

文章编号: 0258-7025(2003)10-0938-05

# 激光棒波前畸变测试仪

何 勇, 陈进榜, 朱日宏, 高志山

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 介绍了自行开发的移相式数字波面干涉仪的原理和特点, 仪器主要用于激光棒材料波前畸变测试, 仪器口径为  $\phi 30$  mm, 精度优于  $\lambda/20$ , 重复性优于  $\lambda/50$ 。仪器硬件具有四个特点: 变倍、调焦、光通量控制、调整和测试转换; 软件包建立在 WINDOWS98 平台上, 进行干涉图采集、处理、波面图形绘制。输出结果形象直观, 整个操作简单方便快捷, 测试过程 26 s。仪器还可测量晶体材料折射率均匀性、晶体元件面形、角度、平行度等。通过测试比对, 数据与 ZYGO 结果一致。

**关键词** 测试计量仪器; 波前畸变; 激光棒; 干涉仪

**中图分类号** TH 744.3 **文献标识码** A

## Laser Rods Wavefront Distortion Testing Instrument

HE Yong, CHEN Jing-bang, ZHU Ri-hong, GAO Zhi-shan

(Institute of Electronic Engineering & Photo-electric Technology of  
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** This paper describes the fundamental and performance of a self-developed phase-shifting digital interferometer. This instrument can be used to test wavefront distortion of laser rods whose aperture is  $\phi 30$  mm with accuracy better than  $\lambda/20$ , the repeatability better than  $\lambda/50$ . The instrument has four characters: magnification changing, focusing, luminous flux controlling, and changeover of adjustment and test. Software based on the platform of windows98 can finish interferogram sampling, processing and wavefront drawing, the operation is easy and convenient. The whole testing only spends 26 seconds. This instrument can also measure the refractive-index homogeneity, the flatness, the angle error, the wedge angle of crystal element. By testing the same samples with Zygo GPI-XP, both results were same.

**Key words** instrument for measurement and metrologic; wavefront distortion; laser rods; interferometer

## 1 引 言

固体激光器的工作物质激光棒的波前畸变, 表征了激光棒的光学均匀性、折射率的一致性以及端面面形的加工质量, 对于激光功率的提高至关重要。为保证激光棒的质量, 规范测试及评价方法, 美国检测与材料学会 ASTM (American Society for Testing and Materials) 于 1977 年提出激光棒波前暂行检验方法, 并于 1981 年确定为正式标准方法, 规定使用双通道干涉仪如斐索干涉仪或泰曼干涉

仪, 被测激光棒放置在干涉腔中, 用照相的方法拍摄两个垂直方向的干涉图, 然后使用 F530-81 标称平面波面干涉图的标准判读方法。我国于 1984 年发布国家标准 GB12033-89“激光棒材料均匀性的测量”<sup>[1]</sup>。

自 Bruning 提出数字波前测量干涉仪用于检验光学表面和透镜以来<sup>[2]</sup>, 移相干涉技术有了飞速的发展, 形成多种科研和商品化仪器, 作者亦曾研究了高精度、大口径移相式平面干涉仪<sup>[3]</sup>。关于干涉图的分析判读, 国际标准化组织 (ISO) 于 1997 年正式

收稿日期: 2002-05-31; 收到修改稿日期: 2002-10-25

作者简介: 何勇 (1966—), 男, 南京理工大学副教授, 博士, 主要从事光学测试和智能化仪器研究。E-mail: optictim@mail.njust.edu.cn

发布 ISO10110 光学和光学仪器-光学元件及系统图纸绘制标准文件<sup>[4]</sup>, 该标准文件全面制定了用于光学加工与检验光学元件及系统的技术要求规范。ISO10110-5 淘汰了一些用于波前畸变检测的老标准, 使用移相干涉术测量波面, 用数字波面特征量峰谷值 (PV) 和标准偏差 (RMS) 来表征波面畸变。

国内在移相干涉术方面进行了一些研究, 未见用于激光棒的测试报道。本文介绍了自行开发, 特别适用于激光棒的移相式数字波面干涉仪, 仪器孔径为  $\phi 30$  mm, 精度为  $\lambda/20$ , 重复性为  $\lambda/50$ , 既可用于直径为  $\phi 30$  mm 以上的激光材料, 又可用于直径小于  $\phi 2$  mm 的激光棒的波前畸变测试, 并给出符合国际标准的数据。

## 2 仪器光学系统与原理

仪器采用改型泰曼-格林式光路, 参考和测试光程基本相等, 目的是使干涉图像亮度适宜, 对比度好。图 1 为系统光路图, He-Ne 激光经反射镜和由计算机控制的步进电机驱动的渐变滤光镜, 再经会聚透镜  $L_1$  聚焦, 由准直透镜  $L_2$  出射为平行光束。准直光束经分光镜 BS1 后分成: 一束反射到测试反射镜  $M_6$  成为测试光束; 另一束透射光束射向参考反射镜  $M_7$ , 成参考光束。再经 BS1 后与测试光束干涉形成干涉条纹。

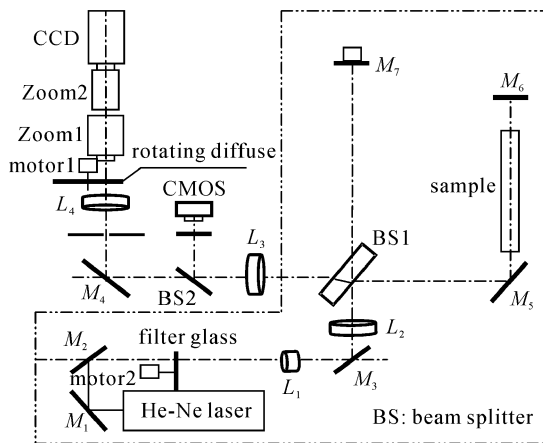


图 1 系统光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system

### 2.1 移相干涉术

在获得干涉条纹后, 仪器采用移相干涉技术复原波面<sup>[5]</sup>。在参考反射镜  $M_7$  上装有压电陶瓷驱动器 (PZT), 干涉场光强表达式为

$$I(x, y, l) = a^2 + b^2 + 2ab \cos 2k[\omega(x, y) - l] \quad (1)$$

式中  $a, b$  分别为参考和测试光波振幅,  $\omega(x, y)$  为相位差。  $l$  为 PZT 驱动  $M_7$  移动的距离。即干涉场中每一点的光强都是  $l$  的正弦函数, 当 PZT 驱动  $M_7$  移动  $l$  (即改变光程差), 干涉场的光强  $I$  就被调制。当参考镜匀速平移时, 在一定时间内, CCD 接收到的光强值  $I$  实际代表了该点在  $l_i \pm \Delta/2$  范围内光强的积分平均值, 即有

$$I(x, y, l_i) = \frac{1}{\Delta} \int_{l_i - \Delta/2}^{l_i + \Delta/2} I(x, y, l) dl \quad (2)$$

式中,  $1/\Delta$  为归一化因子, 以保证平均积分信号与积分区域  $\Delta$  无关,  $l_i$  为积分域中心处的光程位移量。将 (1) 代入 (2), 积分得

$$I(x, y, l) = a^2 + b^2 + 2ab \cdot \text{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \cdot \cos 2k[\omega(x, y) - l] \quad (3)$$

为降低噪声影响, 提高测量准确度, 采用四步平均法<sup>[4]</sup> 得复原波面相位  $\Phi$

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{2M} \sum_{K=1}^{2M} \Phi_K = \frac{1}{2M} \sum_{K=1}^{2M} \tan^{-1} \left( \frac{I_{K+3} - I_{K+1}}{I_{K+4} - I_{K+2}} \right) \quad (4)$$

对于干涉场光强  $I(x, y)$ , 在网格点  $512 \times 512$  个  $(x, y)$  集合  $S$  上, 作  $2M+3$  帧采样, 采样间隔为  $\pi/2$ 。即在 PZT 驱动  $M_7$  作相位步进  $\pi/2$  时采样一帧光强图, 利用“四步法”, 由光强复原波面  $\Phi_k$ , 即每四帧干涉光强作为一个相位计算周期, 得到第  $K$  次相位计算值; 下一个相位计算周期是递进一帧干涉图的光强值;  $K$  值由 1 递进到  $2M$  个  $\Phi_k$  值。对于  $2M$  个  $\Phi_k$  取平均值, 乘以系数  $\lambda/2\pi$  就可求得波前畸变函数  $\omega(x, y)$ 。

### 2.2 干涉图像的放大与物像共轭

由于激光棒口径小, 直径通常在  $\phi 3 \sim 5$  mm, 有的仅为  $\phi 2$  mm, 例如  $\phi 3$  mm 激光棒的面积占满口径  $\phi 30$  mm 的 1%, 而 CCD 对干涉图像的采样和运算均需一定的采样密度。为了达到预定的精度, 必须使干涉场成在 CCD 靶面上的面积足够大, 最好充满整个靶面的 70%~85% (CCD 的像素为  $795 \times 596$ , 面积  $6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ )。同时还要求激光棒与靶面共轭, 否则像的边缘不清晰同样会影响测量精度。

从图 1 可知, 样品经过透镜  $L_3$  和透镜  $L_4$  成像在旋转的毛玻璃上, 即激光棒与旋转毛玻璃是一对共轭位置; 旋转毛玻璃位于变焦透镜 Zoom1 的焦面处, 靶面位于变焦透镜 Zoom2 的焦面处, 即靶面与旋转毛玻璃是一对共轭位置。由此样品经过一系列透镜后与靶面处于共轭位置, 激光棒在靶面上成一

清晰的像。当样品在不同的位置时,安装在同一导轨上的旋转毛玻璃 2,变焦镜头 1 和 2 及 CCD 可前后移动,以保持激光棒与旋转毛玻璃共轭。

光路中有两个变焦镜头,变焦镜头 1 的焦距为 8~48 mm,变焦镜头 2 的焦距为 130~300 mm,通过改变两变焦镜头焦距,旋转毛玻璃 2 上的光斑放大 2.7~37.5 倍成在 CCD 靶面上,当成像透镜 2 和 3 将  $\phi 30$  mm 的激光棒成像旋转毛玻璃 2 的光斑为 1.5 mm 时,变焦系统放大 2.7 倍可将充满靶面,当放大倍数 37.5 倍时可将  $\phi 2$  mm 的激光棒的像充满靶面。因此在测量小尺寸元件时就保证有足够的采样点,从而保证了系统的整体精度,大大增强了该仪器的使用范围。

### 2.3 光强调整与干涉图亮度

在变焦放大过程中引起了另外一个问题,干涉图像的亮度变弱甚至低于 CCD 的最低照度,信噪比大大降低,影响了测量精度。因此采用渐变滤光片来调整光强,在光源后面放置步进电机驱动的渐变滤光镜,步进电机旋转的方向和步长由计算机输入脉冲电压控制。调光部分的工作原理为根据 CCD 的性能参数,确定线性工作段的光强值区域,并以此作为阈值,当进入 CCD 的干涉图像的光强均值处于阈值区,计算机不输出脉冲,在干涉图像放大时,光强均值小于阈值,计算机可实时算出步进电机应转换的角度,并给出控制脉冲而使渐变滤光镜作相应的旋转,而使干涉图像亮度适宜,信噪比高,从而提高精度。

### 2.4 调整与测试光路转换

仪器采用双光电探测器,其中,CCD 用于干涉图采样,CMOS 用于粗调,两者通过转换开关分别接入监视器。

### 2.5 软件简介

干涉图采样、处理及绘图软件是用 C++ 语言

开发的集干涉图采集、处理、波面图形绘制于一体的集成化软件包,能实时、自动采集干涉图,且数据准确可靠;波面复原软件采用“移相干涉术—四步重叠平均法”,获得高精度的波面复原;图形绘制软件可用二维等值图、三维立体图的形式绘出用户计算所得到的波面,形象直观。所绘制图形既可在微机显示器输出,亦可输出到打印机。整个软件建立在 WINDOWS98 平台上,操作简单方便。

## 3 仪器原理框图与实验测试

图 2 为仪器的原理框图,由硬件和软件组成,是一台光、机、电、算相结合的智能化工具,仪器口径为  $\phi 30$  mm,连续变倍放大 15 倍。采用光电定量探测,多幅静态干涉图采样,经图像采集卡将光强干涉图转化为数字化干涉图,由微型计算机按照移相干涉术等一系列数学物理模型,复原波面,输出波面的面形偏差(光程差)、峰谷值(P-V)、标准偏差(RMS),并形象直观地给出波面二维等面图、三维立体图及测试干涉图像。

图 3 为仪器的干涉条纹图、直方图以及自动识

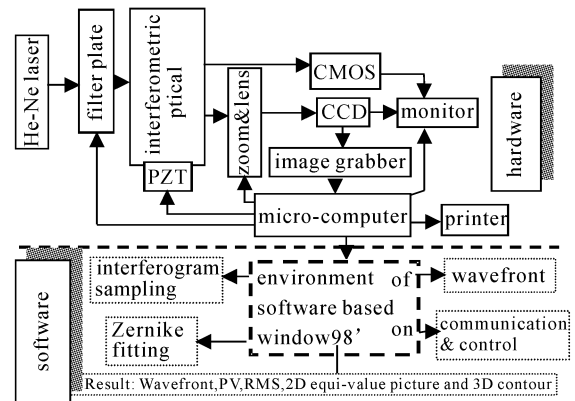


图 2 干涉仪原理方框图

Fig. 2 Block diagram of interferometer

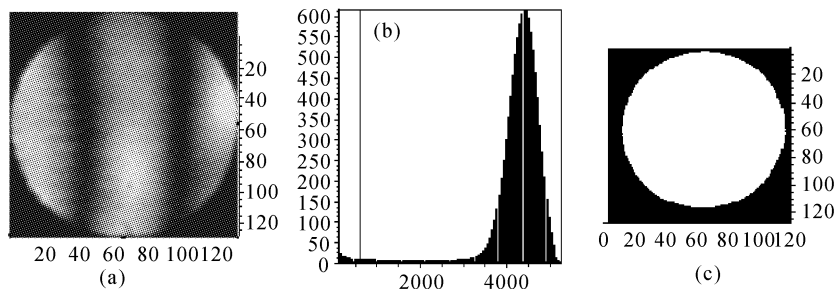


图 3 干涉图(a),直方图(b)和有效区(c)

Fig. 3 Interferogram (a), histogram (b) and valid area in interferogram (c)

别边界所确定的有效区域。计算表明仪器的精度为  $P-V = 0.048\lambda$ ,  $RMS=0.008$ , 经重复性实验考核, 仪器重复性优于  $\lambda/50$ , 表 1 列出了在相同的条件下

的部分测试数据。

图 4 为移相计算后得到的二维等值图,  $x, y$  方向的一维等值曲线和三维波面。

表 1 仪器精度和重复性实验数据

Table 1 Test date of the accuracy & precision

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P-V	0.047	0.048	0.049	0.046	0.044	0.047	0.045	0.046	0.048	0.047
RMS	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008

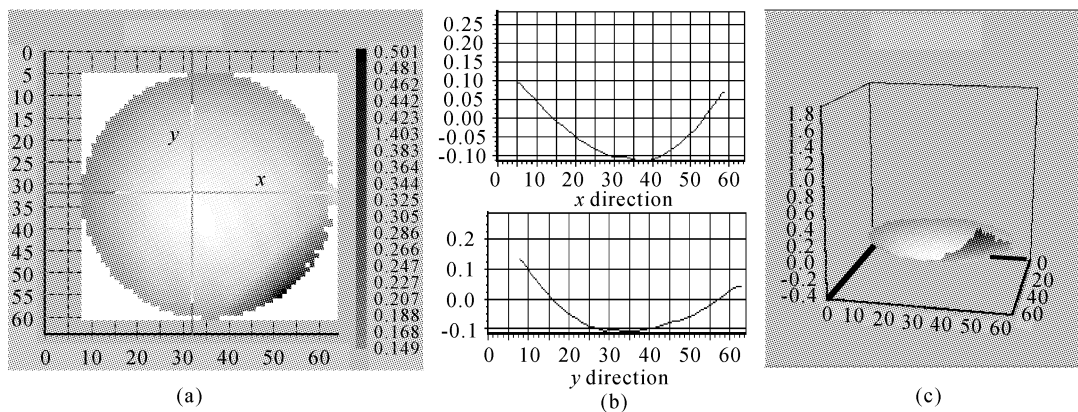


图 4 二维波面图(a),  $x$  和  $y$  方向一维波面(b)和三维波面(c)

Fig. 4 2D topographical map (a),  $x$  &  $y$ -view radial wavefront profile (b) and 3D wavefront (c)

图 5 为口径  $\phi 50$  mm 激光棒材料测试的部分干涉图, 由图可以看出, 该材料除了右下方有明显的结石缺陷外, 其他几个部分材料的均匀性良好。

图 6 是  $\phi 5$  mm 激光棒在全视场 ( $\phi 30$  mm) 时的干涉图像,  $\phi 5$  mm 干涉图像面积只有全视场的 2.7%。

图 7 是  $\phi 5$  mm 激光棒经放大并通过调焦后得到的基本充满视场时的干涉图像。

图 8 是 CCD 采样 11 幅图象, 每 4 幅图根据公式(4)作一轮四步法复原畸变波面, 第一组从第 1 幅到第 4 幅, 第二组从第 2 幅到第 5 幅, 依次类推直到

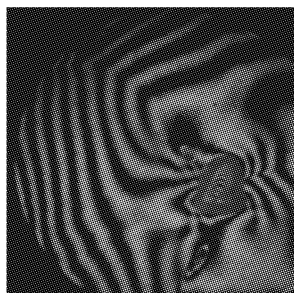


图 5 激光棒干涉图

Fig. 5 Interferogram of laser rods

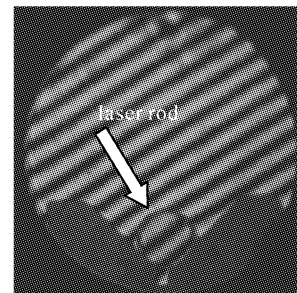


图 6 全视场

Fig. 6 Whole-view

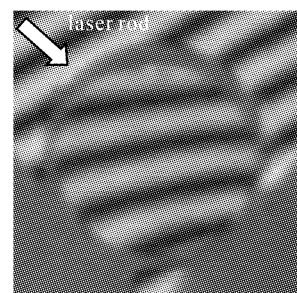


图 7 放大后的干涉图

Fig. 7 Interferogram of focus

第八组 8 幅到第 11 幅。通过公式(4)计算可得波前畸变  $\omega(x, y)$  值。将样品在 ZYGO 公司的 GPI-XP 干涉仪上进行测试,通过对比可知,两者所测量结果完全一致。

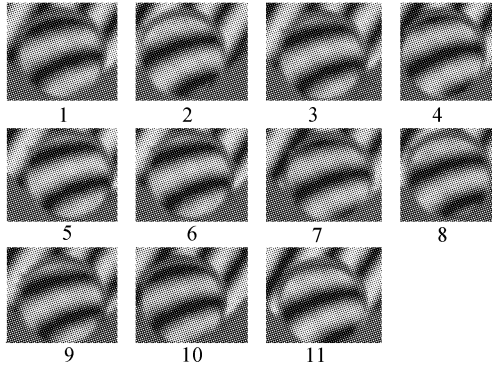


图 8 移相算法 11 幅干涉图

Fig. 8 Dynamic phase-shifting interferograms

## 4 结 论

移相式数字波面干涉仪具有使用方便、测试精

度高的特点,在变倍采集系统和光强自适应调整系统的协助下,解决了激光棒波前畸变的测试。与进口干涉仪的对比测试结果一致性好。另外仪器还可以用来测试光通讯或其他小尺寸元件的平行度、波前畸变、五角棱镜的出入射光 90 度差、光学材料的折射率均匀性等。

## 参 考 文 献

- 1 Test Method for Wavefront Distortion of Laser Rods [S]. GB11297, 1~89
- 2 Daniel Malacara. Optical Shop Testing [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1992. 135~139
- 3 Jingbang Chen, Dezhen Song, Rihong Zhu *et al.*. Large aperture-high accuracy phase-shifting digital flat interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(7): 1936~1942
- 4 Optics and Optical Instruments-preparation of Drawing for Optical Elements and Systemts [S]. ISO10110-5. 1996(E)
- 5 Pan Junhua. Handbook of Measurement Technology [M]. Vol. 10. Optics. Beijing: Metrology Publication, China, 1997 (in Chinese)