 0 增加到 4.31 W 过程中,横向的干涉条纹除了弯曲外,还向下移动了 7.5 组明暗条纹,如图 9.

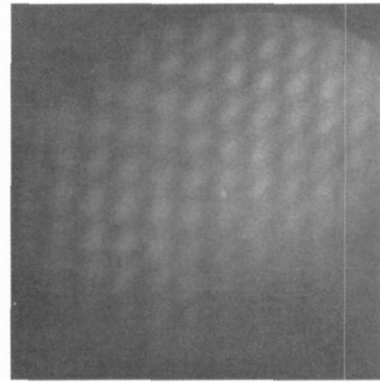


图 9 抽运功率 4.31 W,干涉图样  
Fig. 9 The fringes at pump power 4.31 W

在实验中,晶体端面伸长形变体现为抽运功率增加时干涉条纹的向上平移,而鼓出表现为干涉条纹的弯曲.根据干涉原理

$$h = N \cdot \lambda \cdot \cos a / 2 \tag{7}$$

式中  $h$  为介质纵向的形变量,  $N$  是移动条纹的组数,  $\lambda$  为探测光波长,  $a$  是探测光入射角,且  $\cos a = 0.88$ .代入式 (7),计算可得在抽运功率为 4.31 W 时,晶体端面伸长形变为  $2.09 \mu\text{m}$ .参见图 4 中侧面传热系数与晶体伸长量曲线,得到晶体棒侧面热传导系数约为  $0.031 \text{ W/cm}^2 \text{ K}$ .

对抽运功率为 0 W 和 4.31 W 的干涉图样做处理,得出抽运功率为 4.31 W 时介质端面的鼓出形变分布<sup>[10-11]</sup>,如图 10.

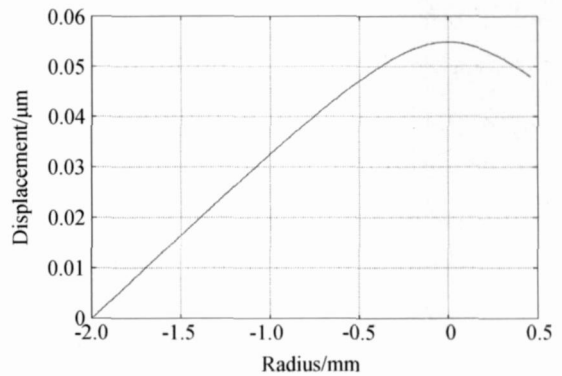


图 10 鼓出形变的径向分布  
Fig. 10 The belying displacement vs. radius

据此,将端面热形变分为伸长和鼓出两部分是合适的.比较图 5、图 10,实验测得形变更接近于定侧面热传导系数条件下的端面形变曲线.还可看出因抽运光非完全正入射和有发散度造成的端面鼓出形变变小,所以实验测得端面形变量略小于理论值.

## 3 结论

本文假定抽运光到介质为高斯分布且无发散,从模拟和实验得出端面热形变可分为伸长和鼓出两部分.定抽运功率时,晶体伸长部分主要由侧面的导

热系数所决定;而鼓出部分主要取决于晶体内因为内热源分布而与侧面导热系数关系不大.对端面热形变的划分,有利于分析热形变对激光谐振腔的影响,也给出了利用端面伸长形变测量晶体棒侧面热传导系数的方法.

#### 参考文献

- [1] WALTER K. Solid-state laser engineering [M]. SHUN Wen, JIANG Zewen, CHENG Guoxiang translate. Beijing: Science Press, 2002.  
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, **28**(4): 1057-1069.
- [3] SEBQSTIEN C, FRANCOIS B, FRÉRIC D. Thermal lensing in diode-pumped ytterbium lasers—part I: Theoretical analysis and wave front measurements[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2004, **40**(9): 1217-1233.
- [4] YAO Bao-quan, ZHANG Xing-bao, WANG Yue-zhu. Fiber-coupled diode end-pumped double Tm, Ho GdVO<sub>4</sub> laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 964~967.  
姚宝权, 张兴宝, 王月珠, 等. 光纤耦合二极管端泵 2 μm CW 双掺 Tm, Ho GdVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 光子学报, 2005, **34**(7): 964-967.
- [5] USIEVICH B A, SYCHUGOV V A, PIGEON F, et al. Analytical treatment of the thermal problem in axially pumped solid-state lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2001, **37**(9): 1210-1214.
- [6] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, et al. Thermal modeling of continuous wave end-pumped solid-state lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**(19): 1831-1833.
- [7] SHUN Cheng-wei. Laser irradiation effects [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2002: 202-229.  
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 202-229
- [8] WANG Hong-gang. Thermal-elasticity mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.  
王宏刚. 热弹性力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [9] FAN T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1993, **29**(6): 1457-1459.
- [10] SUN Ping, ZHANG Li, TAO Chun-xian. The technique of displacement separation in ESPI and its application in 3-D displacement measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1074-107.  
孙平, 张丽, 陶春先. 电子散斑干涉位移场分离技术及其在三维测量中的应用[J]. 光子学报, 2005, **34**(7): 1074-1077.
- [11] ZHAO Wei, ZHAO Xiao-ming, WANG Hong-xia, et al. The research of fractional fourier transform correlation applied on speckle measure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 464-467.  
赵玮, 赵晓铭, 王红霞, 等. 利用分数傅里叶变换相关实现散斑相干测量[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 464-467.

## Study of Temperature Distribution and Deformation of the End-face in End-Pumped DPL

ZHANG Xiao-long, SHEN Jin-hua, CAI De-fang, WANG Shi-yu, WEN Jian-guo, GUO Zhen

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Received date: 2005 - 08 - 31

**Abstract:** The thermal deformation of Nd:YAG laser which side face is isothermal or constant coefficient of heat conduction was studied. Thermo-elasticity theory and finite-element-method is used to simulate temperature and deformation distribution in end-pumped DPL. Using interferometer, thermal-deformation is measured on the end face. The thermal deformation of Nd:YAG should be combined of thermal-extension and thermal-bellying deformation. It is demonstrated that the temperature field and deformation field which is obtained by the third boundary conditions is more appropriate to the truth.

**Key words:** LD-pumped solid lasers; Thermal deformation on end-face; Deformation measurement; End-face pumped



**ZHANG Xiao-long:** is a master graduator in School of Technical Physics, Xidian University. His research interest includes DPSSL and optoelectronics.