

文章编号: 0258-7025(2007)04-0511-04

# 侧面抽运板条激光介质动态热畸变 测量方法

刘 佳<sup>1,2</sup>, 付文强<sup>1</sup>, 胡企铨<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 研究了基于干涉测量激光介质热畸变的原理, 利用 CCD 摄像机记录干涉条纹并通过计算机图像处理, 来测量板条激光介质动态热畸变的方法。对采集得到的干涉条纹进行图像处理, 提出了一种简单快速提取条纹中心的算法。通过分析、计算干涉条纹的移动, 得到抽运过程中板条激光介质的动态热畸变情况, 为动态补偿激光介质热效应提供了可能。实验采用了 N31 磷酸盐激光玻璃作样品, 得到了加热过程中激光玻璃内部的温度分布, 误差约为 3%, 验证了该测量方法的可行性。

**关键词** 激光技术; 侧面抽运板条激光介质; 热畸变; 干涉条纹

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Dynamic Thermal Abberation Measurement of Side-Pumped Slab Laser Medium

LIU Jia<sup>1,2</sup>, FU Wen-qiang<sup>1</sup>, HU Qi-quan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** Based on the measurement theory of laser medium thermal abberation with interference fringe, a method is proposed to measure the dynamic thermal abberation of slab laser medium. The interference fringe is recorded by charge coupled device (CCD) cameral and then processed by computer. With analysis of the interference fringe, a simple and rapid algorithm to extract the center of interference fringe is proposed. The dynamic thermal abberation of slab laser medium in pumping process by analyzing and calculating the movement of interference fringes is obtained, which paves the way to dynamically compensating the thermal effect of the laser medium. In experiments, N31 phosphate laser glass is used as the sample, and the interior temperature distribution during heating procedure is obtained. The relative error is about 3%, and the validity of the method is proved.

**Key words** laser technique; side-pumped slab laser medium; thermal aberration; interference fringe

## 1 引言

激光工作物质热畸变一直是激光器获得高光束质量、高输出功率的最大障碍。与传统灯抽运的固体激光器(DPL)相比, 高效率的半导体激光二极管(LD)抽运的固体激光器体积小、寿命长、可靠性好, 已成为激光领域的研究热点并在各方面得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。虽然抽运激光二极管的发光谱线与激光晶

体的吸收谱线重合很好, 但是由于量子亏损、非辐射跃迁等原因导致的激光介质热沉积依然存在, 在外界强迫冷却的条件下依然会在激光介质内产生温度梯度, 从而在激光介质内形成应力场。温度场和应力场所引起的热透镜效应和热致双折射将共同导致激光器输出光束的热畸变<sup>[2]</sup>。为了充分、深入地了解激光介质的动态热畸变, 并对其进行有效补偿, 实时有效地检测激光介质的热畸变, 对提高重复率、高

收稿日期: 2006-08-24; 收到修改稿日期: 2006-12-20

作者简介: 刘 佳(1982—), 女, 江西人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光介质热畸变。E-mail: liujia@mail.siom.ac.cn

导师简介: 胡企铨(1942—), 男, 江苏苏州人, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为高功率全固态激光器。

E-mail: qqhu@mail.shnc.ac.cn

平均功率固体激光器的光束质量十分重要。

目前在固体激光器的热效应研究中,大都通过数值计算和计算机模拟的方法从理论上分析激光介质的稳态温度分布、热焦距、热致双折射等<sup>[3]</sup>,但并不能够准确地得到激光介质的动态热畸变情况。也有采用干涉测量的方法检测由热效应引起的激光介质的热焦距和激光的波面变化<sup>[4]</sup>,但这种方法只能用于探测稳态或单个脉冲抽运情况下的激光介质热效应情况,并不适用于检测抽运产生的动态激光介质的热效应。

本文在已有干涉测量方法检测激光介质热效应的基础上,利用 CCD 摄像机连续采集抽运板条激光介质过程中的干涉条纹的动态移动过程,对所采集的条纹变化图像进行图像处理,提出了一种简单快速提取条纹中心的算法。

## 2 实验装置及原理

### 2.1 实验装置

实验装置为干涉测量激光介质热效应的检测装置,如图 1 所示。采用马赫-曾德尔干涉仪光路,将板条激光介质置于其中一个光学臂中。干涉照明光源为 He-Ne 激光器,经过分光镜分为两束,一束透射光经过板条介质后由全反镜和分光镜反射,另一反射光束经过全反镜和分光镜透射,这两束光在分光镜 10 的半反射面上发生干涉,干涉图样可在观察屏上看到。利用 CCD 摄像机连续拍摄干涉条纹动态变化过程并送入计算机存储。

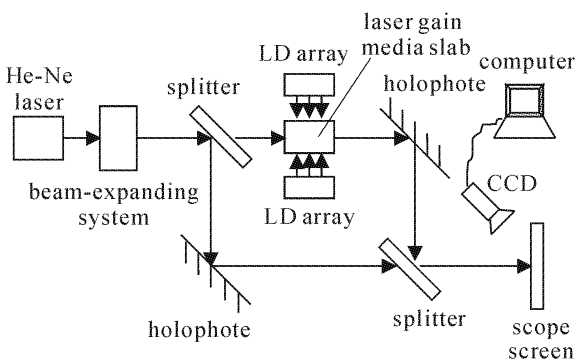


图 1 测试实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

### 2.2 实验原理

由于激光二极管抽运激光介质时产生的温度梯度和热应力将导致激光介质折射率发生变化,而激光介质折射率的变化和热膨胀将使参考光通过激光介质的光程差发生改变,使得干涉条纹发生形变和

移动,利用 CCD 摄像机连续拍摄这些干涉条纹动态变化过程并送入计算机存储<sup>[5,6]</sup>。

如果板条激光介质上下表面抽运均匀,可忽略  $z$  方向上的热梯度,只对  $x$  和  $y$  方向进行热分析,激光二极管抽运结构如图 2 所示。

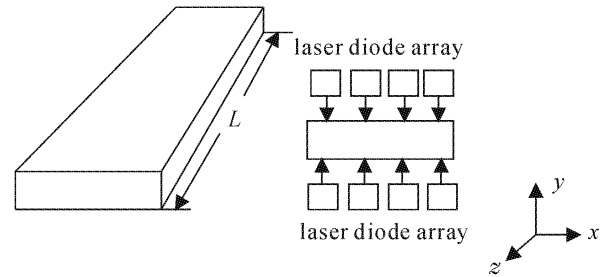


图 2 抽运结构示意图

Fig. 2 Pumping configuration

设板条激光介质的长度为  $L$ ,参考光(He-Ne 激光)的波长为  $\lambda$ ,未抽运时板条激光介质的折射率为  $n_0$ ,截面( $x$ - $y$  平面)上折射率分布为

$$n = n(x, y), \quad (1)$$

对应点  $(x, y)$  的光程差的变化量为  $\Delta l(x, y)$ ,移过的条纹数目为  $\Delta m(x, y)$ 。折射率的变化量为  $\Delta n(x, y)$ ,那么有

$$\Delta l(x, y) = \Delta m(x, y)\lambda, \quad (2)$$

考虑干涉仪两臂的光程差为

$$\Delta S = (n - 1)L, \quad (3)$$

在点  $(x, y)$  处,根据光程差的定义有

$$\Delta m(x, y)\lambda = [n_0 + \Delta n(x, y) - 1](L + \Delta L) - (n_0 - 1)L, \quad (4)$$

式中  $\Delta L$  为温差引起的热形变

$$\Delta L = \alpha L \Delta T, \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\Delta T$  为温度变化。热致折射率变化  $\Delta n(x, y)$  有两个因素的影响:一是增益介质内由于温度梯度引起的折射率变化  $\Delta n_T$ ;二是热应力导致折射率变化  $\Delta n_\sigma$ 。折射率的变化可以写为

$$\Delta n = \Delta n_T + \Delta n_\sigma, \quad (6)$$

但是一般热应力引起的折射率的变化只有前者的  $1/10^{[6]}$ 。假设在温度精度  $0.1^\circ\text{C}$  的条件下,计算得到热应力引起的温度变化仅为  $0.025^\circ\text{C}$ ,故可以忽略热应力的影响,温度梯度引起的折射率变化为

$$\Delta n_T(x, y) = \beta \Delta T(x, y), \quad (7)$$

式中  $\beta$  为温度折射率系数。根据参考光是沿平行于  $z$  轴方向通过激光介质,将(5)~(7)式代入(4)式,可以推导出激光介质横截面上的温度分布

$$\Delta T(x, y) = \frac{\Delta m(x, y)\lambda}{[(n_0 - 1)\alpha + \beta]L}, \quad (8)$$

而在点 $(x, y)$ 处相位的改变量为

$$\Delta\varphi(x, y) = \Delta m(x, y) \cdot 2\pi, \quad (9)$$

通过测得 $\Delta m(x, y)$ 则可知温度分布 $\Delta T(x, y)$ 和相位分布 $\Delta\varphi(x, y)$ 。

### 3 干涉条纹图像处理

为了准确地测得 $\Delta m(x, y)$ , 对干涉条纹图像处理是必须的。这个过程一般包括预处理、二值化、细化条纹等步骤, 最终目的是要提取条纹中心线位置<sup>[7]</sup>。最后根据处理结果进行分析计算, 进行曲线拟合、插值等来提取热畸变面形的波阵面。细化条纹的算法有很多, 例如基于方向模板的细化算法, 典型的如 Hilditch 算法<sup>[8]</sup>, 能够针对各种类型的条纹, 但是处理速度很慢, 而且非常容易产生毛刺; 还有并行处理的细化算法, 处理速度快但是容易产生噪声、分枝断点, 效果也不是很理想。针对在实验中采集到的干涉条纹的形状特点, 提出了一种快速提取条纹中心的算法, 该算法的中心思想就是通过串行扫描干涉条纹图, 确定每个条纹的宽度范围, 在该宽度范围内寻找条纹的中心值, 最后将所有中心值联合在一起, 构成一幅条纹中心图(如图 3 所示)。结果表明条纹中心算法与细化算法相比方便简洁、处理速度快, 而且提取出来的条纹中心线无噪声、无分枝断点, 有利于实验的后续数据处理。

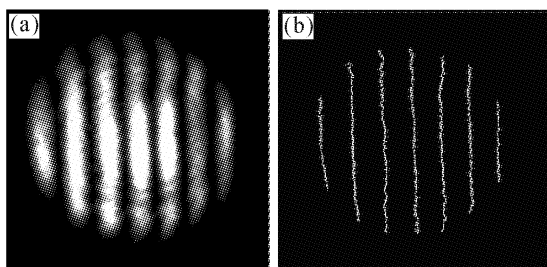


图 3 原始图像(a)和提取的条纹中心线图(b)  
Fig. 3 Original image (a) and fringe center image (b)

### 4 实验验证

为验证实验测量方法的可行性, 在实验中采用光学均匀性好的磷酸盐激光玻璃板条(20 mm×30 mm×10 mm)作为实验样品, 避免由于激光介质本身光学不均匀性带来的测量误差。采用两个半导体致冷片(TEC)粘贴在激光玻璃的两侧面作可控的发热(制冷)源, 模拟激光二极管均匀抽运冷却的板条激光介质产生的热影响。温控电路可控制两个半

导体致冷片的加热(制冷)温度和时间, 可设定成不同的温度, 在板条激光介质中造成人为的温度梯度, 以改变实验条件。通电后半导体致冷片的温度开始逐渐发生改变并可记录, 同时干涉条纹也发生变化。实验中, 在半导体致冷片开始通电的同时 CCD 摄像机以 25 frame/s 的速度连续采集观察屏上的干涉条纹移动的过程, 并通过图像采集卡送入计算机记录。图 4 是在半导体致冷片加热过程中, 不同时刻对应的干涉条纹图。

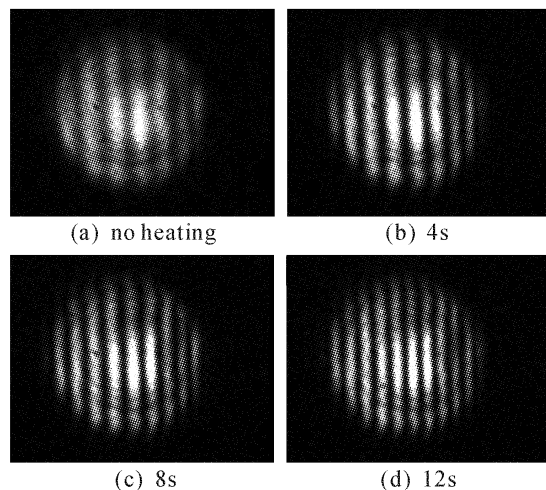


图 4 加热后不同时刻对应的干涉条纹图  
Fig. 4 Interferograms in different time after heating

已知磷酸盐激光玻璃的温度折射率系数 $\beta = -4.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 热膨胀系数 $\alpha = 10.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 折射率 $n_0 = 1.532$ , He-Ne 激光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $\Delta m(x, y)$ 值可以通过对比分析干涉条纹图得到, 将这些值代入(8)式, 可以得到该激光玻璃在热传导过程中, 横截面( $x$ - $y$ 平面)对应的温度分布图, 如图 5 所示。

图 5 中(d)是玻璃达到热稳定时的温度分布图, 实验环境温度为 $22^\circ\text{C}$ 。根据测量温控电路中热敏电阻阻值所对应的温度, 可以得到该时刻玻璃表面的实际温差为 $67.5^\circ\text{C}$ , 计算得出的玻璃两面温度: 较低一面温度为 $-11^\circ\text{C}$ , 较高一面的温度为 $+54.5^\circ\text{C}$ , 两面温差为 $65.5^\circ\text{C}$ , 温差误差在 3% 左右。由于温度改变量跟条纹移动的级数相关, 而条纹移动级数的精确度与条纹的间距是成正比的。故为了提高精确度, 在固定视场内条纹个数应该是越少越好, 但是条纹个数太少就无法真实地反应出实际的热畸变情况, 鉴于以上情况, 在实验初始采集了 6 条干涉条纹。

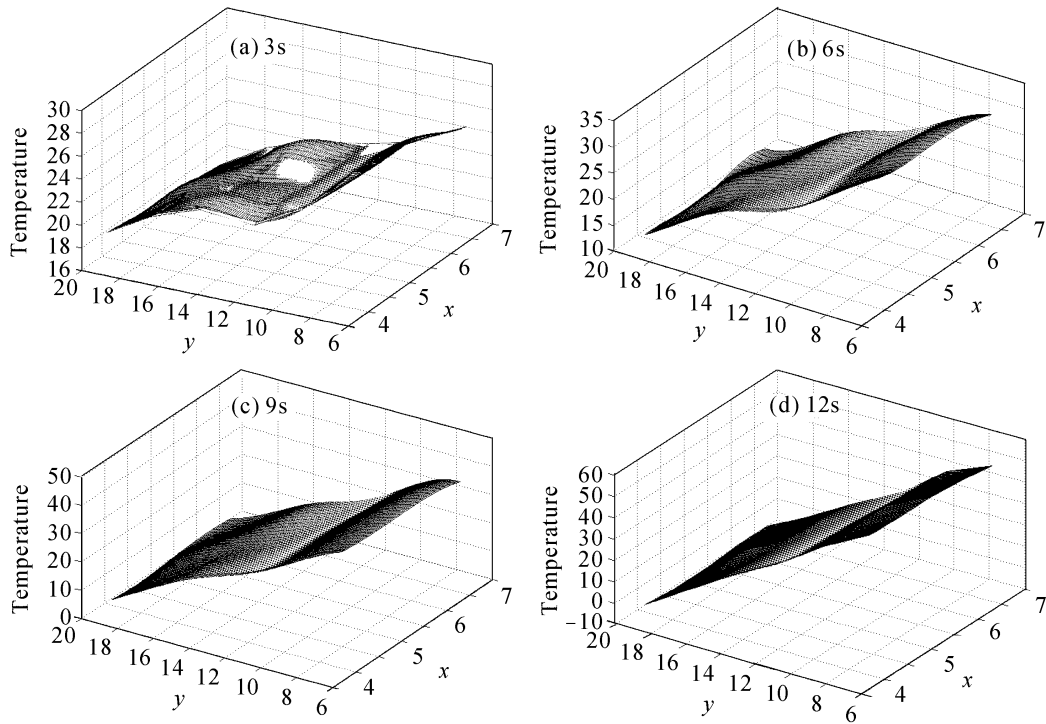


图 5 加热过程中在不同时刻的温度分布图

Fig. 5 Temperature distributions during heating in different time

## 5 结 论

详细地介绍了一种利用马赫-曾德尔干涉仪加 CCD 摄像机动态记录干涉条纹探测激光介质动态热畸变的方法。利用激光玻璃板条作实验样品和半导体致冷片模拟激光二极管抽运源,得到了激光玻璃在受热过程中动态的干涉条纹图和温度分布,验证了该方法的可行性及其测量精度能满足实验的要求。在实际激光二极管抽运板条激光介质的情况下,由于激光二极管面阵发出的光空间分布不会很均匀,激光介质本身的光学不均匀性都会导致干涉条纹并不是均匀的直条纹甚至可能发生扭曲,提高了对干涉条纹图像的处理要求,因此,需要进一步改善条纹细化的算法以满足后续计算的要求。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Ling, Yang Shaochen, Li Wenbo. Study on thermal effects of LD side-pumped Nd:YAG Laser [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(1):37~39  
张 玲,杨少辰,李文博. LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的热效应研究[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(1):37~39
- 2 Walter Koehnner. *Solid-State Laser Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2002. 357

- W. 克希耐尔. *固体激光工程*[M]. 北京:科学出版社, 2002. 357
- 3 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser—Part I: Theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3):289~300
- 4 Luo Bikai, Ni Xiaowu, Zhang Qi *et al.*. Interference measurement of dynamic thermal effect induced by optical pumping of YAG crystal rod [J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(3):179~182  
罗必凯,倪晓武,张 齐等. YAG 激光棒光泵浦动态热效应的干涉测试[J]. *中国激光*, 1993, **A20**(3):179~182
- 5 Huang Guosong, Chen Shizheng. Thermal light character of optical glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 1982, **2**(4):380~384  
黄国松,陈世正. 光学玻璃的热光性质[J]. *光学学报*, 1982, **2**(4):380~384
- 6 Chen Xiaojing, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):854~858  
程小劲,牛金富,徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6):854~858
- 7 Wang Jiawen, Cao Yu. *Image Process Used Matlab 6. 5*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. 166~362  
王家文,曹 宇. *Matlab 6. 5 图形图像处理*[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. 166~362
- 8 Yan Jingzhou, Lei Fan, Zhou Bifang. A method for automatic extracting of characteristic information in interferogram analysis [J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(1):71~75  
鄢静舟,雷 凡,周必方. 干涉图特征信息自动采集方法[J]. *光学技术*, 2000, **26**(1):71~75