

文章编号: 1001-3806(2011)02-0189-04

## 干涉法测量光学材料光学非均匀性

刘旭, 任寰, 于德强, 杨一, 郑芳兰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了实现光学材料光学非均匀性的高精度检测, 采用将光学材料制成一小楔角(小于 $0.117^\circ$ )光学元件并利用菲索干涉法检测其光学非均匀性的方法, 对测量过程进行了理论仿真分析和熔石英材料光学非均匀性的实验验证, 取得了熔石英材料的光学非均匀性数据, 峰谷值为 $4.33 \times 10^{-6}$ , 均方根值为 $0.862 \times 10^{-6}$ , 测量准确度优于 $4.8 \times 10^{-7}$ 。结果表明, 该测量方法能有效避免目前检测方法中将光学材料制成平板元件而引起干涉混叠的现象。

**关键词:** 测量与计量; 干涉测量; 光学非均匀性; 计算机仿真; 高功率激光系统

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.013

### Measurement method for inhomogeneity of optical material by means of interferometry

LIU Xu, REN Huan, YU De-qiang, YANG Yi, ZHENG Fang-lan

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to measure inhomogeneity of optic material accurately, an optical wedge was prepared at a small angle less than  $0.117^\circ$ . Then its inhomogeneity was measured with a Fizeu interferometer. This method was proved to be correct by simulation and experiments in which the inhomogeneity of fused silica was measured, and the peak to valley value of fused silica was  $4.33 \times 10^{-6}$ , and the root mean square value was  $0.862 \times 10^{-6}$ , and the accuracy of this method was less than  $4.8 \times 10^{-7}$ . The results show that the light reflected either from the front surface or from the near surface can be distinguished with this method.

**Key words:** measurement and metrology; interferometer measurement; optical inhomogeneity; computer simulation; high power laser system

## 引言

随着高功率激光系统输出能量的提高, 对激光波前精度要求越来越高。光学材料的光学非均匀性会导致激光波前产生不同程度的畸变, 破坏光学系统的成像质量, 甚至严重影响整个系统的正常运行。因此, 系统使用的各类光学元件在加工前必须进行光学非均匀性检测, 以使其满足高功率激光装置建设的需要, 来提高高功率激光系统波前精度<sup>[1-4]</sup>。

目前测量光学非均匀性最常用的干涉测量方法<sup>[5-9]</sup>是将被测元件制成平行度很高的平板, 再利用干涉的方法测量其非均匀性, 但这种方法常常会因平板前后表面以及干涉仪标准镜的反射光相互干涉而引起干涉混叠现象, 这种现象常常会导致数据丢失或者滤

掉有用信息, 从而使测量结果不可靠。为解决干涉混叠导致检测结果不可靠这一难题, 本文中提出将被测元件制成一小楔角以使元件前后表面反射光错开一定距离, 从而能有效地避免干涉混叠现象, 在数据处理时采用坐标变换的方法解决测量过程中可能出现的数据错位, 通过计算机仿真实验方法的正确性。

## 1 测量原理

### 1.1 楔角元件的数学模型

如图1所示, 将光学材料制成小楔角元件且其数



Fig. 1 Model of wedge component

学模型可设为由平板元件和一斜楔组成。为简化数学模型, 定义元件上表面为A面, 下表面为B面, 建立以B面圆心为坐标原点, 以A面的长、短轴在B面投影为x轴和y轴的坐标系, 则被测元件A面面形在x-y-z坐标系中可以表示为基本面形加一倾斜因子:

基金项目: 国家八六三高技术研究发展计划资助项目

作者简介: 刘旭(1983-), 男, 硕士, 从事光学检测技术的研究。

E-mail: zjuliuxu@gmail.com

收稿日期: 2010-04-28; 收到修改稿日期: 2010-07-02

$$z_2(x, y) = z_2'(x, y) + x \tan \theta \quad (1)$$

式中,  $z_2'(x, y)$  和  $z_2(x, y)$  分别表示基本面形和带倾斜因子的波前,  $\theta$  表示被测元件的楔角。元件厚度  $h(x, y)$  由平板厚度  $h_0$ 、元件 A, B 两表面面形  $z_1(x, y)$ ,  $z_2(x, y)$  及标准斜楔组成, 且表示为:

$$h(x, y) = h_0 + z_1(x, y) + z_2(x, y) \quad (2)$$

光学非均匀性对元件透射波前的影响主要体现为使元件内部折射率变化, 因此, 元件实际折射率  $n(x, y)$  可由折射率平均值  $n_0$  及光学非均匀性分布  $\Delta n(x, y)$  表示<sup>[10]</sup>:

$$n(x, y) = n_0 + \Delta n(x, y) \quad (3)$$

## 1.2 测量步骤

图2为利用菲索干涉系统测量均匀性的原理图,

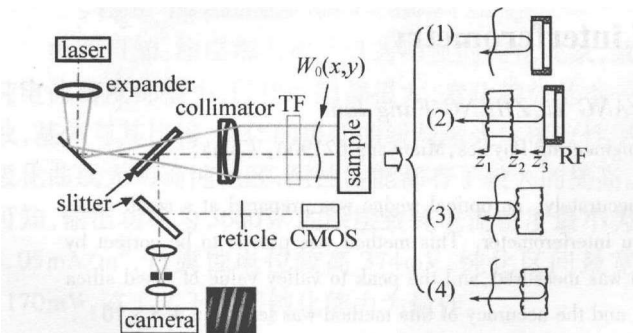


Fig.2 Schematic diagram for measuring inhomogeneity

激光器发出的光束经准直透镜组准直后得到近似平面波, 该平面波经由压电陶瓷驱动(起相位调制作用)的标准透射平板(transmission flat, TF)后分为两束: 一束被标准透射平板反射作为参考光; 另一束透过标准平板入射到被测元件表面, 再经被测元件反射而得到带有被测元件表面信息的畸变波前。被反射的这两束光经准直透镜组后, 产生干涉条纹经成像物镜成像于 CCD 上。另外, 两束反射光均可被分光棱镜反射后聚焦于十字分划板上, 因此, 检测过程中很容易根据两束光在分划板上的位置对被测元件进行适当调节。在检测过程中, 为方便确定第 1.1 节中所述的  $x$  轴位置, 特设定十字分划板的水平、竖直划线分别对应  $x$  轴和  $y$  轴, 则检测过程中只需将被测元件前后表面的反射点均调至十字分划板的水平上, 而在元件前后表面面形检测过程中被测元件转动的转动轴始终为  $y$  轴。

如图 2 所示, 测量过程中被测对象(图中 sample)可分别由图 2 右侧所示 4 步骤分别代替, 以  $W_0(x, y)$  表示干涉系统及标准透射平板引入的波前畸变误差,  $z_1(x, y)$ ,  $z_2(x, y)$  及  $z_3(x, y)$  分别表示样品在  $x$ - $y$ - $z$  坐标系中前表面、后表面及标准反射平板的面形, 测量步骤如下: (1) 测量标准透射平板 TF 与标准反射平板(reflection flat, RF)间形成的空腔波前畸变  $W_1(x, y)$ , 且可由下面的(4)式计算其波前畸变量; (2) 将样品放

于 TF 与 RF 之间测量样品透射波前畸变  $W_2(x, y)$ , 且由下面的(5)式计算其波前畸变量; (3) 将标准反射平板 RF 移开, 测量元件前表面(B 面)反射波前畸变, 且由下面的(6)式计算其波前畸变量; (4) 元件后表面(A 面)与 TF 形成干涉而测得元件后表面反射波前畸变。在此过程中, 因为样品带有楔角, 所以当测量元件前表面反射波前畸变(第(3)步)之后需转动元件以通过干涉仪测量其后表面反射波前畸变  $W_4'(x, y)$ , 而在转动前元件后表面反射波前畸变理论值  $W_4(x, y)$  为:

$$W_1(x, y) = W_0(x, y) + 2z_3(x, y) \quad (4)$$

$$W_2(x, y) = W_0(x, y) + 2(n_0 - 1)[z_2(x, y) - z_1(x, y)] + 2z_3(x, y) + 2(h_0 + x \tan \theta) \times \Delta n(x, y) \quad (5)$$

$$W_3(x, y) = W_0(x, y) + 2z_1(x, y) \quad (6)$$

$$W_4(x, y) = W_0(x, y) - 2(n_0 - 1)z_1(x, y) + 2n_0z_2(x, y) + 2(h_0 + x \tan \theta) \Delta n(x, y) \quad (7)$$

结合(4)式~(7)式可以解得元件不转动时光学非均匀性分布:

$$\Delta n(x, y) = \{n_0 [W_2(x, y) - W_1(x, y)] - (n_0 - 1) \times [W_4(x, y) - W_3(x, y)]\} / [2(h_0 + x \tan \theta)] \quad (8)$$

然而, 在测量步骤(4)中, 样品相对前 3 个测量步骤发生了转动, 这种转动可能造成该步骤的测量数据与前 3 步测量数据矩阵错位, 必须通过坐标变换由测量值计算元件转动前的波前畸变值。 $x$ - $y$ - $z$  坐标系以  $y$  轴为旋转轴转动  $\theta$  角( $\theta$  为楔角大小)而得到测量坐标系  $x'$ - $y'$ - $z'$ , 因此元件转动过程中的坐标变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \cos \theta + z' \sin \theta \\ y' \\ z' \cos \theta - x' \sin \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可以得到, 在元件转动前后, 其后表面的反射波前畸变的变换关系:

$$W_4(x, y) = \frac{W_4'(x, y)}{\cos \theta} - x \tan \theta \quad (10)$$

式中,  $W_4'(x, y)$  为元件转动后实际测得的面形值,  $\theta$  为元件楔角。由(10)式可求得元件后表面在转动前的理论反射波前  $W_4(x, y)$ , 代入(8)式可以得到元件光学非均匀性值。元件上任意一点在转动前后两坐标系的坐标偏移量为:

$$\Delta d = x' - (x' \cos \theta + z' \sin \theta) \quad (11)$$

100mm 口径的高精度数字波面干涉仪的光学分辨率为  $190 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , 为保证元件转动过程中测量实际畸变波前数据矩阵与  $x$ - $y$ - $z$  坐标系形成一一对应关系, 则必

有偏移量最大值  $|\Delta d_{\max}| < 0.19\text{mm}$ , 故当被测样品口径小于  $100\text{mm}$  时有:

$$\Delta d_{\max} = |100 - (100\cos\theta + 100\sin\theta)| < 0.19 \quad (12)$$

由(12)式计算可得  $\theta < 0.117^\circ$ , 定义  $\theta = 0.117^\circ$  为临界楔角, 当元件楔角满足  $\theta < 0.117^\circ$  时, 由元件转动引起的坐标错位量小于 1 像素, 在此条件下无需进行坐标变换, 即可按下式求得非均匀性:

$$\Delta n(x, y) = \{n_0[W_2(x, y) - W_1(x, y)] - (n_0 - 1) \times [W_4'(x, y) - W_3(x, y)]\} / [2(h_0 + x\tan\theta)] \quad (13)$$

式中,  $W_1(x, y), W_2(x, y), W_3(x, y), W_4'(x, y)$  分别为每步骤测得的实际波前值,  $n_0$  为样品平均折射率,  $\theta$  为元件楔角,  $h_0$  为元件厚度,  $\Delta n(x, y)$  表示样品光学非均匀性分布。

## 2 仿真及实验分析

计算机模拟 K9 带楔角光学元件, 元件通光口径为  $\varnothing 40\text{mm}$ , 其折射率平均值在波长为  $632.8\text{nm}$  时为 1.515。元件模型可拆分为平行平板和斜楔, 平板厚度为  $8\text{mm}$ , 斜楔的楔角为  $0.228^\circ$ , 设光学非均匀性沿迎光面呈椭圆面分布, 其分布方程为:  $\Delta N(x, y) = 0.01\lambda \times \left[ \left(\frac{x}{40}\right)^2 + 2\left(\frac{y}{40}\right)^2 \right]$ , 其中  $x, y$  取值范围均为  $(-20 \sim 20)$ 。样品前表面面形为双曲面, 且峰谷值 (peak valley, PV) 为  $0.2\lambda$ , 后表面面形呈旋转抛物面, PV 值为  $0.2\lambda$ , 且相对前表面的倾斜因子为  $\tan(0.228^\circ)$ 。干涉仪前标准透射平板及标准反射平板面形 PV 值均为  $0.05\lambda$ 。仿真过程忽略环境因素对测量结果的影响。

仿真结果如图 3 所示, 图 3a ~ 图 3d 分别表示每步骤的仿真结果。根据上述 4 步的仿真结果, 利用(13)式计算光学非均匀性分布  $\Delta n(x, y)$ , 结果如图 4 所示。可以看出, 仿真计算结果的光学非均匀性分布与初始设计分布情况完全吻合, 证实了上述测量方法的正确性。

为防止测量过程中因外界环境变化引入额外应力而影响测量结果, 本实验在温度为  $294.15\text{K}$ ,  $1\text{MPa}$  大气压下进行, 且样品在实验室内恒温  $24\text{h}$  再进行实验。实验中被测材料制成厚度  $10\text{mm}$ 、直径为  $20\text{mm}$ 、折射率为 1.4575 的熔石英未镀膜元件。测量波长为  $632.8\text{nm}$ , 菲索干涉系统的标准透射平板和标准反射平板的面形 PV 值均优于  $\lambda/20$ 。

测量结果如图 5 所示, 图 5a 为干涉仪系统空腔波前畸变, 图 5b 为被测熔石英前表面面形, 图 5c 为熔石英透射波前畸变, 图 5d 为熔石英后表面面形。再利用(13)式计算该熔石英玻璃的光学非均匀性, 结果如图 6 所示, 该熔石英玻璃的光学非均匀性分布峰谷值为

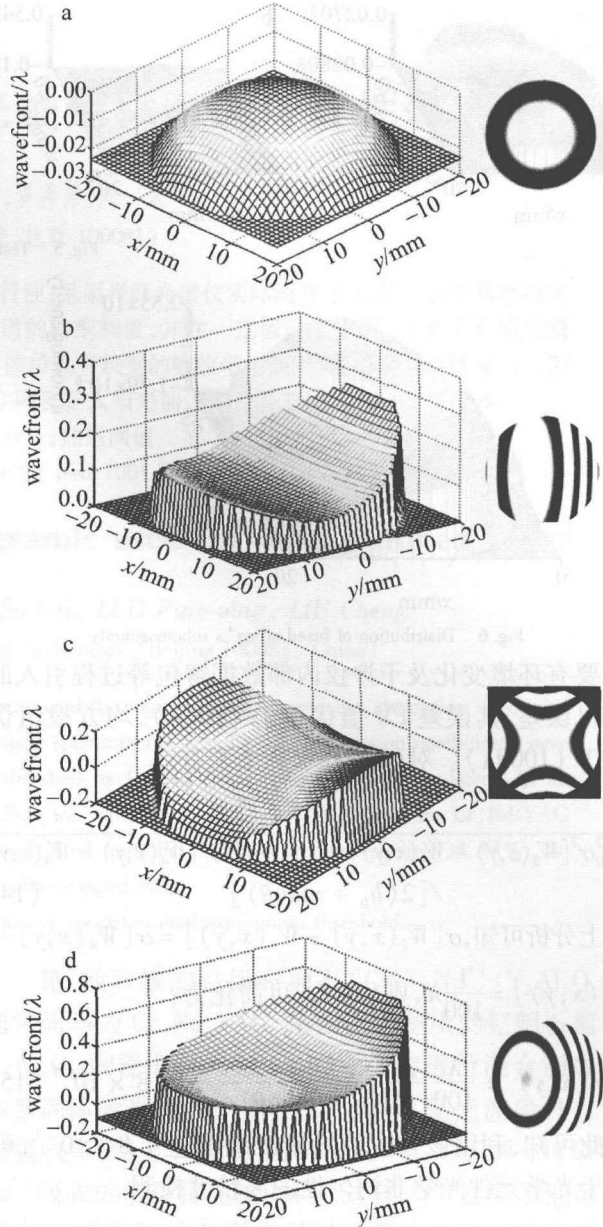


Fig. 3 Simulation results of four test procedure

a—wave aberration of the 1st step b—wave aberration of the 2nd step  
c—wave aberration of the 3rd step d—wave aberration of the 4th step

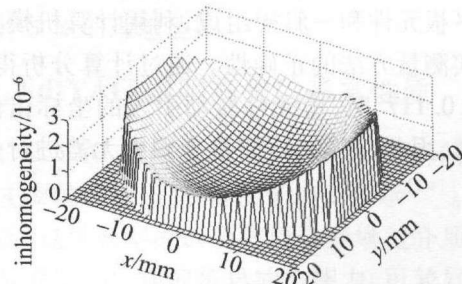


Fig. 4 Distribution of inhomogeneity

$\Delta n_{\text{PV}} = 4.34 \times 10^{-6}$ , 均方根值为  $\Delta n_{\text{RMS}} = 0.862 \times 10^{-6}$ 。

测量过程的误差源主要是每步骤的波前检测误差, 由仿真结果和(13)式可以看出, 标准镜面形误差在测量过程中已作为背景减去, 其面形不会引入光学非均匀性的测量误差, 因此, 影响波前检测精度的因素

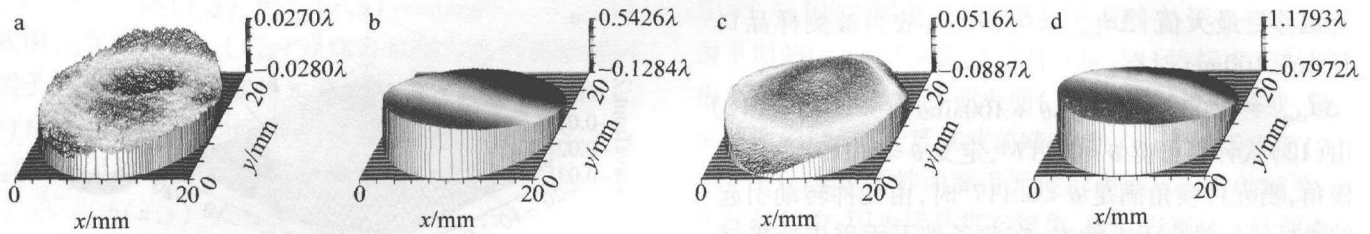


Fig. 5 Test results of fused silica

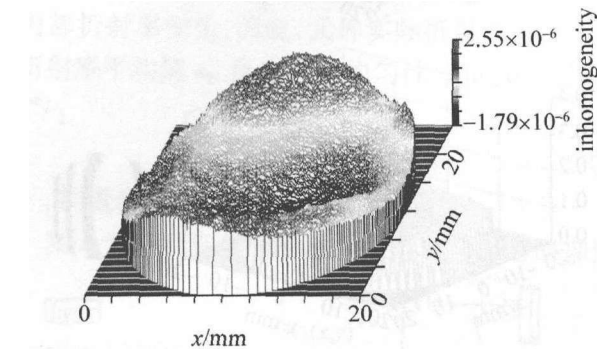


Fig. 6 Distribution of fused silica's inhomogeneity

主要有环境变化及干涉仪内部数据解包等过程引入的随机误差,其误差 PV 值优于  $1/(100\lambda)$ ,均方根值优于  $1/(1000\lambda)$ 。对(13)式求标准差有:

$$\sigma\Delta n(x,y) = \frac{\sqrt{n_0^2\sigma^2[W_2(x,y) - W_1(x,y)] + (n_0 - 1)^2\sigma^2[W_4(x,y) - W_3(x,y)]}}{2(h_0 + x\tan\theta)} \quad (14)$$

由上分析可知,  $\sigma[W_2(x,y) - W_1(x,y)] = \sigma[W_4(x,y) - W_3(x,y)] = \frac{1}{100}\lambda$ ,则(14)式可简化为:

$$\sigma\Delta n(x,y) = \frac{\lambda}{100} \frac{\sqrt{n_0^2 + (n_0 - 1)^2}}{2(h_0 + x\tan\theta)} = 4.8 \times 10^{-7} \quad (15)$$

由此可知,利用该方法的检测准确度达  $4.8 \times 10^{-7}$ ,可用于光学元件光学非均匀性的高精度检测。

### 3 结论

将被测光学材料制成小楔角元件且将其数学模型简化为平板元件和一斜楔组成,利用计算机模拟测量过程证实测量方法的正确性。通过计算分析得出:当楔角  $\theta < 0.117^\circ$  时,由元件转动引入的坐标错位量小于 1 像素,因此,在第(4)测量步骤中无需进行坐标变

换即可用(13)式求得光学非均匀性分布,且楔角  $\theta < 0.117^\circ$  的光学元件加工目前也极易完成,因此在元件加工方面也不存在任何难点。同时利用该测量方法可以有效避免目前采用平板元件测量材料非均匀性而造成干涉混叠的现象,达到很高的测量精度,从而为高功率激光装置中所需各类元件加工前的材料选择提供可靠的数据支持。

### 参考文献

- [1] JI X L, TAO X Y, LU B D, *et al.* Influence of laser non-uniformity and thermal effects in an inner optical system on the far-field behavior [J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 31(10):1193-1197 (in Chinese).
- [2] REITMAYER F, SCHUSTER E. Homogeneity of optical glasses[J]. Applied Optics, 1972, 11(5): 1107-1111.
- [3] LIU L Q, ZHU Q H, ZHOU K N, *et al.* Wavefront distortion measurement in high power ultra-short pulse Ti: sapphire laser system[J]. Laser Technology, 2007, 31(1):95-97 (in Chinese).
- [4] TENTORY D. Homogeneity testing of optical glass by holographic interferometry[J]. Applied Optics, 1991, 30(7):1399-1404.
- [5] GUO P J, YU J Ch, DING Zh Z, *et al.* Absolute testing method of the homogeneity of optical glass[J]. Laser Journal, 2003, 30(9): 1399-1404 (in Chinese).
- [6] CHIAYU A, JAMES C W. Measurement of the inhomogeneity of a window[J]. Optics Engineering, 1991, 30(9): 1399-1404.
- [7] ZHANG H R, XU G F, LI B, *et al.* Measurement of optical homogeneity of MgO: LiNbO<sub>3</sub> crystal for optical waveguide [J]. Laser Technology, 1999, 23(6):342-343 (in Chinese).
- [8] CHEN G B. Uniformity of local optical thickness for GaN-based material[J]. Laser Technology, 2006, 30(3):301-303 (in Chinese).
- [9] ZHAO L, ZHAO Y P, YANG J, *et al.* Uniformity test of optical glass by laser holography[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 98-101 (in Chinese).
- [10] ROBERTS F E, LANGENBECK P. Homogeneity evaluation of very large disks[J]. Applied Optics, 1969, 8(11):2311-2314.