

连续表面微透镜列阵元件检测

邓启凌 杜春雷 王长涛

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室,成都 610209)

摘 要 系统分析了连续表面微透镜列阵的几何参量和光学性能的检测方法和评价标准,针对典型的折射型聚焦列阵元件,给出其结构尺寸及光学性能的测试结果,两者结果一致.从而建立了一套通过测试元件的几何参量、加工误差及光学性能指标来综合评估微光学元件性能的方法.

关键词 微光学元件;检测;连续表面

中图分类号 TB256;TB96 **文献标识码** A

0 引言

微透镜列阵光学元件具有尺寸小、重量轻、易集成等优点,在军事、科研等各个领域发挥着重要的作用^[1,2].微透镜列阵光学元件结构尺寸在几微米到几百微米之间,列阵数目从几百到几千甚至几万;另一方面,它在光学系统中的应用主要集中在光束聚焦、信号传递和低分辨率成像.由于微透镜列阵具有以上特点,传统宏观透镜元件的一些检测方法比如星点法、分辨率板、传递函数等不太适合微透镜列阵元件检测^[3].本文从几何参量指标和光学性能指标两方面系统地讨论了连续表面微透镜列阵的一些常规检测方法和评价标准,并且指出两方面检测结果在很大程度上是一致的.

1 微透镜列阵几何结构尺寸测量

1.1 面形误差

评价连续面形微透镜加工质量好坏的一个主要标准是其面形控制的准确度.实际制作的元件面形与设计面形之间存在差异,称作面形误差,它在很大程度上决定了微透镜的光学性能.利用台阶仪测量透镜单元的实际面形轮廓,再与设计曲面进行面形拟合,估算出每个位置的面形误差.通常为了达到一定的透镜分辨本领或者聚焦效果,一般要求面形最大加工误差小于0.05 μm.这种情况下,可以通过测量透镜浮雕深度来确定透镜的焦距.例如小数值孔径下,折射型元件的焦距与口径及浮雕深度存在以下关系^[4]

$$f = \frac{d^2}{8(n-1)h} \quad (1)$$

式中 f 为元件焦距, d 为口径, h 为浮雕深度, n 为折射率.采用移动掩模法、灰阶掩模法制作的微透镜元件的口径误差很大程度上由掩模板加工能力决

定,误差很小.而由曝光、显影以及刻蚀的影响而造成的浮雕深度误差是造成焦距误差的主要因素.

1.2 填充因子

元件的填充因子 ρ 是指单元元件的有效通光面积 S_0 与单元总面积 $S_{\text{总}}$ 的比值,它决定了元件对光能的汇聚能力^[5].

$$\rho = S_0/S_{\text{总}} \quad (2)$$

填充因子与元件的填充形状有关,如采用圆孔径,填充因子最大为78.5%.采用方形孔径和六边形孔径填充,理论上填充因子可达到100%,但由于透镜孔径边缘处面形误差的存在使得其有效折光能力下降,填充因子降低.面形控制范围越大,加工误差越小,填充因子就越高.

以采用方形孔径填充的元件为例,最大面形误差往往发生在单元透镜的四个角上,因此填充因子的计算表达式为

$$\rho = (S_{\text{总}} - 4S_{\Delta})/S_{\text{总}} \quad (3)$$

式中, S_{Δ} 为单元透镜边角处折光能力差的区域面积.实际检测中可利用光学显微镜、SEM等设备观察、测量有效通光孔径大小,估算出元件实际填充因子.当放大倍率足够大时,填充因子估算误差小于±1%.

1.3 表面粗糙度

表面粗糙度是指加工表面上的微观不平度.微光学元件的成形包括多个工艺步骤,由于光刻胶、基片及去离子水的洁净度不高,或在光刻、刻蚀过程中多种因素的影响都有可能造成元件表面粗糙度值增大^[6].表面粗糙度评定通常采用浮雕轮廓偏距 $y(x)$ 的均方根值

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y^2(x_i)}{n-1}} \quad (4)$$

随着数值孔径加大,刻蚀深度增加,元件粗糙度值相应变大,一般控制在15 nm内.利用粗糙度仪可以精确测量元件的粗糙度.

1.4 列阵均匀性

微透镜列阵各子单元之间的光学性能的一致性

是评价其质量好坏的一个非常重要的指标. 通常情况下,光刻设备、刻蚀设备空间内的不均匀以及加工误差的存在导致制作出的不同区域各微透镜单元之间略有差异,这种差异一般都被控制在允许范围内. 但特殊情况下,基片加工质量较差或者胶层不均匀等往往导致阵列中某一个或几个透镜单元质量与别的单元相差大,因而阵列均匀性较差.

实际测量中利用中低倍率光学显微镜观察阵列元件表面,检查有无一致性较差的区域,进而对阵列元件不同区域抽样得到多个测量值,分析其均匀性. 例如,抽样测量单元透镜的浮雕深度,利用公式(1)计算出对应单元的焦距,定义焦距均匀性误差为

$$\sigma_f = \frac{f_{max} - f_{min}}{\bar{f}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 f_{max} 为微透镜阵列子单元焦距最大值, f_{min} 为最小值, \bar{f} 为焦距平均值.

2 光学性能测量

以上讨论了微透镜阵列元件的几种几何参数的定义和测量方法,下面我们可以通过实验光路对微透镜阵列元件的光学性能进行测量. 测试系统如图1所示,激光通过针孔滤波、透镜准直后形成均匀的平行光,照射待测微透镜阵列. 将 CCD 相机置于微透镜阵列焦面,采集焦面能量分布数据. 采用选用动态范围大的 CCD 相机、多次测量取平均值、减小环境噪音影响等方法^[7],以减小系统测量误差.

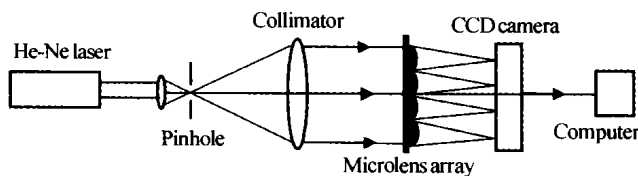


图1 测量系统图
Fig. 1 Measuring system

微透镜阵列常用的光学性能测量指标主要有透镜焦距、焦斑质量和焦斑点阵均匀性. 这里我们主要讨论焦斑质量的评价方法. 描述焦斑质量的参量很多,有焦斑半径、次瓣水平、衍射效率等. 我们在实际检测中采用环围能量来评价焦斑质量这种方法. 根据 CCD 采集到的焦斑图像数据计算焦斑中心处不同大小环围内的能量值,当积分能量达到总能量的 81.5% 时的积分区域大小 a 定义为焦斑半径. 利用测量焦斑半径 a 与理论衍射焦斑半径 a_0 的比值 n 来统一表征透镜焦斑质量的好坏.

$$n = a/a_0 \quad (6)$$

微透镜达到衍射极限时, n 为 1. n 值越小,代表光能汇聚程度越高,元件的性能越好,反之光斑能量弥散,聚焦效果差.

3 实际测量结果

利用上面介绍的方法实际测量了相同参量的两个微透镜阵列元件,其设计指标为:中心波长 $0.6328 \mu\text{m}$;子孔径 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$;阵列数 75×75 ;焦距 6.7 mm ;抛物面面形.

3.1 结构尺寸测量结果

图2(a)、(b)分别是元件1、2的面形轮廓,元件的显微照片如图3(a)、(b)所示.

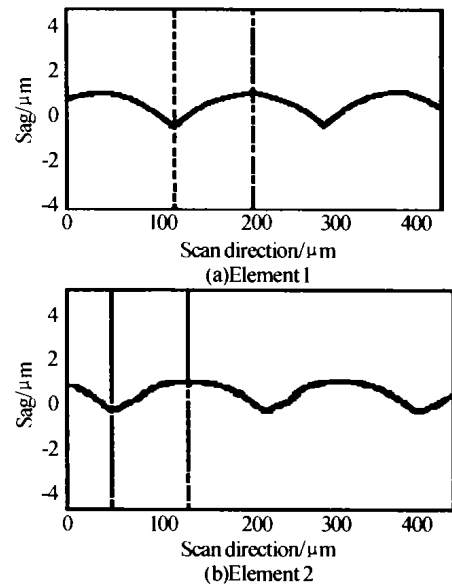


图2 被测元件浮雕轮廓图
Fig. 2 Relief profile of the tested elements

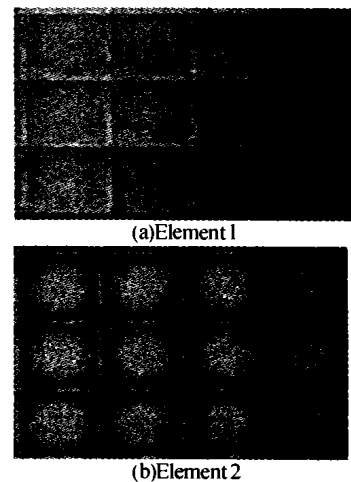


图3 被测元件显微照片
Fig. 3 Micro-photo of the tested elements

抽样测试元件1浮雕深度,计算出透镜焦距在 $6.6 \pm 0.1 \text{ mm} \sim 6.8 \pm 0.1 \text{ mm}$ 范围内,焦距均匀性误差为 3%. 由图3(a)估算元件填充因子为 $98 \pm 1\%$. 利用 Zygo New view 200 型粗糙度仪测量,其粗糙度均方根值为 4.41 nm . 元件1与标准抛物面拟和,最大面形误差小于 50 nm .

元件2焦距在 $7.5 \text{ mm} \pm 0.1 \sim 8.5 \pm 0.1 \text{ mm}$ 范围内,焦距均匀性误差为 12.5%;填充因子为 $73 \pm 1\%$;元件粗糙度测量值为 7.64 nm ;最大面形

误差为 150 nm. 通过上述测试、分析,可以初步判定,元件 1 的光学性能要大大优于元件 2.

3.2 光学性能测试结果

元件的设计中心波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$, 采用 He-Ne 激光器为光源, 实际测量元件 1 的焦距为 $6.7 \pm 0.1\ \text{mm}$, 元件 2 的焦距为 $8.0 \pm 0.1\ \text{mm}$. 光斑分布如图 4(a)、(b) 所示, 焦斑环围能量分布如图 5, 元件 1 焦面上光斑排列均匀、形状规则对称、中央主极大能量集中, 旁瓣能量少; 元件 2 焦面上光斑排列均匀、形状较规则, 但背景噪音及旁瓣能量较大.

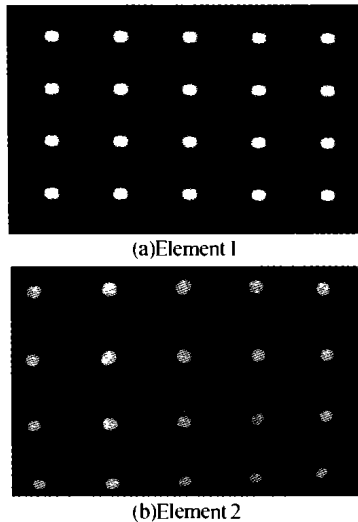


图 4 焦斑分布
Fig. 4 Focal spots of the microlens array

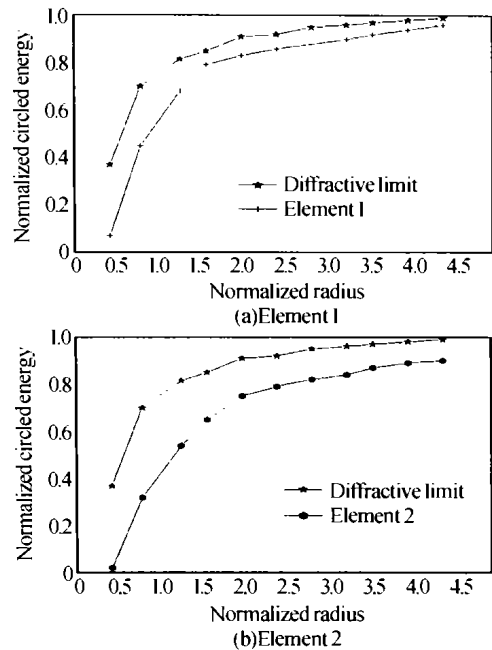


图 5 透镜焦斑环围能量测试结果

Fig. 5 Testing results for circled focus energy

采用环围能量积分的方法, 求得元件 1 和元件 2 的 n 倍衍射级次分别为 1.75 和 2.453.

为方便比较, 表 1 列出了两元件的几何参量和光学参量测试结果. 可以看出, 几何参量测试结果和光学性能指标测量两方面检测结果在评价微透镜阵列质量上是一致的.

表 1 测试结果比较

元件	几何参量测试结果			光学参量测试结果		
	焦距/mm	焦距误差	填充因子	粗糙度/nm	焦距/mm	n 倍衍射级次
1	$6.6 \sim 6.8 \pm 0.1$	2.8%	$98.9 \pm 1\%$	4.41	6.7 ± 0.1	1.75
2	$7.5 \sim 8.5 \pm 0.1$	12.4%	$73 \pm 1\%$	7.64	8.0 ± 0.1	2.453

4 结论

由于几何参量及加工误差直接导致和反映了微透镜光学性能上的优劣, 因此有针对性的检测微透镜阵列的几何参量, 例如面形、填充因子、粗糙度等, 可以用于指导透镜的加工, 提高质量. 另一方面, 光学性能则是元件质量的综合反映. 在元件研制过程中, 主要检测其几何参量, 控制加工误差, 元件制作完成后再对其光学性能进行综合评价, 两方面的测量结果一致, 但侧重点各不相同, 二者结合可以全面反映微透镜阵列元件的性能.

参考文献

- 邓启凌, 杜春雷. 微光学元件复制技术研究. 光子学报, 2002, **31**(1): 110 ~ 113
Deng Q L, Du C L. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 110 ~ 113
- 刘德森, 胡建明. 平面交叉玻璃波导型微透镜阵列光学性能研究. 光子学报, 2003, **32**(7): 782 ~ 785
Liu D S, Hu J M. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 782

- Alma A, Camacho P, Cristina Solano. Simple method to measure the focal length of lenses. *Optical Engineering*, 2002, **41**(11): 2899 ~ 2902
- 田维坚, 隋成华, 陈波. 折射型微透镜阵列焦距的测量方法. 光学仪器, 1999, **21**(2): 5 ~ 8
Tian W J, Sui C H, Chen B. *Optical Instruments*, 1999, **21**(2): 5 ~ 8
- 杜春雷. DOE 的原理性能及其在传感器中的应用研究 [博士论文]. 四川大学, 1997
Du C L. Research on Principle, Performance of DOE and its Application in the Sensors [Ph. D. thesis]. Sichuan University, 1997
- 曹召良, 卢广. 亚微米尺寸元件的离子束刻蚀制作. 光子学报, 2003, **32**(6): 653 ~ 656
Chao Z L, Lu G. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 653 ~ 656
- 邓启凌, 杜春雷, 杨泽平. 衍射微透镜阵列质量评价方法研究. 光电工程, 1998, **25**: 34 ~ 38
Deng Q L, Du C L, Yang Z P. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**: 34 ~ 38

Measurement of the Continuous Surface Microlens Array

Deng Qiling, Du Chunlei, Wang Changtao

*State Key Laboratory of Optical Technologies for Micro-fabrication, Institute of Optics and Electronics,
Chinese Academy of Science, Chengdu 610209*

Received date: 2003-10-27

Abstract A method is proposed for measuring and evaluating the continuous surface microlens array. The optical performance is determined by the geometrical parameters and the quality of the element related to the accuracy of size and profile as well as roughness, and the fabrication errors definitely exist during the micro-fabrication procedure, it is necessary to measure them precisely for controlling them to a certain degree. The structural sizes, surface shape error were analyzed, and the measured results are given against the typical refractive microlens array. The optical performances of the microlens array are evaluated through measuring the structural sizes and processing errors.

Keywords Microlens array; Measurement; Continuous surface



Deng Qiling was born in 1973, received her B. S. degree from Wuhan Technical University of Surveying & Mapping in 1996. From then on, she was engaged in diffractive optics and microfabrication technics research at State Key Lab of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences .