

# 基于空间载频干涉的薄片激光晶体热畸变测量

张元昊, 朱广志\*, 高佳鹏, 王牧, 陈永骞, 谭天, 彭程, 朱晓

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 采用空间载频干涉方法在精确测量薄片激光晶体热畸变的基础上, 深入研究了射流冲击冷却系统对薄片激光晶体热畸变的影响。实验结果表明, 射流冲击冷却系统引起薄片激光晶体的畸变主要是球面形变。随着抽运功率的增加, 薄片激光晶体的热畸变越发严重, 在抽运区中心部分, 以球面形变为主, 其光焦度随抽运功率的增加呈线性下降。而在抽运区的边缘, 以非球面形变为主, 抽运功率越高, 非球面畸变就越严重。给出了 493 W 抽运条件下热畸变的波前畸变曲线, 其均方根的重复测量精度为 1.153 nm。实验结果与理论分析结果相符, 该研究为薄片固体激光器谐振腔的设计和热畸变的补偿提供了重要依据。

**关键词** 激光器; 热畸变; 空间载频干涉; 薄片激光器; 射流冲击冷却

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0404010

## Thermo-Optical Aberration Measurement of Thin-Disk Laser Crystal Based on Spatial Carrier Interferometry

Zhang Yuanhao, Zhu Guangzhi\*, Gao Jiapeng, Wang Mu,

Chen Yongqian, Tan Tian, Peng Cheng, Zhu Xiao

*School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China*

**Abstract** A spatial carrier interferometry method is used for the thermo-optical aberration measurement of a thin-disk laser crystal, and the influence of jet impingement cooling system on the thermo-aberration of the thin-disk laser crystal is studied in detail. The experimental results show that the distortion of the thin-disk laser crystal caused by the jet impingement cooling system is mainly spherical deformation. As the pumping power increases, the thermo-aberration of the thin-disk laser crystal becomes worse. In the center of the pumping spot, the thermo-aberration is mainly spherical and the dioptric power decreases linearly with the increase of pumping power. In contrast, on the edge of the pumping spot, the thermo-aberration is mainly aspherical and the aspherical distortion becomes worse with the increase of pumping power. The wavefront distortion curve under a pumping power of 493 W is presented and the repeatable measurement precision of its root-mean-square is 1.153 nm. The experimental results show a good consistency with the results of theoretical analysis. It provides an important reference for the design of a stable resonator and the compensation of thermo-aberration for a disk solid-state laser.

**Key words** lasers; thermo-aberration; spatial carrier interferometry; thin-disk laser; jet impingement cooling

**OCIS codes** 140.3580; 140.3615; 140.6810; 120.3180

## 1 引 言

热效应是制约固体激光器实现高平均功率、高转换效率和高光束质量输出的主要因素。薄片激光器以其薄片状的外型结构和垂直封装的散热方式, 使得激光晶体内部产生的废热高效地移出, 极大地

降低了温度及热效应对激光增益介质的影响<sup>[1]</sup>。目前, 薄片激光器可获得 34 kW 连续光输出<sup>[2]</sup>, 且商用化薄片激光器已能获得 16 kW 的连续输出<sup>[3]</sup>, 其中单薄片已实现 10 kW 多模、4 kW 基模的激光输出。实验室研究的皮秒脉冲激光器已能获得 1 kW 平均功率、200 mJ 脉冲能量的输出<sup>[4]</sup>, 并成为工业

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-01-07; 录用日期: 2019-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(61475057)、华中科技大学自主创新基金(2016YXMS213)

\* E-mail: zgzlaser@hust.edu.cn

界、科研领域的主要激光光源<sup>[5]</sup>。

虽然薄片激光器相对于传统的块状和棒状激光器具有明显的优势,但是其热效应及热效应所引起热畸变仍是影响激光器输出光束质量和限制其输出功率进一步提高的主要因素之一<sup>[6]</sup>。国内外的相关科研团队也开展了大量针对这类薄片状激光增益介质热畸变的理论与实验研究,分析了其热畸变产生的原因及危害,并给出了相关的抑制手段<sup>[6-10]</sup>。2010年,Sazegari等<sup>[7]</sup>利用 Monte Carlo 光线追迹法结合有限元分析法仿真得到了连续抽运条件下薄片晶体光程差(OPD)分布,提出薄片晶体温度梯度分布导致的晶体膨胀和热沉弯曲是热畸变的主要来源。在此基础上,Zhu等<sup>[8-9]</sup>采用解析法结合有限元分析法对薄片激光晶体的热畸变进行了深入分析,给出了不同抽运功率、不同抽运光斑分布等因素下热畸变的分布,并讨论了热畸变的球面项和非球面项产生的原因及危害。总的来说,薄片晶体总的 OPD 来自于热光效应、轴向热膨胀、弹光效应和晶体后表面的形变这 4 个部分,并可分解为球面项和非球面项。球面项主要影响谐振腔的动态稳定范围;非球面项则会引起衍射损耗,导致输出激光光束质量的降低。利用腔内变形镜来补偿热畸变非球面量<sup>[10]</sup>是获得高功率、高光束质量激光输出的重要手段。

在实验层面,准确地获取薄片晶体的热畸变对谐振腔的设计和热畸变的补偿提供了必要的支撑。目前,针对薄片激光器热畸变的检测主要有波前检测和干涉测量两种方式,其中,用于对薄片激光增益介质热畸变进行检测的哈特曼波前传感器具有结构紧凑、使用方便、能对波前的即时分布进行检测及可有效规避环境振动影响的优点。2013年,Miura等<sup>[11]</sup>利用哈特曼波前传感器成功规避了环境振动,并获得脉冲抽运下的薄片晶体波前畸变分布。但该测量仪器存在价格昂贵、空间分辨率低和闭环测量控制系统过于复杂的缺点。相对于波前传感器,干涉检测具有较高的空间分辨率。Perchermeier等<sup>[12]</sup>利用相移干涉方法精确地测量了薄片激光晶体热畸变的分布,检测结果与现有理论结果基本一致,为热畸变的补偿提供了重要的设计依据。然而,相移干涉的测量技术对外界环境的振动非常敏感,并且会对压电陶瓷的位移精度带来误差,使得在薄片激光器的测量中,热畸变测量的重复测量精度受到了影响。

为了同时达到薄片激光晶体热畸变测量中高空间分辨率和较好的抗振动效果,本文采用空间载频干涉法,针对具有多程抽运结构的薄片激光器开展了薄片激光晶体热畸变特性的精确测量,检测结果的均方根(RMS)的重复测量精度达到 1.153 nm。同时分析了薄片激光晶体射流冲击冷却系统对薄片激光晶体初始面形的影响,以及不同抽运功率条件下薄片激光晶体热畸变的变化特性。实验表明,薄片激光晶体背面的射流冲击冷却系统在有效散热的同时,对薄片晶体初始面形的影响主要表现为球面项。随着抽运功率的不断增大,薄片激光晶体热畸变越来越明显,球面项畸变主要分布在抽运中心区域,且光焦度不断下降,而非球面项畸变主要分布在抽运区边缘。这些实验数据为谐振腔的设计和热畸变的补偿提供了有利支撑。

## 2 基本原理

图 1 为利用空间载频干涉法、结合  $4f$  ( $f$  表示焦距)共轭成像系统所构建的多程抽运薄片激光器激光增益介质热畸变测量装置示意图。图 1(a)为干涉测量光路,用以检测薄片激光晶体的面形特性。薄片激光晶体为厚度范围在  $200 \sim 300 \mu\text{m}$  的 Yb:YAG。一方面,为了提高激光晶体对抽运光的吸收效率及抽运光空间分布的均匀性,采用双抛物面共轭抽运结构<sup>[13]</sup>,如图 1(b)所示;另一方面,为高效地带走抽运下激光晶体产生的废热,此激光晶体被焊接在金属热沉上,并利用冷却液射流冲击冷却,如图 1(c)所示。在本干涉测量结构中,为了降低射流冲击冷却带来的微小振动的影响,采用了结合  $4f$  共轭系统的马赫泽德干涉光路。图 1(a)中,L1 与 L2 为  $4f$  系统,高反镜 HR1 为参考镜,高反镜 HR2、HR3 用来折叠光路,BPF 为带通滤光片。扩束后的激光束经分束镜 BS1 分束后构成检测(绿线)和参考(红线)光路,检测光束经过被测量的薄片激光晶体后与参考光路的光束在分束镜 BS2 合束,最终在电荷耦合器件(CCD)相机处形成干涉条纹。CCD 上测量的干涉光强分布可表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\Delta\varphi(x, y)], \quad (1)$$

式中: $(x, y)$ 表示中心区域内点的坐标; $a(x, y)$ 表示该点的平均光强; $b(x, y)$ 为该点的调制度; $\Delta\varphi(x, y)$ 为该点的相位差; $I(x, y)$ 为该点的光强。

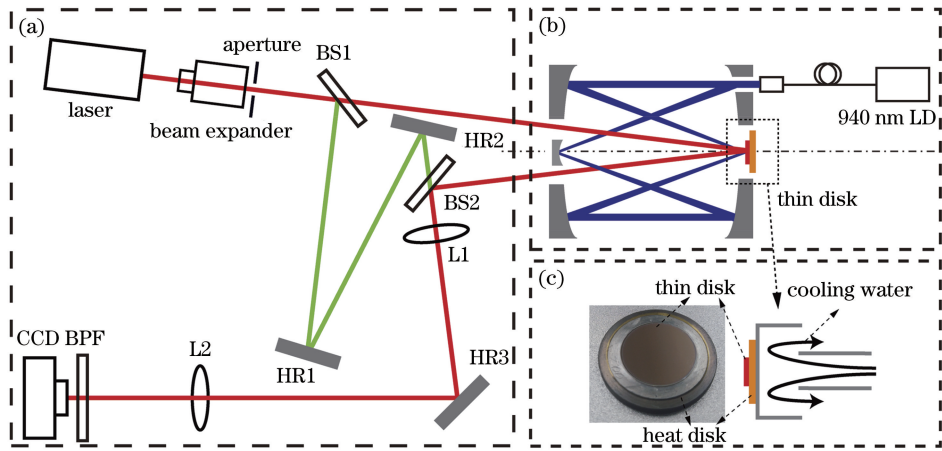


图 1 用于热畸变检测的空间载频干涉结构示意图。(a)空间载频干涉光路;(b)多程抽运结构;(c)薄片激光晶体  
Fig. 1 Schematic of spatial carrier interferometry for thermo-aberration measurement. (a) Light path of spatial carrier interferometry; (b) multi-pass pumping scheme; (c) thin-disk laser crystal

采用空间载频干涉方法以提高干涉条纹动态测量的能力,通过微调参考镜 HR1 使参考光束倾斜一个微小的角度  $\theta$ ,则此时 CCD 上的光强分布可表示为

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \cdot \exp(j2\pi\mu_1 x) + c^*(x, y) \cdot \exp(-j2\pi\mu_1 x), \quad (2)$$

式中: $c(x, y) = b \exp[j\Delta\varphi(x, y)]/2$ ;  $c^*(x, y) = b \exp[-j\Delta\varphi(x, y)]/2$ ; 参数  $\mu_1 = \sin \theta / \lambda$ ,  $\lambda$  为检测激光的波长。

取合适的  $\mu_1$  值,在对(2)式进行二维傅里叶变换后,可在频谱上分离正负一级,从中分离出  $C(\mu - \mu_1, \nu)$ ,其中  $C(\mu, \nu)$  为  $c(x, y)$  的傅里叶变换

结果,将其移至频谱中心并对其做二维傅里叶逆变换可得到  $c(x, y)$ ,进而得到相位差分布为

$$\Delta\varphi(x, y) = \text{Im}\{\lg[c(x, y)]\}. \quad (3)$$

对(3)式中的相位差进行解包络运算,可得到连续的相位差分布。

图 2 给出了采用空间载频干涉方法测量薄片激光器面形的流程图。第一步,搭建实验装置并采集薄片激光晶体的空间载频干涉图;第二步,对此单幅干涉图做二维傅里叶变换;第三步,取频谱图中相应的正一级做傅里叶逆变换后按(3)式计算、并解包络,即可得到激光晶体的波前分布。测量薄片激光晶体波前分布的过程中,仅需要采集一幅干涉条纹

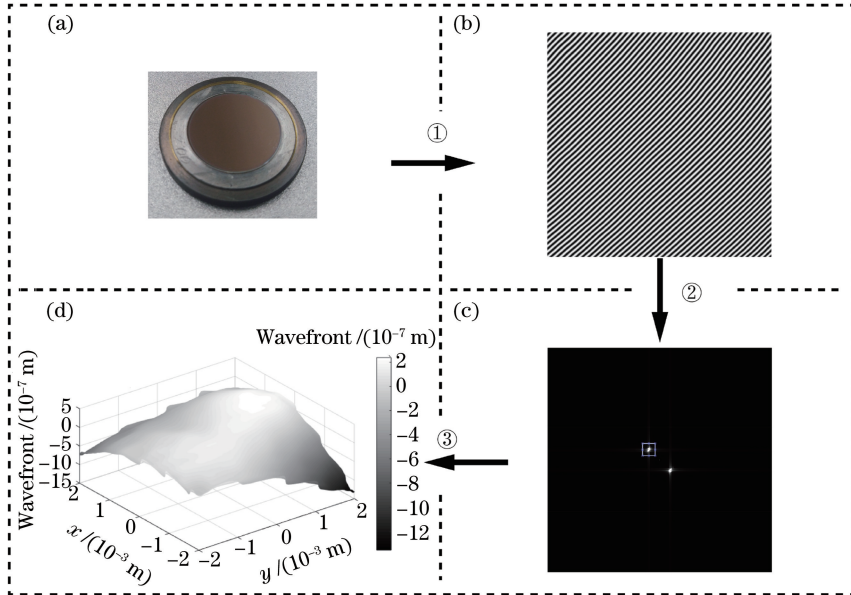


图 2 空间载频干涉计算示意图。(a)薄片激光晶体;(b)单幅载频干涉图;(c)频谱图;(d)波前图  
Fig. 2 Calculation diagram of spatial carrier interferometry. (a) Thin-disk laser crystal; (b) single interferogram with spatial carrier; (c) spectrum; (d) wavefront



图进行计算,因此空间载频干涉法可有效规避环境振动对检测结果的干扰。

### 3 实验及结果

#### 3.1 检测平台搭建

图 3 给出了测量薄片激光晶体热畸变的实验装置图,所测量的 Yb:YAG 晶体的厚度为 275  $\mu\text{m}$ ,直径为 10 mm,掺杂浓度(原子数质量分数)为 10%,焊接于铜热沉上,热沉厚度为 1.5 mm,并由 20  $^{\circ}\text{C}$  的冷却水在 13.5 L/min 流速下冲击冷却热沉。为提高抽运光斑的均匀性,940 nm 半导体激光光源被耦合至 400  $\mu\text{m}$  的方形匀化光纤后,经准直进入双抛物面共轭多程抽运中,实现 48 程抽运,此时近 98% 的抽运功率被吸收,并最终在薄片激光晶体内形成了 4 mm 的均匀抽运的正方形光斑。为了避免 Yb:YAG 激光晶体对测量激光的吸收,采用 532 nm 的半导体激光器作为干涉光源,经 10 倍扩束镜准直后,获得直径为 10 mm 的圆形探测光斑。此探测光经 BS1 分束后,一束作为参考光束,经 HR1 和 HR2 镜传输至 BS2 镜,另一束激光经过薄片激光晶体反射后传输至 BS2 镜,两束激光经过 BS2 镜后,进行合束并产生干涉条纹,并通过 L1、L2 组成的 4f 共轭成像系统成像到 CCD1 表面(其中 L1、L2 的焦距都为 30 cm, BPF 为对可见光高透的有色玻璃滤光片)。与此同时,使用 CCD2 和红外热像仪(Testo 890-2, Testo 公司,德国)检测抽运光强空间分布和温度场的空间分布。红外热像仪可在非接触的条件下精确检测薄片激光晶体表面温度场的空间分布。CCD 相机(UI-1240ML-M-GL, IDS 公司,德国)的分辨率为 1280 pixel  $\times$  1024 pixel,像素尺寸为

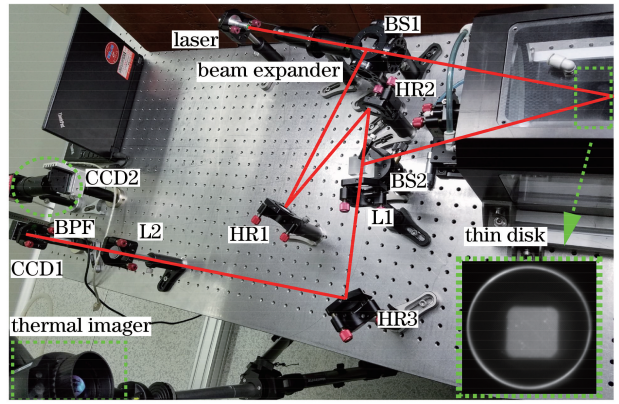


图 3 干涉检测实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for interference detection

5.3  $\mu\text{m}$ ,曝光时间设置为 9  $\mu\text{s}$ 。

#### 3.2 射流冲击水冷对检测的影响

基于所搭建的载频干涉测量系统,研究了射流冲击冷却水对薄片激光晶体面形的影响。图 4 给出了在射流冲击冷却系统开关前后,每隔 5 s、测量 7 组面形参数的结果。图 4(a)、(b)分别为薄片激光晶体的描述球面项的光焦度和描述非球面项的 RMS 的测量数据。实线、虚线分别对应开启射流冲击冷却系统前、后的测量数据的平均值。可以看出,薄片激光晶体在加载射流冲击冷却水前,具有正光焦度的特性,当开启射流冲击冷却系统后,薄片激光晶体的光焦度下降了 0.0308  $\text{m}^{-1}$ ,变成了负的光焦度,可见,射流冲击冷却系统的压力会导致薄片激光晶体弯曲,使其具有负透镜的效应。另一方面,薄片激光晶体的非球面项 RMS 值的变化量为 0.94 nm,远小于 RMS 的值。测量结果说明,射流冲击冷却系统对薄片激光晶体面形的影响主要是球面变形,而对非球面的畸变影响较小,符合薄板弯曲理论<sup>[14]</sup>。

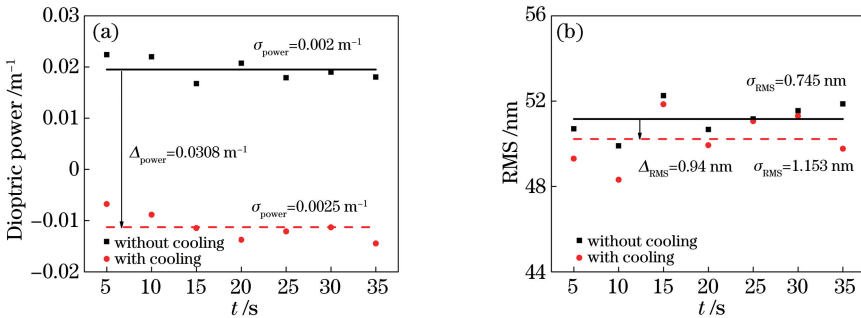


图 4 冷却前后测量结果。(a)光焦度;(b) RMS

Fig. 4 Measurement results before and after cooling. (a) Dioptric power; (b) RMS

同时,利用图 4 中测量结果的均方差值评价载频干涉测量系统的重复测量精度。开启射流冲击冷却系统前,薄片激光晶体的光焦度的均方差( $\sigma_{\text{power}}$ )

为 0.002  $\text{m}^{-1}$ 、RMS 值的均方差( $\sigma_{\text{RMS}}$ )为 0.745 nm;开启射流冲击冷却系统后,薄片激光晶体的光焦度的均方差为 0.0025  $\text{m}^{-1}$ 、RMS 值的均方差为



1.153 nm。可以看出,射流冲击冷却系统开启后,会增加薄片晶体的微抖动,导致薄片激光晶体的光焦度和 RMS 值的均方差均增加。但是,薄片激光晶体的光焦度和 RMS 值的均方差值依旧较小。这也证明,利用空间载频干涉可有效减小射流冲击冷却带来的振动对检测的干扰,抗振动能力和测量精度均高于四步相移干涉。

### 3.3 热畸变检测结果与分析

图 5 给出了薄片激光晶体的热畸变沿径向的分布曲线。图 5(a)为薄片激光晶体的波前畸变随抽运功率的增加而变化的曲线。以未加载抽运光状态下测量波前为参考,相同抽运电流下测量 7

次并计算平均值。可以看出,薄片激光晶体的波前畸变随着抽运功率的增加而不断增加。图 5(b)给出了薄片激光晶体在 493 W 抽运功率下的 OPD 分布曲线,其中实线为总的 OPD,红色虚线为 OPD 球面项,蓝色点划线为 OPD 非球面项。由图可见,抽运光斑的中心主要表现为球面畸变,而抽运区边缘表现为非球面畸变,且越靠近抽运区边缘,非球面畸变越严重。实验所获得的薄片激光晶体波前畸变的测试曲线与文献[6]中理论计算的结果、文献[12]中检测的结果均一致,对总的 OPD 分解而得到的球面量、非球面曲线与文献[8]中仿真结果一致。

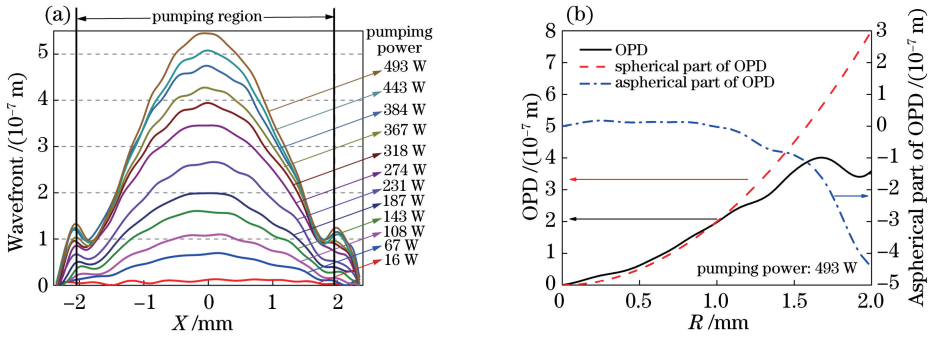


图 5 薄片激光晶体热畸变分布。(a)不同抽运功率下波前畸变分布;(b)493 W 抽运功率下 OPD 分布

Fig. 5 Thermo-aberration distributions of thin-disk laser crystal. (a) Wavefront aberration distributions under different pumping powers; (b) OPD distributions under 493 W pumping power

图 6 给出了薄片激光晶体抽运光中心不同区域波前畸变的球面项光焦度和非球面项 RMS 值随抽运功率的增加而变化的曲线。可以看出,随着抽运功率的不断增大,薄片晶体的温度呈现线性升高的趋势,且波前畸变中描述的球面项的光焦度不断减小,并表现为线性下降的趋势。同时,抽运光斑不同区域光焦度的变化不同,越接近抽运光斑中心,光焦度的变化斜率越大。这对薄片激光器谐振腔设计中

模式匹配和稳区宽度的设计有着至关重要的影响。另一方面,表征薄片激光晶体的波前畸变非球面项的 RMS 值则随着抽运功率的增加而增加,且越远离抽运区中心,RMS 值的变化斜率越大。测量数据说明在抽运光斑中心,薄片晶体的热畸变主要是球面项,可以通过谐振腔的设计进行有效补偿;相反,越靠近抽运光斑边缘,非球面畸变越严重,对谐振腔内振荡的激光衍射损耗就越发明显。

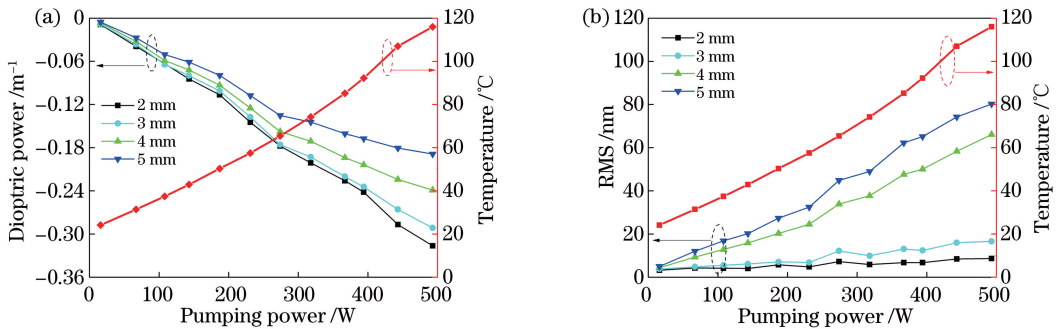


图 6 薄片热畸变随抽运功率的变化。(a)光焦度;(b) RMS

Fig. 6 Thermo-aberration of thin disk versus pumping power. (a) Dioptric power; (b) RMS

## 4 结 论

采用空间载频干涉法对薄片激光器增益介质的热畸变进行测量,深入研究了射流冲击冷却系统对薄片激光晶体产生的形变和冲击振动,以及薄片激光晶体热畸变的变化特性。实验结果表明,采用空间载频干涉法可有效规避环境振动的影响,检测结果的RMS值为1.153 nm。另一方面,射流冲击冷却系统对薄片激光晶体的畸变影响较小,且主要为球面形变。随着抽运功率的不断增加,薄片激光晶体的热畸变愈发明显,在抽运区中心主要为球面变形,越靠近抽运区边缘,非球面畸变越严重,其中,在493 W抽运功率下薄片激光晶体波前畸变的光焦度为 $-0.2391\text{ m}^{-1}$ ,RMS值为66.075 nm。实验结果对薄片激光器的谐振腔的设计及热畸变的补偿有着重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Giesen A, Speiser J. Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 598-609.
- [2] Gan Q J, Jiang B X, Zhang P D, *et al.* Research progress of high average power solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010003.  
甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010003.
- [3] Schad S S, Gottwald T, Kuhn V, *et al.* Recent development of disk lasers at TRUMPF [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9726: 972615.
- [4] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, *et al.* 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [5] Han L M, Cai D T, Zhang Y P, *et al.* Influence of laser-arc distance on joint of 304 stainless steel by laser-MIG hybrid welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061407.  
韩丽梅, 蔡得涛, 张宇鹏, 等. 光丝间距对304不锈钢激光-MIG复合焊接接头影响的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061407.
- [6] Mende J, Schmid E, Speiser J, *et al.* Thin disk laser: power scaling to the kW regime in fundamental mode operation[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7193: 71931V.
- [7] Sazegari V, Milani M R J, Jafari A K. Structural and optical behavior due to thermal effects in end-pumped Yb:YAG disk lasers[J]. Applied Optics, 2010, 49(36): 6910-6916.
- [8] Zhu G Z, Zhu X, Wang M, *et al.* Analytical model of thermal effect and optical path difference in end-pumped Yb:YAG thin disk laser [J]. Applied Optics, 2014, 53(29): 6756-6764.
- [9] Zhu G Z, Zhu X, Dai Z X, *et al.* Analytical model of optical path difference in an end-pumped Yb:YAG thin-disk laser with nonuniform pumping light [J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 3024-3031.
- [10] Piehler S, Weichelt B, Voss A, *et al.* Power scaling of fundamental-mode thin-disk lasers using intracavity deformable mirrors [J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5033-5035.
- [11] Miura T, Chyla M, Smrč M, *et al.* *In-situ* optical phase distortion measurement of Yb:YAG thin disk in high average power regenerative amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8603: 860303.
- [12] Perchermeier J, Wittrock U. Precise measurements of the thermo-optical aberrations of an Yb:YAG thin-disk laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2422-2424.
- [13] Huang Y, Zhu X, Zhu G Z, *et al.* A multi-pass pumping scheme for thin disk lasers with good anti-disturbance ability [J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4605-4613.
- [14] Ventsel E, Krauthammer T. Thin plates and shells: theory, analysis and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.