

文章编号: 0258-7025(2008)07-1055-04

# 用于高重复频率热容主振荡功率放大器 激光系统的波前检测技术

邓泽微 马秀华 施翔春

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 高重复频率热容主振荡功率放大器(MOPA)激光系统的工作过程一般只持续几秒至几十秒,在此过程中系统输出光束的波前畸变是动态变化的。采用环路径向剪切干涉(CRWSI)技术对高重复频率热容 MOPA 系统波前畸变的变化过程进行检测,并对系统的总体结构进行了设计。搭建了一个简化的实验系统,采用平凹透镜来代替光放大器产生波前畸变,并由此对环路径向剪切干涉仪的测量精度进行了验证。结果表明,实验测量结果与理论计算值之间的峰值误差为7.8% ( $0.02\lambda$ )。

**关键词** 激光技术;波前检测;环路径向剪切干涉;波前重建;高重复频率热容主振荡功率放大器激光系统

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083507.1055

## Wavefront Sensing Technology of High Repetition Rate Heat Capacity Master Oscillator Power Amplifier System

Deng Zewei Ma Xiuhua Shi Xiangchun

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

**Abstract** The operating time of high repetition rate heat capacity master oscillator power amplifier (MOPA) laser usually lasts for only several seconds or tens of seconds. During this time, the wavefront distortion of the output beam is changing all the time. A method of sensing the wavefront of high repetition rate heat capacity MOPA system by a cyclic radial wavefront shearing interferometer (CRWSI) was proposed. The main structure of this system has been designed. A simplified experimental system was established. A plano-concave lens instead of the optical amplifier was used to generate wavefront distortion. Based on this system, the measurement accuracy of CRWSI was certified. The results show that the difference between the experimental result and the theoretical result is 7.8% ( $0.02\lambda$ ).

**Key words** laser technique; wavefront sensing; cyclic radial wavefront shearing interference; wavefront reconstruction; high repetition rate heat capacity master oscillator power amplifier system

### 1 引 言

高重复频率热容主振荡功率放大器(MOPA)激光系统的工作过程一般只持续几秒至几十秒,随后激光发射停止,紧接着对激光介质进行冷却。光放大过程中的热效应会使输出光束波前产生畸变,且这种畸变随时间缓慢变化。采用一定方法对波前畸变的变化过程进行检测,能够对放大器的结构进行相应的改进,提高系统的输出功率,改善光束质量。目前大多采用光束  $M^2$  因子测量仪对输出的激

光进行检测<sup>[1]</sup>,它能准确地测量光束质量,但无法得到光束波前的相位信息。哈特曼传感器和移相干涉技术<sup>[2]</sup>能够用于波前相位检测,但其测量精度(大约  $0.1\lambda$ )和空间分辨率(受子孔径数量限制)难以提高。

与之相比,环路径向剪切干涉技术拥有更高的测量精度(可高达  $0.001\lambda$ )和空间分辨率(主要由波前反演算法中的滤波器决定)<sup>[3,4]</sup>,因此在惯性约束聚变系统中得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。但此技术的最大缺点在于波前重建算法较为复杂,难以实时地通过干

收稿日期:2007-08-23;收到修改稿日期:2008-01-23

作者简介:邓泽微(1983—),男,湖北人,硕士研究生,主要从事激光波前检测技术研究。E-mail:dengzewei@siom.ac.cn

导师简介:施翔春(1969—),男,上海人,研究员,主要从事全固态激光器及其应用方面的研究。E-mail:shixc@siom.ac.cn

涉图反演出待测波前。因此现有的应用都是针对静态波前的检测。

本文提出将环路径向剪切干涉技术用于测量高重复频率热容 MOPA 激光系统波前畸变的变化过程。由于热容激光器工作时间短,因此可以将图像采集过程与波前反演过程分开。即激光器工作时先将所有干涉图保存下来,然后在激光器的冷却阶段对这一组条纹进行波前反演运算,就能得到激光器工作过程中波前畸变的变化过程。

## 2 环路径向剪切干涉基本原理

环路径向剪切干涉仪(CRWSI)的典型光路如图1所示,透镜1和透镜2共同构成一个伽利略望远系统,对光束进行扩束和缩束。首先,信号光经扩束后入射到分束镜(BS),再经分束镜反射(实线)和透射(虚线),被望远系统在相反方向上分别缩小和放大,然后汇合于分束镜的表面,并在它们相互重叠的区域内产生干涉,得到的干涉图用 CCD 进行接收。若将分束镜略微倾斜,即可获得一组高频直条纹(不得超过记录介质的分辨率)。当波前存在畸变的光束进入干涉仪后,畸变波前将对这组高频直条纹进行调制。对所得干涉图进行反演运算,即可重建出原始波前<sup>[6,7]</sup>。

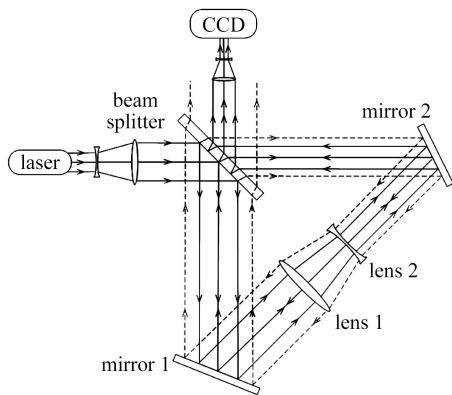


图1 光路示意图

Fig.1 Diagram of optical system

## 3 波前检测的理论分析

任意给定一个畸变波前,如图2所示,波前相位  $W(x, y) = (560x + 3200x^2 + 6400y^2 + 5.12 \times 10^6 x^4 + 2.048 \times 10^8 y^5) e^{-1600(x^2 + y^2)}$ , 其中  $x, y$  的范围取  $-0.255 \sim 0.256$  cm, 计算步长取 0.001 cm。

根据环路径向剪切干涉仪的数学模型,可以计算出波前畸变产生的干涉条纹图,如图3所示。令

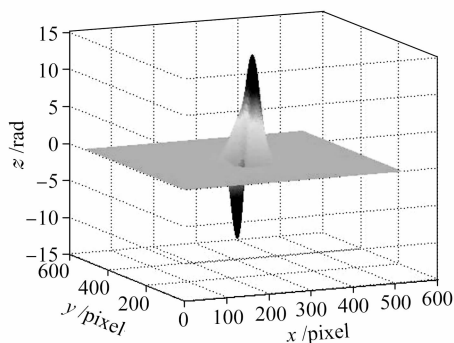


图2 原始波前

Fig.2 Original wavefront

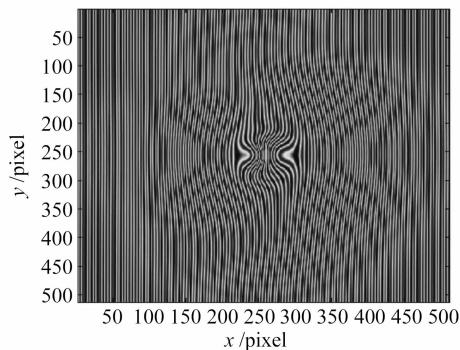


图3 干涉条纹图

Fig.3 Interference pattern

分束镜倾斜导致的载频直条纹在  $x$  方向,计算干涉条纹的方程为<sup>[8]</sup>

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_{0x}x + \phi_{\text{sys}}(x, y) + W_{\text{opd}}(x, y)],$$

式中  $W_{\text{opd}}(x, y)$  为扩大和缩小的两束光之间的相位差;  $a(x, y), b(x, y)$  分别为缓变的背景光强和条纹调制函数;  $\phi_{\text{sys}}(x, y)$  为系统本身引入的波前畸变;  $f_{0x}$  为引入的空间载频。

本文取  $a(x, y) = b(x, y) = 1/2$ , 系统中两个透镜构成的望远系统的放大倍率  $s = 0.5$ ,  $\phi_{\text{sys}}(x, y) = 0$ ,  $f_{0x} = 125 \text{ cm}^{-1}$ , 64 个条纹。

环路径向剪切干涉仪的波前重建有多种不同的算法<sup>[9]</sup>, 文献<sup>[10]</sup>给出的通过傅里叶变换进行波前重建的算法,具有较高的重建精度。

采用以上算法对干涉条纹图进行波前重建,得到的波面如图4所示。将它与原始波前进行比较,它们之间的线性相关系数为 0.9978,二者基本一致。

## 4 实验装置

实验装置框图如图5所示。种子源产生高光束质量的 1064 nm 激光,经过光放大器,然后由分束镜分出一部分光进入环路径向剪切干涉仪,产生的干

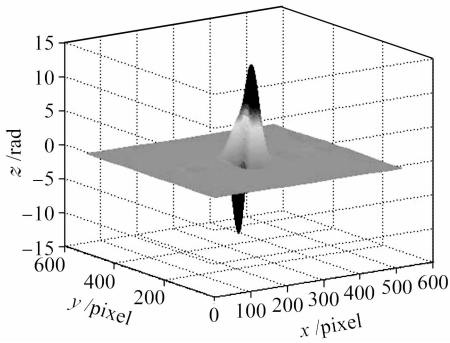


图 4 重建后的波前

Fig. 4 Reconstructed wavefront

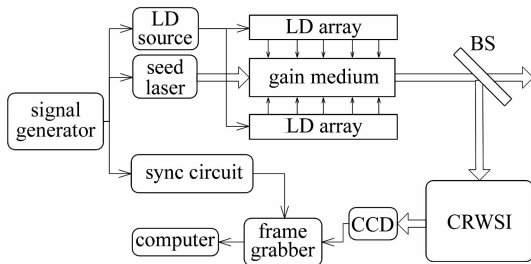


图 5 实验装置框图

Fig. 5 Block diagram of experimental setup

涉图由 CCD 接收,并经过图像采集卡送到计算机内保存,最后通过一个计算机程序来完成波前反演运算。

信号发生器的频率设定为 1 kHz,它控制着种子源和光放大器的抽运源。由于采用的 CCD 的采样频率较低,所以需要一块同步电路来对信号发生器输出的信号分频至 10 Hz,并作为图像采集卡的触发信号。同时考虑到电路会有延时,因此同步电路中还有一个延时单元。

系统以热容方式工作,工作时间为几秒钟。在此过程中,图像采集卡在同步电路的控制下,以 10 Hz 帧频连续采集一组干涉条纹,并保存在计算机内。测量结束后,对这一组条纹进行波前反演运算,就可以得到系统工作过程中波前畸变的变化过程。

## 5 简化的实验装置

由于缺乏相应的设备来与测量结果进行对比,所以在进行高重复频率热容 MOPA 激光系统的波前检测实验之前,有必要采用一个简化的系统来对搭建的波前检测系统的实际测量精度进行验证。

首先,采用加圆孔光阑的平平腔激光器来获得波长  $\lambda$  为 1064 nm 的种子光。激光器的参数为:腔长  $L = 300$  mm,反射镜 1 为全反镜,反射镜 2 透射

率为 10%。圆形光阑直径  $D = 2$  mm,增益介质为 Nd:YAG 晶体。由腔长和光阑直径可以计算出谐振腔的菲涅耳数  $N = D^2 / (\lambda L) = 12.5313$ 。由此判断,此激光器能够输出相干度很好的圆形光斑。

种子光经过 4 倍扩束镜扩束后进入一个平凹透镜。这里采用平凹透镜代替光放大器,产生一定的波前畸变。透镜凹面的曲率半径  $R = -1000$  mm,厚 3 mm。由此可计算其焦距  $f = -1928.5$  mm。

然后采用搭建的环路径向剪切干涉仪来测量波前畸变情况,并通过 CCD 采集干涉条纹,最后用一个计算机程序来进行波前重建。

干涉仪中的扩束镜的放大倍数为 1.5 倍,因此干涉仪的剪切比为 2.25。扩束镜经过光学设计软件严格设计,球差的理论值小于  $0.1\lambda$ 。所采用的 CCD 相面大小为  $6.47$  mm  $\times$   $4.84$  mm,像素为  $1360$  pixel  $\times$   $1024$  pixel,计算时取图像中间的  $512$  pixel  $\times$   $512$  pixel 进行计算,因此图像孔径大小为  $2.42$  mm。

## 6 实验结果及分析

首先,去掉平凹透镜,调整干涉仪,得到一组高频直条纹如图 6 所示,然后加入平凹透镜,得到的畸变条纹如图 7 所示。

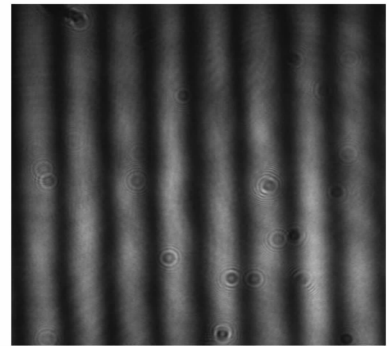


图 6 高频直条纹

Fig. 6 High-frequency straight pattern

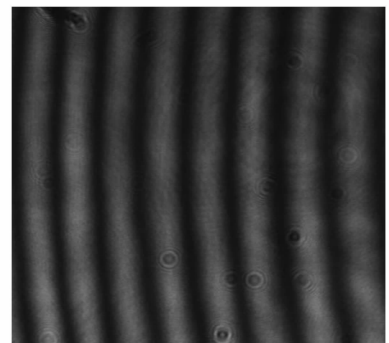


图 7 畸变条纹

Fig. 7 Distorted pattern

采用波前反演算法,可以恢复出待测波前如图8所示。将种子光视为理想的高斯光束,即不存在波前畸变。凹面镜焦距 $-1928.5\text{ mm}$ ,离成像面的距离为 $1065\text{ mm}$ 。采用高斯光束的传输理论,可以计算出像面处光束波前为球面波,且曲率为 $3064.4\text{ mm}$ 。该球面波在图像孔径范围( $2.42\text{ mm}$ )内的最大光程差为 $0.2245\lambda$ 。

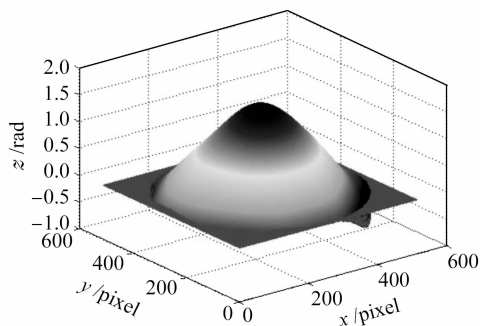


图8 平凹透镜重建的波前

Fig. 8 Reconstructed wavefront of plano-concave lens

实际测量得到的波前也是一个球面波,略有一点偏心(如图8),峰值为 $0.24\lambda$ 。它与理论值之间的误差为 $7.8\%$ ,即 $0.02\lambda$ ,测量精度能够满足系统要求。当凹面镜的位置不是正好对准光路中心时,会产生额外像差。因此像差的实际值应该略高于理论计算值,这一点也与实验结果相符。

理论上通过增加剪切放大倍数以及载频频率(不超过 CCD 的分辨率),可以使测量精度得到进一步提高。另外,系统中各光学表面本身的缺陷(如图6)会在干涉条纹中引入高频噪声,而载频频率提高后高频噪声的影响会越来越明显,因此必须进一步改善各光学表面的质量。

## 7 结 论

对高重复频率热容 MOPA 激光系统的波前检测系统的总体结构进行了设计。搭建了一个简化的实验系统,采用平凹透镜代替光放大器产生波前畸变,并由此对波前检测系统的测量精度进行了验证。结果表明,实验测量结果与理论计算值之间的误差为 $7.8\%$ ( $0.02\lambda$ )。通过增加剪切放大倍率和载频频

率,改善系统光学表面质量,可以使测量精度得到进一步提高。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):255~258  
于永爱,张玲玲,唐前进等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):255~258
- 2 He Yong, Chen Jinbang, Zhu Rihong *et al.*. Laser rods wavefront distortion testing instrument [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):938~942  
何勇,陈进榜,朱日宏等. 激光棒波前畸变测试仪[J]. 中国激光, 2003, **30**(10):938~942
- 3 Yang Yongying, Lu Yuanbiao, Chen Yangjie. A radial shearing interference system of testing laser pulse wavefront distortion and the original wavefront reconstructing [C]. *SPIE*, 2005, **5638**:200~204
- 4 Liu Dong, Yang Yongying, Xia Zuotang *et al.*. Measurement of transient near-infrared laser pulse wavefront with high precision by radial shearing interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9):1372~1376  
刘东,杨甬英,夏佐堂等. 近红外瞬态脉冲波前高精度干涉检测技术[J]. 光学学报, 2006, **26**(9):1372~1376
- 5 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei *et al.*. Algorithm and accuracy study of wavefront reconstruction with different amplification ratio based on the cyclic radial shearing interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):503~508  
李大海,陈怀新,陈祯培等. 径向剪切干涉波面重建算法和不同倍数下重建精度的研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(6):503~508
- 6 Wang Yan, Zhang Lei, Lü Zhiwei. Research on measuring laser beam wavefront based on radial shearing interferometry [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(11):39~44  
王岩,张磊,吕志伟. 径向剪切干涉测量激光光束波前的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(11):39~44
- 7 M. V. R. K. Murty. A compact radial shearing interferometer based on the law of refraction [J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(7):853~857
- 8 Ma Li, Han Daofu. Two-beam-contracted radial shearing interferometer for measuring the gas temperature field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11):1493~1496  
马力,韩道福. 用双光收缩式径向剪切干涉仪测量气体温度场[J]. 光学学报, 2005, **25**(11):1493~1496
- 9 Donald J. Bone, H. A. Bachor, R. John Sandeman. Fringe pattern analysis using a 2-D Fourier transform [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10):1653~1660
- 10 Li Dahai. Study on diagnosing the distorted wavefront of a laser beam by radial shearing interferometer and controlling it by a new method [D]. Chengdou: Sichuan University, 2002. 1~119  
李大海. 激光光束波前畸变的径向剪切干涉诊断及控制新方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2002. 1~119