

# 基于边缘加热的气冷钕玻璃放大器热波前畸变补偿

黄文发, 王江峰\*, 卢兴华, 李学春

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 理论分析了基于边缘加热条件下气冷钕玻璃放大器的热致波前畸变, 模拟计算了不同加热温度下钕玻璃片的温度分布和热波前畸变分布, 并进行了实验验证。结果表明, 数值模拟与实验结果能较好地吻合, 在产热率为  $0.6 \text{ W/cm}^3$  时, 钕玻璃片产生的热波前畸变随着边缘温度的增加而减小, 而当边缘温度达到  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 热波前畸变开始出现反转, 随温度增加而增加。合理设计边缘加热结构和优化加热温度, 能有效抑制气冷钕玻璃放大器的热波前畸变。

**关键词** 激光光学; 热畸变; 边缘加热; 钕玻璃; 氦气冷却; 激光放大器

**中图分类号** O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0101001

## Thermal Wavefront Distortion Compensation in Gas Cooled Nd:Glass Amplifier Based on Edge Heating

Huang Wenfa, Wang Jiangfeng, Lu Xinghua, Li Xuechun

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** Thermal wavefront distortion in the gas cooled Nd:glass laser amplifier based on edge heating is analyzed theoretically. Temperature distribution and thermal wavefront distortion under different heating temperatures of the Nd:glass are simulated numerically and verified by an experiment. The results show that the numerical simulation is in good agreement with the experimental results. Thermal wavefront distortion decreases as the heating edge temperature increases when the heat deposition is  $0.6 \text{ W/cm}^3$ , but starts increasing when the edge temperature is higher than  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Optimal design of the edge heating structure and heating temperature can suppress the thermal wavefront distortion effectively in the gas cooled Nd:glass laser amplifier.

**Key words** laser optics; thermal distortion; edge heating; Nd:glass; helium gas cooling; laser amplifier

**OCIS codes** 140.6180; 140.3280; 140.3580; 140.3480

## 1 引 言

近年来, 激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)因具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑的优点而备受关注, 输出能量达百焦耳, 重复频率运行的 DPSSL 装置在国内外得到广泛研究<sup>[1-4]</sup>, 尤其是采用叠片方式结合高速气流冷却技术的激光系统成为目前的研究热点<sup>[5-7]</sup>。该构型主要有如下优点: 1) 横向口径大, 高速气流直接带走叠片表面废热, 冷却效率高; 热梯度方向垂直于叠片表面, 产生的波前畸变小。2) 叠片采用掺杂浓度梯度排布的方式, 一方面可以保证每个叠片得到均匀的热负载, 另一方面可以减小激光器的总厚度, 使激光器的小信号增益系数随增益距离变化缓慢, 甚至恒定。世界各国先后开展对该构型的研究, 2008 年, 美国劳伦斯利弗莫尔实验室设计的 Mercury 激光装置已获得  $65 \text{ J}/10 \text{ Hz}$  的输出, 整体转换效率达到  $6.5\%$ <sup>[8]</sup>; 2016 年, 英国卢瑟福-阿尔普顿实验室的 DiPOLE 激光装置在低温条件下实现了  $107 \text{ J}/1 \text{ Hz}$  的输出<sup>[9]</sup>; 除此之外德国德雷斯頓研究中心的 PEnELOPE 装置<sup>[10]</sup>、捷克物理研究所的 HiLASE 激光装置<sup>[11]</sup>也

**收稿日期:** 2016-09-07; **收到修改稿日期:** 2016-10-08

**作者简介:** 黄文发(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事重复频率固体激光放大器及光纤应用方面的研究。

E-mail: huangwf@siom.ac.cn

\* **通信联系人.** E-mail: wajfeng@163.com

即将搭建完成。虽然高速气流冷却方式能有效带走介质中的废热,但是由于 LD 具有良好的指向性,其抽运区域和非抽运区域的温度梯度反而增大。对于工作在高重复频率条件下的大能量激光系统,固体激光介质内的废热沉积将远远大于传统单发次工作时的情况,光束质量退化、激光效率降低等问题在高重复频率激光系统中仍然存在<sup>[12-14]</sup>。因此,除了采用高效的冷却技术外,如何进一步控制光束畸变,减小热效应的影响显得尤为重要。激光介质内部的温度梯度差是引起波前畸变的一个重要因素,减小温度梯度差可在一定程度上实现对热致波前畸变的控制,从而改善光束质量,为高功率激光系统的重复频率运行提供了一种新的技术途径。

本文提出边缘温度控制技术,通过对激光介质边缘区温度场进行控制,降低了激光介质中心与边缘的温度梯度,从而减小了其对波前畸变的影响。基于氦气冷却钕玻璃放大器系统,设计了边缘加热结构,理论和实验上分析讨论了在不同边缘加热温度下钕玻璃片的温度分布和热致波前畸变分布。理论和实验研究表明,在产热率为  $0.6 \text{ W/cm}^3$  时,钕玻璃片产生的热波前畸变随着边缘温度的增加而减小,而当加热温度达到  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  时,热波前畸变开始出现反转,随边缘温度的增加而增加。合理设计边缘加热结构和优化加热温度,能有效抑制气冷钕玻璃放大器的热波前畸变。

## 2 理论分析与模拟

图 1(a)为整个片状放大器结构图,放大器采用端面抽运气体冷却结构,激光增益介质为钕玻璃(Nd:YAG)叠片,掺杂质量分数为 2.0%,其热力学物性参数如表 1 所示。放大器采用 1 块钕玻璃结合 5 片 K9 玻璃的形式,片与片之间距离为 1 mm,高速氦气通过间隙将钕玻璃片表面的废热带走。钕玻璃与 K9 玻璃均镶嵌在流体动力学铝制叶片上,钕玻璃的几何尺寸如图 1(b)所示,片的硬边口径为  $55 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ ,厚度为 10 mm。抽运源为 802 nm LD 阵列,抽运总功率为 15 kW,抽运光经过压缩整形后进入工作介质,抽运区域为  $43 \text{ mm} \times 43 \text{ mm}$ ,工作介质在抽运波长 802 nm 处吸收率约为 82%。被吸收的抽运光一部分转化成热,导致钕玻璃叠片温度变化,其分布形式可由热传导方程得出

$$\Delta T(x, y, z) = -Q(x, y, z)/\kappa, \quad (1)$$

$$Q(x, y, z) = \alpha \cdot \frac{P(x, y)}{A_{\text{pump}}} \cdot f \cdot \eta \cdot \chi \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (2)$$

$$P(x, y) = \exp[-(x^N + y^N)/\tau^N], \quad (3)$$

式中  $\kappa$  为增益介质的热导率, $Q(x, y, z)$  为介质内部生热率, $\alpha$  为激光介质对抽运光的吸收系数(单位为  $\text{cm}^{-1}$ ), $P(x, y)$  为脉冲抽运光的功率, $f$  为占空比, $A_{\text{pump}}$  为抽运光斑的面积, $\eta$  为抽运耦合效率, $\chi$  为产热比(热沉积和所吸收的抽运光能量的比值), $N$  为超高斯分布阶数, $\tau$  为抽运光束的半峰全宽。

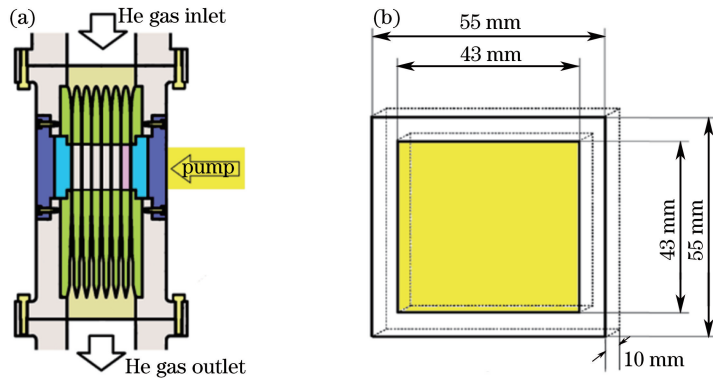


图 1 (a)气冷放大器结构;(b)钕玻璃片三维视图

Fig. 1 (a) Structure of the gas cooled laser amplifier; (b) three-dimension view of the Nd:glass slab

由(1)~(3)式,并借助边界条件可以得到钕玻璃叠片内的温度分布情况。钕玻璃叠片的边界条件可表示为

$$\mathbf{n} \cdot \nabla T|_a + \frac{H}{\kappa} [T(\Omega) - T_c] = 0, \quad (4)$$

式中  $n$  为垂直于钕玻璃片的表面向量,  $T$  为钕玻璃片内的温度,  $\Omega$  表示钕玻璃片的边界,  $H$  为表面对流换热系数,  $T_c$  为氦气冷却温度。

表 1 钕玻璃热力学物性参数

Table 1 Thermodynamic physical property parameters of the Nd:glass

Property	Value
Refractive index $n$	1.542
Thermo-optical coefficient $dn/dT$ at 20~40 °C /( $10^{-6}/K$ )	-9.96
Coefficient of thermal expansion at 20~100 °C /( $10^{-7}/K$ )	82.0
Thermal conductivity at 28 °C / [ $W/(m \cdot K)$ ]	0.83
Density /( $g/cm^3$ )	2.76
Young's modulus /( $1000 N/mm^2$ )	58
Poisson's ratio	0.232

假设冷却氦气的温度为 20 °C, 气流量为 150 m<sup>3</sup>/h, 在压强为 405.3 kPa 时钕玻璃表面与氦气的对流换热系数  $H=500 W/(m^2 \cdot K^{-1})$ , 根据(1)~(4)式, 借助有限元分析(FEA)软件 ANSYS, 可以数值计算钕玻璃片内的温度分布。图 2(a)是产热率为 0.6 W/cm<sup>3</sup>, 边缘温度为 20 °C 时钕玻璃的温度分布云图。从图中可以看到, 在无加热时, 钕玻璃温度分布为中心高四周低, 中心与边缘温差为 17 °C。图 2(b)为不同边缘温度时钕玻璃中心径向温度分布曲线。随着边缘温度的增加, 中心温度与抽运区域边缘温度的温差逐渐减小, 另外注意到, 当边缘温度为 80 °C 时, 中心温度与抽运区域边缘的温差几乎为零, 随着边缘温度不断增大, 中心温度与边缘温度的温差又逐渐增大。

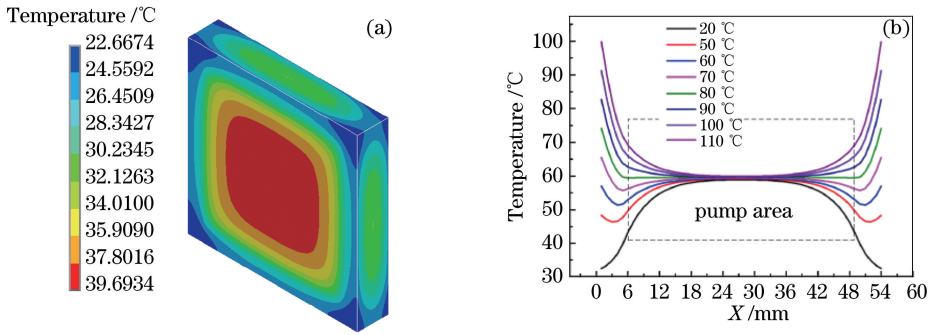


图 2 (a)钕玻璃温度分布云图;(b)不同边缘温度下钕玻璃中心径向温度分布曲线

Fig. 2 (a) Temperature distribution of the Nd:glass slab; (b) radial temperature distribution of the Nd:glass slab center under different edge temperatures

钕玻璃产生的热波前畸变可表示为

$$D_{OPD}(x, y) = \Delta L(x, y)(n - 1) + \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^L T(x, y, z) dz + \sum_{i,j=1}^3 \int_0^L \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{i,j}(x, y, z) dz, \quad (5)$$

式中  $n$  为钕玻璃的折射率,  $L$  为钕玻璃的厚度,  $\epsilon$  为应变张量。(5)式中右边三项分别表示由端面形变、热光效应、双折射效应引起的波前畸变。借助 Matlab 软件, 可以数值计算钕玻璃产生的热波前畸变。图 3(a)和图 3(b)分别为边缘温度为常温与 80 °C 时, 钕玻璃产生的热波前畸变, 从图中可以看到, 当边缘温度为 80 °C 时, 钕玻璃片产生的热波前畸变由 1.2λ 减小到 0.1λ (λ=1053 nm)。

### 3 实验原理及装置

#### 3.1 气冷钕玻璃放大器热波前畸变测量装置

在激光二极管(LD)准连续(占空比  $f=0.45\%$ )抽运条件下, 基于边缘加热的气冷钕玻璃放大器热致波前畸变测试实验装置如图 4 所示。采用连续光纤激光器作为探测光源, 探测光中心波长为 1053 nm, 光束质量因子  $M^2 < 1.05$ 。探测光经过透镜 L7 准直和硬边光阑整形后, 光斑大小变成 55 mm × 45 mm, 最后通过透镜 L8 和透镜 L9 组成的 4f 成像系统, 进入波前传感器。M1 和 M4 为全反镜, M2 和 M3 为双色镜, 吸收

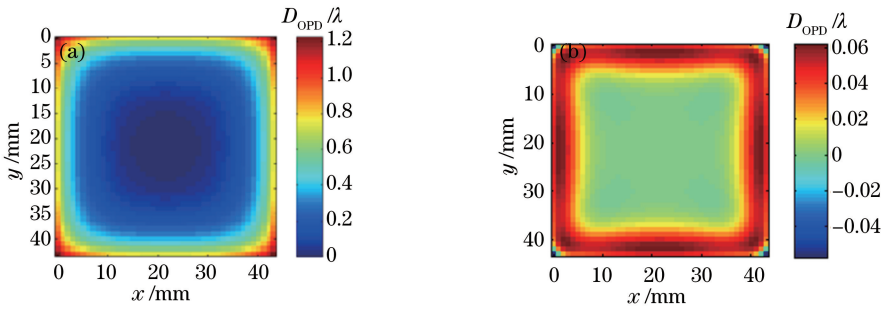


图 3 (a)常温下和(b)边缘温度为 80 °C 时钕玻璃产生的热波前畸变

Fig. 3 Thermal wavefront distortion of the Nd:glass slab (a) under normal temperature and (b) at the edge temperature of 80 °C

体用于吸收残余的抽运光, T1 和 T2 为氦气进出管道, 波前传感器采用法国 Phasics 公司的 SID4, 分辨率为 160 pixel×120 pixel。

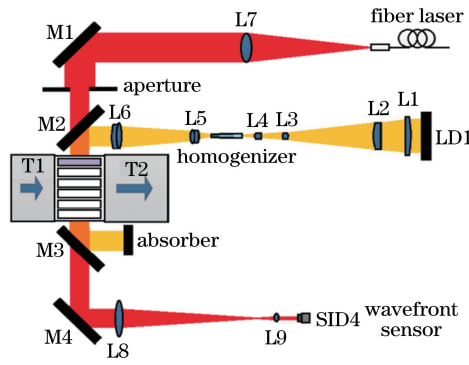


图 4 气冷钕玻璃放大器热波前畸变测试实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of the thermal wavefront distortion measurement in the gas cooled Nd:glass amplifier

### 3.2 边缘加热结构

图 5 为边缘加热叶片结构。采用镶嵌在铜块上的热流道加热器, 通过加热铜块间接对钕玻璃边缘进行温度控制, 从而实现边缘加热。灰色为铝质翼片, 白色为聚四氟乙烯绝热体, 黄色为热沉铜块, 红色为加热器。热流道加热器热功率可达 1000 W, 温度控制精度为 ±2 °C。利用聚四氟乙烯将热沉铜块包围, 可以防止在加热过程中铝制叶片因为过热膨胀而影响测试结果。另外, 在热沉铜块与钕玻璃中间填充导热硅脂, 保证热沉铜块与钕玻璃边缘的良好导热性以及均匀性。

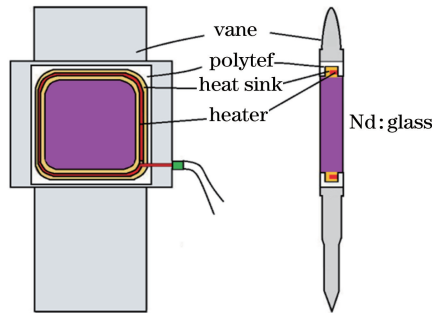


图 5 边缘加热叶片结构

Fig. 5 Structure of the edge heating vane

## 4 实验结果与分析

### 4.1 无抽运加热条件下热波前畸变测量

首先测试没有加载抽运源时的波前变化。由于光纤激光器光源自身的像差非常小, 可忽略不计, 测得的

波前畸变即为钕玻璃片和氦气流动带来的总静态透射波前畸变。图 6 为总静态波前畸变变化情况,测试时长为 180 s,静态波前畸变约为  $0.24\lambda$ ,符合钕玻璃片对透射波前峰谷(PV)值小于  $\lambda/8$  的加工要求。但是在图中可以看到明显的测量噪声,这主要是探测光在自由传播时受空气扰动和光学平台振动引起的,它在一定程度上影响了波前测量的精度。因此在测量的过程中,将光路罩起来同时减少人为走动,尽量避免空气扰动带来的影响。

采用单侧端面抽运结构,抽运光方向与探测光光束方向一致,因此抽运光斑分布的均匀性直接影响钕玻璃片中的热分布情况。实验中,采用柱透镜以及匀光管对抽运光束进行缩束整形,抽运光斑大小为  $43\text{ mm} \times 43\text{ mm}$ ,分布均匀性大于 90%,抽运光斑分布如图 7 所示。

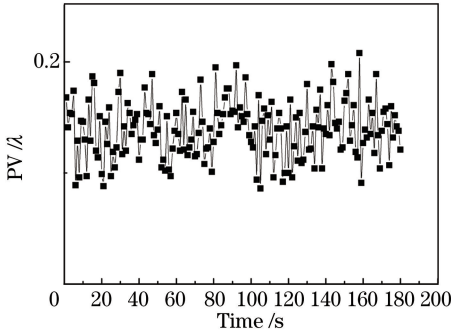


图 6 180 s 内总静态波前变化

Fig. 6 Total static wavefront variation within 180 s

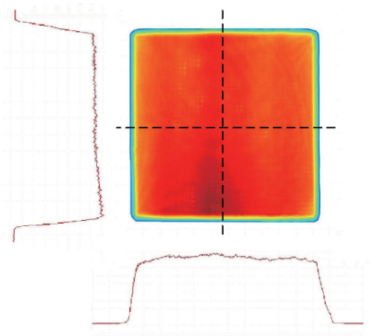


图 7 抽运光斑分布

Fig. 7 Pump light spot distribution

在抽运没有工作的情况下,将加热温度控制为  $70\text{ }^\circ\text{C}$ ,钕玻璃片产生的波前畸变如图 8 所示。从图中可以看到,在只有加热的情况下,钕玻璃片边缘温度高,中心温度低,钕玻璃片呈现负透镜效应,波前畸变 PV 值约为  $0.835\lambda$ 。从图中也可以发现,波前畸变分布不均匀,这说明加热器对钕玻璃加热的过程并未实现均匀加热,这对热波前畸变补偿可能会产生一定影响。

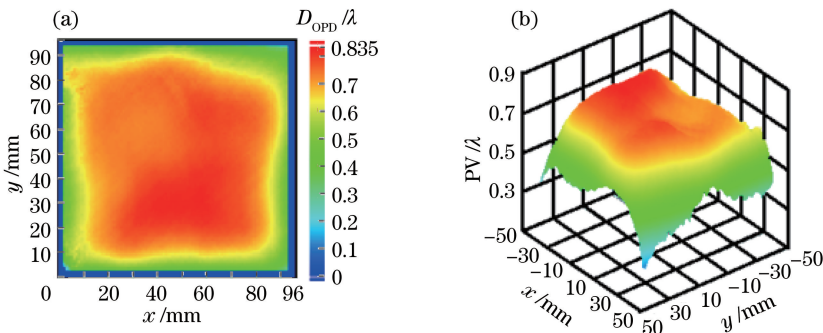


图 8 无抽运边缘温度为  $70\text{ }^\circ\text{C}$  时钕玻璃的波前畸变。(a) 二维;(b) 三维

Fig. 8 Wavefront distortion of the Nd:glass with edge temperature of  $70\text{ }^\circ\text{C}$  without pumping.

(a) Two-dimension; (b) three-dimension

#### 4.2 边缘加热对波前畸变的影响

在没有加热条件下,增大抽运源抽运电流,使得钕玻璃的产热率为  $0.6\text{ W/cm}^3$ ,此时钕玻璃产生的热波前畸变如图 9 所示。从图中可以看到钕玻璃产生的热波前畸变为  $1.2\lambda$ ,呈轴对称性,而且最大热波前畸变出现在钕玻璃片 4 个顶角处,这是因为钕玻璃片边界受到约束,在顶角处应力集中从而产生大的热波前畸变。

在同样的产热率下,增加钕玻璃片的边缘温度,在每个温度点,待热波前畸变稳定后进行测试,钕玻璃片产生的热波前畸变随边缘温度的变化如图 10(a)所示。随着温度的升高,钕玻璃产生的热波前畸变逐渐减小,加热温度达到  $90\text{ }^\circ\text{C}$  时,它达到最小值,为  $0.634\lambda$ ,如图 10(b)所示。实验结果与理论计算有些偏差,初步判断有两个方面原因,一是钕玻璃边缘与加热结构间存在热阻,钕玻璃实际边缘温度小于加热温度;二是加热不均匀,不能完全对热波前畸变进行补偿,因此补偿后测得的热波前畸变要大于理论计算值。当温度加热到  $100\text{ }^\circ\text{C}$  以上时,热波前畸变出现增大,这是因为当边缘温度超过钕玻璃中心温度时,钕玻璃片边缘处对波

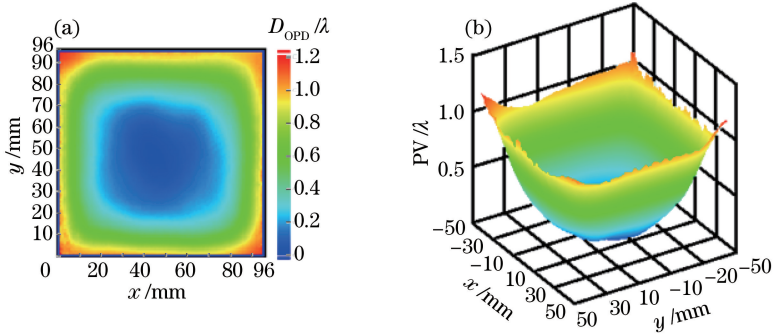


图 9 没有加热条件下热沉积为  $0.6 \text{ W/cm}^3$  时钕玻璃的热波前畸变。(a)二维；(b)三维

Fig. 9 Wavefront distortion of the Nd:glass with heat deposition of  $0.6 \text{ W/cm}^3$  without edge heating.

(a) Two-dimension; (b) three-dimension

前畸变的贡献开始超过中心位置的波前畸变,即出现波前反转,如图 11 所示。注意到,在钕玻璃的其中一个顶角处出现较大畸变,这是加热不均匀引起的,但可以看到在 95% 以上的抽运面积内能实现比较好的补偿效果。

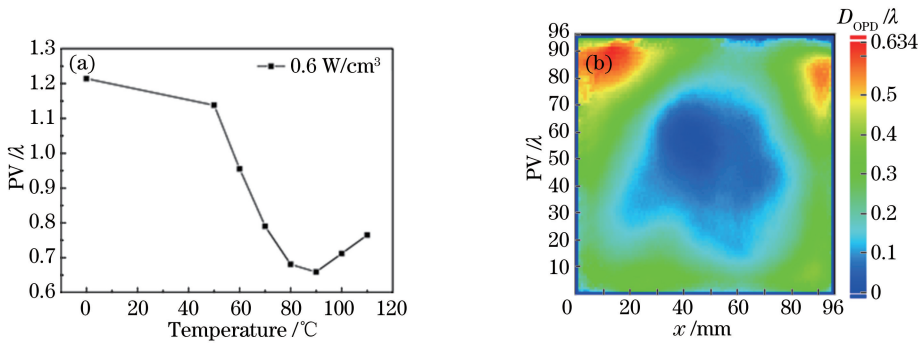


图 10 热沉积为  $0.6 \text{ W/cm}^3$  时(a)不同加热温度条件下和(b)加热温度为  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  时钕玻璃热波前畸变

Fig. 10 Wavefront distortion of the Nd:glass with heat deposition of  $0.6 \text{ W/cm}^3$  (a) under different edge heating

temperatures and (b) at the edge heating temperature of  $90 \text{ }^\circ\text{C}$

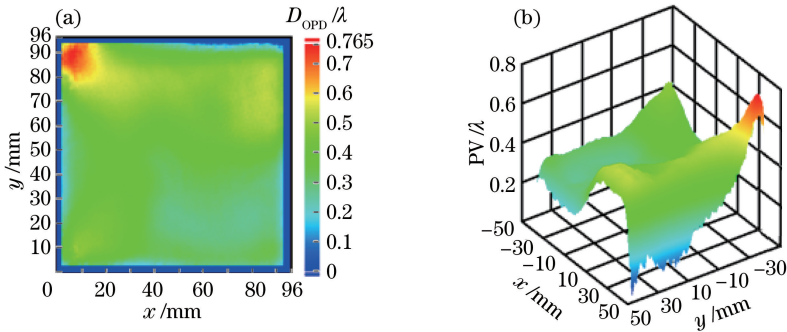


图 11 加热温度为  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  时钕玻璃热波前畸变。(a)二维；(b)三维

Fig. 11 Wavefront distortion of the Nd:glass slab when the edge heating temperature is  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ .

(a) Two-dimension; (b) three-dimension

## 5 结 论

在 LD 抽运气冷钕玻璃激光放大器中,理论上分析了钕玻璃产生的热波前畸变在不同边缘温度下的变化趋势,实验中采用热流道加热器对钕玻璃边缘进行温度控制,在不同加热温度下对钕玻璃片产生的热波前畸变做了测试和分析。实验结果表明,在产热为  $0.6 \text{ W/cm}^3$  时,热波前畸变随钕玻璃片边缘温度的升高而降低。当加热温度达到  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  时,热波前畸变开始出现反转,随温度增加而增加,因此边缘温度存在最优点。

但在加热过程中不能完全做到均匀加热,出现了局部热波前畸变不能补偿的现象。在未来工作中,可以通过优化改进边缘加热结构,来有效抑制气冷钕玻璃放大器的热波前畸变。

## 参 考 文 献

- [1] Gonçalves-Novo T, Albach D, Vincent B, *et al.* 14 J/2 Hz Yb<sup>3+</sup>:YAG diode pumped solid state laser chain[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 855-866.
- [2] Caird J A, Agrawal V, Bayramian A, *et al.* Nd:glass laser design for laser ICF fission energy (LIFE)[J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 56(2): 607-617.
- [3] Cui Wenda, Han Kai, Wang Hongyan, *et al.* Recent advances of diode-pumped thin disk laser[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(4): 387-393.  
崔文达, 韩 凯, 王红岩, 等. 半导体泵浦盘片激光器的技术发展[J]. *激光与红外*, 2016, 46(4): 387-393.
- [4] Huang W F, Wang J F, Lu X H, *et al.* A highly stable laser diode pumped cryogenic Yb:YAG nanosecond regenerative amplifier[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(3): 035804.
- [5] Xiao K B, Yuan X D, Yan X W, *et al.* Efficient ASE control in cryogenic gas cooled Yb:YAG multislabs amplifiers with Cr<sup>4+</sup>:YAG interlayers[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(3): 035003.
- [6] Chanteloup J C, Albach D, Lucianetti A, *et al.* Multi kJ level laser concepts for HiPER facility[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244(1): 012010.
- [7] Banerjee S, Ertel K, Mason P D, *et al.* High-efficiency 10 J diode pumped cryogenic gas cooled Yb:YAG multislabs amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2175-2177.
- [8] Bayramian A, Armstrong P, Ault E, *et al.* The mercury project: a high average power, gas-cooled laser for inertial fusion energy development[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 52(3): 383-387.
- [9] Banerjee S, Mason P D, Ertel K, *et al.* 100 J-level nanosecond pulsed diode pumped solid state laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2089-2092.
- [10] Siebold M, Roeser F, Loeser M, *et al.* PEnELOPE: a high peak-power diode-pumped laser system for laser-plasma experiments[C]. *SPIE*, 2013, 8780: 878005.
- [11] Novák O, Miura T, Smrž M, *et al.* Status of the high average power diode-pumped solid state laser development at HiLASE[J]. *Applied Sciences*, 2015, 5(4): 637-665.
- [12] Huang Wenfa, Li Xuechun, Wang Jiangfeng, *et al.* Theoretical and experimental investigations on wavefront distortion and thermal-stress induced birefringence in a laser diode pumped helium gas-cooled multislabs Nd:glass laser amplifier [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 087801.  
黄文发, 李学春, 王江峰, 等. 激光二极管抽运氦气冷却钕玻璃叠片激光放大器热致波前畸变和应力双折射的数值模拟和实验研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(8): 087801.
- [13] Zhang Xiang, Su Likun, Cai Qing. Analysis of thermal effect and experimental test of beam wavefront aberration in all solid-state Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 802-807.  
张 翔, 苏礼坤, 蔡 青. 全固态 Nd:YAG 激光器热效应及输出光束波前像差分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 802-807.
- [14] Qu Pengfei, Wang Shiyu, Guo Zhen, *et al.* Analysis of interaction between thermal effect and pump optical field distribution in high power solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1114002.  
屈鹏飞, 王石语, 过 振, 等. 高功率固体激光器中抽运光和热效应的相互作用分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1114002.