

Mirau 相移干涉法测量微透镜阵列面形*

焦国华, 李育林, 胡宝文

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要:基于 Mirau 相移干涉法, 在实验室环境下对微透镜阵列的微表面形貌进行了轮廓测量. 实验使用 He-Ne 激光器作为光源, 干涉成像系统由 Mirau 干涉物镜和其他光学元件组成. 在实验中使用压电陶瓷执行器作为相移器, 通过 5 步相移法计算待测表面形貌. 实验结果表明, 基于 Mirau 相移干涉法对微透镜阵列面形的测量, 水平分辨率达到 $1.1 \mu\text{m}$, 垂直测量准确度达到 6.33 nm , 垂直测量范围为 $5 \mu\text{m}$. 对于微透镜阵列的面形测量, 通过将微透镜阵列划分为若干微小区域以保证局部面形最大高度小于 $5 \mu\text{m}$, 然后辅以精密平移机构进行若干次 5 步相移法测量局部面形, 再利用相位重建所得的数据进行拼接和 3D 轮廓重建, 最终得到整个微透镜阵列的精确微表面形貌.

关键词: Mirau 干涉; 相移干涉法; 面形测量; 5 步相移法; 压电陶瓷; 微透镜阵列

中图分类号: TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)10-1924-4

0 引言

近几年来随着表面形貌测量技术的不断深入发展, 表面检测技术主要在两个方面有重大的突破, 即纳米测量与三维全域测量. 在纳米测量方面, 自从 G. Binnig 和 H. Rohrer^[1] 等学者于 1982 年发明扫描隧道显微镜技术实现了对原子级大小表面微观形貌的检测以来, 超精密表面检测技术有了长足发展, 其准确度可达纳米尺度以下的超微观几何形貌测量. 由于许多光学元件表面粗糙度已小到 0.1 nm 的程度, 所以以纳米为基本测量单位需求的超精密光学元件更是到处可见, 未来的发展更是不容忽视.

目前用于超精密表面检测的方法主要有光探针法^[2]、扫描显微镜^[3-4]及显微干涉仪^[5]等三种技术, 这些方法各有其特点而适用于不同的检测需求. 光探针法和扫描显微镜这两种方法均具有三维表面形貌测量的能力, 准确度均可达纳米级甚或次纳米级, 但以探针方式获取到的数据均为点数据, 必须配合高准确度的扫描机构才能达到全域测量的目的. 虽然这两种方式都是非接触式测量, 由于准确度需求高, 扫描移动取样的间隔均很小, 故全域测量的时间较长, 且行程愈大所对应的移动机构准确度要求也就愈高. 与光探针法和扫描显微镜二种方法相比, 显微干涉仪不仅测量准确度可达纳米级, 而且一次可测定一定面积范围内的全面性表面微观形状^[6-8], 尤其是结合移相干涉术^[9-11], 全域测量的准确度与

速度均得到提高. 本文利用 Mirau 相移干涉法, 测量了微透镜阵列的微表面形貌. 结果表明, 水平分辨率达到 $1.1 \mu\text{m}$, 垂直准确度为 6.33 nm , 垂直测量范围为 $5 \mu\text{m}$.

1 Mirau 相移干涉法

为了对光学元件表面自动测试时, 干涉仪所得的干涉图定量分析常采用相移干涉术 (Phase shift interferometry). 相移干涉术是一种利用干涉的原理, 进行直接相位测量的方法, 引入一个已知的相位变化量于干涉图中, 使干涉图产生动态的变化, 并利用计算机控制, 采集数幅干涉图. 再根据引入相移的运算公式, 由干涉图的强度变化计算出各测量点的相位. 这是一种精密度很高的测量方式, 尤其以二维空间相位分布测量时更显著其效果, 其测量准确度可达 $\lambda/100$ ^[12]. 这种干涉图相位变化基本上是以相移器 (Phase shifter) 产生相位移的方式进行的.

1.1 Mirau 干涉仪

Mirau 干涉仪的构架如图 1. 其主要的干涉原理是将激光经一显微物镜, 透过一片参考板, 此参考板上镀有一个反光点. 当光通过参考板打到第二片分光镜时, 光分为两路, 一路光反射后打到参考板上的反光点再反射至分光镜, 而另一路光穿透分光镜打在待测物表面, 然后反射至分光镜的位置. 当这两路光重合之后, 即发生干涉现象.

Mirau 干涉仪的特点是只使用一个显微物镜, 因此不会使两相干光束引入附加的光程差. 此外, 由于参考光和测量光路近似共路, 因此可排除很多干扰的影响. 但由于和被测表面之间需放置参考板和

* 国家自然科学基金重点课题 (60337030) 资助
Tel: 029-88887502 Email: ghjiao@opt.ac.cn
收稿日期: 2007-01-09

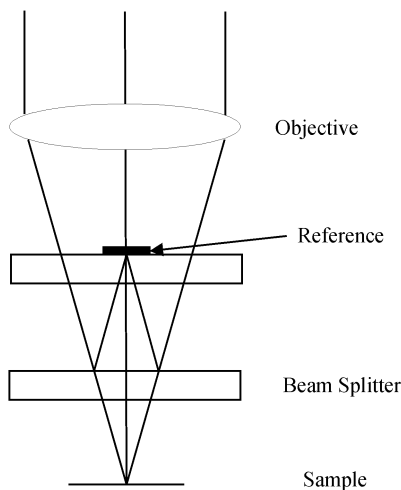


图 1 Mirau 干涉仪构架

Fig. 1 Mirau interferometer

分光镜,因此 Mirau 干涉仪只能使用工作距离较长的显微物镜,致使显微物镜的数值孔径受到限制,在 Mirau 干涉仪中,显微物镜放大一般为 $10\times, 20\times$.

1.2 相移干涉检测原理

在准单色条件下,双光束干涉条纹的光强为

$$I(x, y) = I_0(x, y)(1 + \gamma_0 \cos(\varphi(x, y)))$$

式中, $I(x, y)$ 为干涉条纹光强, $I_0(x, y)$ 为直流分量, γ_0 为干涉条纹对比度, $\varphi(x, y)$ 为被测面和参考面对应点的相位差.

在相移干涉中,由于人为引入了相移量,干涉条纹光强为

$$I_i(x, y) = I_0(x, y)(1 + \gamma_0 \cos(\varphi(x, y) + \alpha_i))$$

式中, i 为相移次数, $I_i(x, y)$ 为第 i 次相移后的干涉条纹光强, α_i 是第 i 次相移时人为引入的相移量.

对 5 步相移法,可采用 Hariharan 五步相位还原算法^[6],当 $\alpha_i = i\pi/2$ 时

$$\tan \varphi(x, y) = \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1}$$

式中 I_1, I_2, I_3, I_4 和 I_5 分别为 5 步的光强值. 可以通过相位解包裹(Phase unwrapping)得到被测面相位 $\varphi(x, y)$,进而得到被测面各点的高度值,从而得到微表面的三维形貌.

相移器选用压电陶瓷执行器(Piezoelectric translator, PZT),通过改变加在压电陶瓷上的电压的大小改变其位移量. PZT 移动和干涉光束相位变化的关系为

$$\Delta z = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{2\pi} \Delta \phi = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta \phi$$

式中 Δz 为 PZT 移动的距离; $\Delta \phi$ 为引起的相位变化. 在系统中,波长 λ 为 633 nm,则 PZT 移动 79.125 nm($\lambda/8$)时,引入的相位变化为 $\pi/2$.

2 系统实现

实验架构如图 2. 光学系统由一 He-Ne 激光

器,经一扩束镜形成平行光,再经由准直透镜组产生一均匀的平面波前(Wavefront),经分光镜(Beamsplitter)将平面波前传至 Mirau 干涉仪,最终将待测面形成的干涉条纹成像在 CCD 靶面,利用图像采集卡将干涉图获取到计算机上显示和处理.

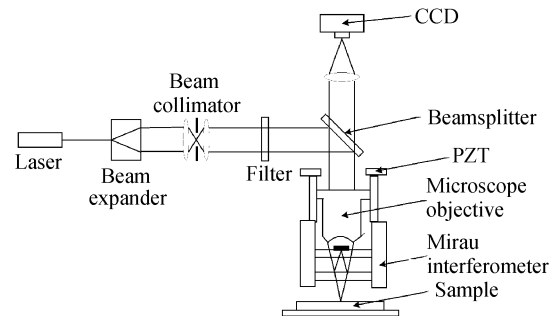
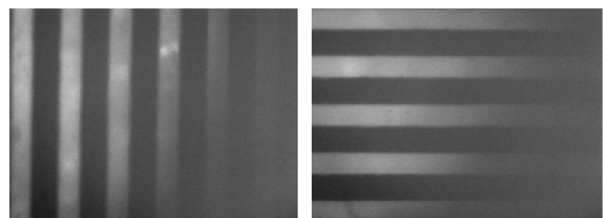


图 2 Mirau 相移干涉仪实验构架示意图

Fig. 2 The profile measurement system with Mirau phase-shifting interferometer

PZT 相移器由计算机通过 PZT 驱动电路进行控制,以等位移量 $\lambda/8$ 连续平移参考面五个位置,于是可观察到 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 和 360° 的干涉图,并由图像采集卡来获取这五张干涉图,而每一张干涉图上的光强信号都可利用计算机予以数字化处理. 而后采用 Hariharan 五步相位还原算法,可将待测面相位变化精确算出. 另经 Zernike 多项式拟合后,可求得待测面的表面轮廓图. 应用干涉原理可获得相位变化与光程差之对应关系,据此求出待测面的高度变化图.

图像采集系统包含了两个部分:图像接收部分和图像采集适配卡. 图像接收部分采用 SONY 公司所生产的型号为 XC-75 的 CCD 摄像机,它采用了 1/2 英寸的芯片,有 768×494 个像素点. 图像采集适配卡则是采用 Matrox 公司出产的 Meteor-II 图像采集卡,此图像采集卡的分辨率模式为 640×480 个像素点,因此系统的干涉图的图像分辨率为 640×480 个像素点. 对于干涉图的空间分辨率,使用了一个 200 lpi 的光栅片进行测量,对图像的 X 轴与 Y 轴测量图分别如图 3(a)和(b),其中 X 轴影像有 6 lpi, Y 轴影像有 4.5 lpi,即测量出的图像范



(a)The resolution image of X axis (b)The resolution image of Y axis

图 3 利用光栅对图像采集系统空间分辨率测量的测量图
Fig. 3 The resolution image of grating acquired by the image system

围为 $0.76 \text{ mm} \times 0.57 \text{ mm}$, 所以其水平分辨率为 $1.1 \mu\text{m}$.

样品放置在一个精密 X/Y 平移台上, 平移台采用精密丝杠机构, 螺距为 2 mm , 步进电机步进角为 1.8° . 在步进电机的控制上, 采用单片机控制直流电压驱动的细分方法, 实现了 32 微步驱动, 从而实现平移台 X、Y 向每步位移为 $0.3125 \mu\text{m}$. 由于图像采集系统的水平分辨率为 $1.1 \mu\text{m}$, 所以平移台的运动准确度足够保证多点 Mirau 相移干涉法测量后的拼接准确度.

3 系统测试

在系统的测试实验中, 用于检验 Mirau 相移干

涉法测量准确度的样品是中科院西安光机所微光学研究小组研制的 PMMA 聚合物微透镜阵列 ($10 \times 10, \Phi=1.6 \text{ mm}, h=0.28 \text{ mm}, \text{Roughness}=6.3 \text{ nm}$), 其参量已经其他仪器测量表征^[13]. 通过对比 Mirau 相移干涉法测量结果和其他仪器的测量结果, 可以间接反映系统的测量准确度.

调节 Mirau 干涉仪, 在产生干涉条纹后, 使用 PZT 控制器进行相移干涉, 即 PZT 每移动 79.125 nm 就采集一幅相移干涉图, 如此便可采集五张相移干涉图, 图 4 为微透镜阵列实测时通过 PZT 移相得到的五张相移量间距各为 90° 的干涉图.

然后, 通过移动平移台改变采样点坐标 X/Y 重新采集相移干涉图, 采集了整个微透镜阵列的相移

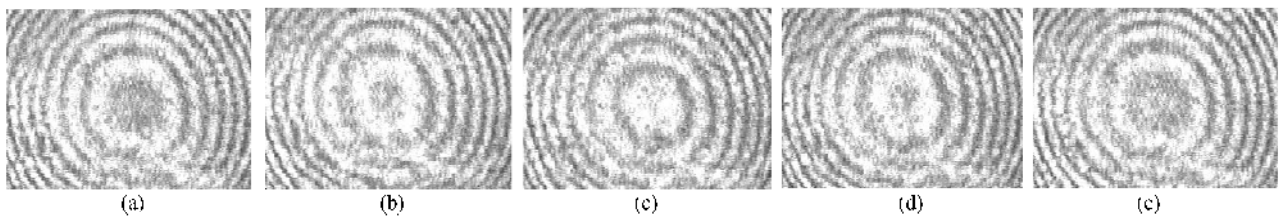


图 4 Mirau 相移干涉仪对微透镜阵列的一个采样点的五张相移干涉图

Fig. 4 Five interference images of a sample point in the microlenses array with the Mirau phase-shifting interferometer

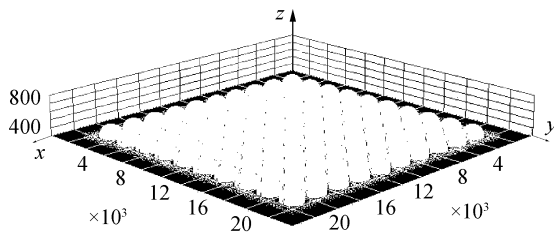


图 5 微透镜阵列的 3D 轮廓重建图

Fig. 5 The 3D rebuilding profile image of the microlenses array

涉图之后, 利用五步相移公式进行相位重建, 再把相位重建所得的数据进行拼接和 3D 轮廓重建, 图 5 为微透镜阵列的 3D 轮廓重建图.

测试数据经计算分析后得到: PMMA 聚合物微透镜阵列样品的直径为 1.598 mm ($\Phi_{\text{max}}=1.606 \text{ mm}$, $\Phi_{\text{min}}=1.592 \text{ mm}$); 矢高为 $279.367 \mu\text{m}$ ($h_{\text{max}}=281.140 \mu\text{m}$, $h_{\text{min}}=279.080 \mu\text{m}$); 间隙为 0.406 mm ($g_{\text{max}}=0.413 \text{ mm}$, $g_{\text{min}}=0.401 \text{ mm}$); 表面粗糙度为 13.7 nm ($Ra_{\text{max}}=22.8 \text{ nm}$, $Ra_{\text{min}}=7.5 \text{ nm}$). 对比其他仪器的测试结果, 除了表面粗糙度外, 参量基本上是一致的. 对于表面粗糙度的测量误差, 可能由于样品原来表面粗糙度测量点数 (100 点左右) 远远小于 Mirau 相移干涉法对整个阵列测量的点数 ($640 \times 480 \times S_{\text{all}}/S_{\text{ome}}=307200 \times (20 \times 20)/(0.76 \times 0.57)=283656510$); 还有 Mirau 相移干涉法本身的测试的准确度为 nm 量级, 故准确度要求低于 nm 量级的表面粗糙度测量必须选用其他方法.

4 结论及展望

通过对 Mirau 相移干涉仪的研究, 解决了测量微透镜阵列面形的问题, 使得对微透镜阵列的微透镜直径、矢高、轮廓测量准确并且表征得更直观, 从而对微透镜阵列乃至为光学器件的研制有着很重要的意义. 本研究后续的工作关键在于解决如何增加影像采集速度及自动对焦功能, 以便快速获得测量结果并实现完全自动化测量, 以及减少干涉图的影像噪音, 从而提高相位重建的数据准确性.

参考文献

- [1] BINNIG G, ROHRER H. Scanning tunnel microscopy from birth to adolescence[R]. Nobel Lecture, 1986.
- [2] AKTOUF C, PANNETIER B, AUGER P L, et al. On-line testing of embedded systems using optical probes; system modeling and probing technology [C]. *Proceeding of the Eighth IEEE International On-Line Testing Workshop*, 2002: 191.
- [3] MIYAJIMA H, ASAOKA N, ISOKAWA T, et al. Product development of a MEMS optical scanner for a laser scanning microscope[C]. *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, 2002: 552-555.
- [4] ODE T. A new technique for optical 3D measurements with a confocal scanning laser microscope [C]. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1994: 672-676.
- [5] BHUSHAN B, WYANT J C, KOLIOPOULOS C. Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry [J]. *Appl Opt*, 1965, 24(10): 1489-1497.
- [6] Li Qing-xiang, Xu Yu-xian, Xu Yi, et al. Application of digital

- image manage in micro-topography measure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11):1372-1375.
- 李庆祥,徐毓娴,许谊,等.表面微观形貌测量中数字图像处理的应用[J].光子学报,2001,**30**(11):1372-1375.
- [7] GUO Tong, HU Chun-guang, HU Xiao-dong, *et al.* Measuring nanoscale motions of microdevices using a mirau interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10):1542-1545.
- 郭彤,胡春光,胡晓东,等.利用 Mirau 显微干涉仪测量微器件的纳米级运动[J].光子学报,2005,**34**(10):1542-1545.
- [8] ZHANG Hong-xia, ZHANG Yi-mo, JING Wen-cai, *et al.* A large field phase shifting interference microscope for surface topography measurement [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(8):934-936.
- 张红霞,张以谟,井文才,等.微表面形貌大视场检测相移显微干涉仪研制[J].光电子·激光,2006,**17**(8):934-936.
- [9] HARIHARAN P, OREB B F, EIJU T. Digital phase-steeping interferometry: effect of multiply reflected beams [J]. *Appl Opt*, 1987, **26**(13):2504-2506.
- [10] CHENG Y Y, WYANT J C. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry [J]. *Appl Opt*, 1985, **24**(18):3049.
- [11] HUI Mei, WANG Dong-sheng, DENG Nian-mao, *et al.* The solution of best sampling manner in phase-shifting interferometry based on matrix condition number [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):477-480.
- 惠梅,王东生,邓年茂,等.用矩阵条件数求解相移最佳采样方式[J].光子学报,2003,**32**(4):477-480.
- [12] CREATH K. Phase-measurement interferometry techniques [J]. *Progress in Optics*, 1988, **26**:349-393.
- [13] LI Yu-lin, JIAO Guo-hua, LI Tong-hai, *et al.* Micro-optic lenses fabrication and applications [C]. *SPIE*, 2006. **6038**:19.

Mirau Phase-shifting Interferometer for Profile Measurement of Microlenses Array

JIAO Guo-hua, LI Yu-lin, HU Bao-wen

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

Received date: 2007-01-09

Abstract: Based on the Mirau phase-shifting interferometer technology, a interferometer system is developed to measure the profile of microlenses array. The light source of the interferometer system is a He-Ne Laser. The interference image system consists of a Mirau interference objective and other optical elements. A piezoelectric transducer (PZT) is used for the phase shifter. The profile of microlenses array is obtained with interferograms by five-step phase-shifting algorithm. The result shows that the horizontal resolution is $1.1 \mu\text{m}$, the vertical measurement range is $5 \mu\text{m}$ and the vertical testing value is accuracy within 6.33 nm of the Mirau phase-shifting interferometer. In the measuring of the profile of microlenses array, the whole array were divided into many micro parts and ensured the maximum high of each part is less than $5 \mu\text{m}$. The profiles of each part can be acquired by the Mirau phase-shifting interferometer method with the precise motion unit. The accurate profile of the whole microlenses array was gained by using the data splice and 3D reconstruction technology.

Key words: Mirau interference; Phase-shifting interferometer; Profile measurement; Five-step phase-shifting algorithm; Piezoelectric transducer; Microlenses array



JIAO Guo-hua was born in Jiangxi Province in 1979. He received his Master's degree from Department of Computer Science and Engineering in Xi'an Institute of Technology in 2003. At present, he is working for his Doctorial degree in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interesting includes photoelectric measurement technology and computer engineering.