

文章编号 1004-924X(2013)05-1122-07

# 基于 Hartmann-Shack 波前检测原理的 微透镜阵列焦距测量

朱咸昌\*, 伍 凡, 曹学东, 吴时彬

(中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要:** 基于哈特曼波前传感器检测原理, 结合图像清晰度定焦技术, 提出了一种测量微透镜阵列焦距的方法, 介绍了测量系统的组成和原理。首先利用平行光管的出射平面波前在被测微透镜阵列焦面上成像, 利用标准透镜产生的球面波前在微透镜阵列焦面附近成像。然后, 根据平面波前和球面波前经过微透镜阵列成像时微透镜阵列焦面上光斑的偏移量, 计算相应的微透镜阵列单元的焦距。最后, 基于图像清晰度定焦技术, 通过不确定度分析和实验测量验证了该方法检测微透镜阵列焦距的可行性。测量结果表明, 该方法对微透镜阵列焦距检测精度可达到 3%; 同时, 一次测量可完成微透镜阵列多个子单元的焦距标定。相对于传统的检测方法, 该方法具有较高的检测精度和效率。

**关键词:** 微透镜阵列; 焦距测量; 波前检测; 哈特曼波前传感器; 图像清晰度

**中图分类号:** O436.1; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1122

## Focal length measurement of microlens-array based on wavefront testing principle of Hartmann-Shack sensor

ZHU Xian-chang\*, WU Fan, CAO Xue-dong, WU Shi-bin

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zhuxianchang@126.com*

**Abstract:** A method to measure the focal length of Microlens-Array (MLA) is proposed based on Hartmann-Shack wavefront measurement principle and the Focus Determining Technique by Image Definition (FDTID). The composition of the measurement system is introduced and the measuring principle is given. Firstly, the plane wavefront from a collimator is imaged nearby the focus of the MLA, and the spherical wavefront induced by the standard lens is also imaged on the focus. Then, the focal length of MLA is calculated by determining the excursion between plane wavefront and spherical wavefront measurements. Finally, an experiment based on the analysis of measurement uncertainty and the application of FDTID is preformed to validate the feasibility of the proposed method. The measuring results demonstrate that the focal length measurement precision is about 3% and several sub-lenses of the MLA can be determined at single shot. It concludes that this method has higher precision and efficiency in the focal length measurement of MLA as compared with traditional methods.

收稿日期: 2012-12-13; 修订日期: 2013-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61138007)



斑的偏移  $s$ , 即可完成微透镜阵列的焦距测量。理想状态下, 当标准透镜的焦距远大于被测微透镜阵列的焦距时, 平面和球面波前像面的位置基本一致。实际测量过程中, 二者存在一定的轴向位移, 需要根据几何光学知识进行估算和修正:

$$\Delta f = \frac{-ff'}{\Delta} = \frac{f^2}{F-L+f}, \quad (2)$$

式中:  $\Delta$  为标准透镜与微透镜阵列组成的光学系统的光学间隔;  $F$  为标准透镜的焦距;  $L$  为标准透镜和微透镜阵列间的空间距离。

### 3 测量结果

测量过程中为获取球面波前, 利用一个色差校正较好的双胶合透镜作为标准镜, 将它放置在被测微透镜阵列光路前产生相应的球面波前。如图 2 所示, 检测系统由 He-Ne 激光器、聚光镜、平行光管、标准透镜、微透镜阵列、CCD 探测器和光栅测微仪组成。

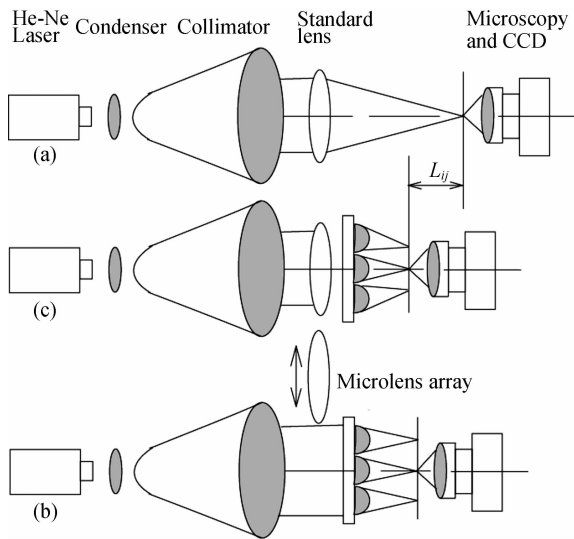


图 2 检测系统示意图

Fig. 2 Illustration of measuring setup

微透镜阵列焦距检测主要分 3 个步骤: (1) 利用图像清晰度函数定焦技术确定标准透镜的焦面位置; (2) 将被测微透镜阵列移入检测光路, 并将 CCD 探测器移动至微透镜阵列像面附近, 同样利用清晰度函数完成对微透镜阵列各个子单元的测

量, 并利用光栅测微仪测量微透镜阵列与标准透镜焦面间的距离  $L$ ; (3) 将标准透镜移出检测光路, 测量微透镜阵列各个子单元在平面波前和球面波前入射时光斑的偏移量  $s$ , 即可完成微透镜阵列焦距的测量。

该测量方法的核心技术是利用图像清晰度函数完成对标准透镜和微透镜阵列的定焦测量。由于计算简单, 基于图像梯度能量算法的清晰度函数可用于定焦检测, 其定焦评价函数为:

$$G = \sum_x \sum_y \left\{ \left[ \frac{\partial g_z(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[ \frac{\partial g_z(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right\},$$

$$g_x = \frac{\partial g_z(x, y)}{\partial x} = [g_z(x+1, y) - g(x, y)]^2,$$

$$g_y = \frac{\partial g_z(x, y)}{\partial y} = [g_z(x, y+1) - g(x, y)]^2. \quad (3)$$

式中:  $g_z(x, y)$  为光轴上坐标  $z$  处采集的图像光强分布函数,  $x, y$  为采集图像上的像素坐标。根据图像处理知识, 越接近焦面, CCD 探测器采集的图像越清晰, 其图像梯度评价函数值越大, 即焦面上函数为极大值。定焦测量时, CCD 探测器放置在微位移台上, 由步进电机驱动在被测透镜焦面附近, 以确定的步距逐帧采集图像; 将采集的图像依次编号, 并计算其相应图像的梯度定焦函数值, 通过定焦函数变化曲线, 完成对标准透镜和被测微透镜阵列的定焦测量:

$$L = L_0 + (u - v_{ij}) \cdot t. \quad (4)$$

式中:  $u$  为标准透镜定焦函数曲线取极大值时采集图像的编号;  $v_{ij}$  为微透镜阵列像面上第  $i$  行第  $j$  列的子单元的定焦函数曲线取极大值时的图像编号;  $t$  为步进电机的步距;  $L_0$  为两次定焦时初始位置间的距离。

根据 HSS 波前检测原理, 当球面波前入射时, 微透镜阵列细分的球面波前由于曲率半径变化较小可看成斜入射的平面波前。斜入射的平面波前的法线与主光轴的夹角为  $\alpha$ , 即微透镜阵列子单元中心与其像面上光斑中心的连线方向。由于球面波前由标准透镜产生, 其曲率中心位于透镜的焦点位置, 即: 微透镜阵列子单元中心, 该子单元像面上的光斑中心和标准透镜的焦点共线。CCD 探测器采集图像如图 3 所示。

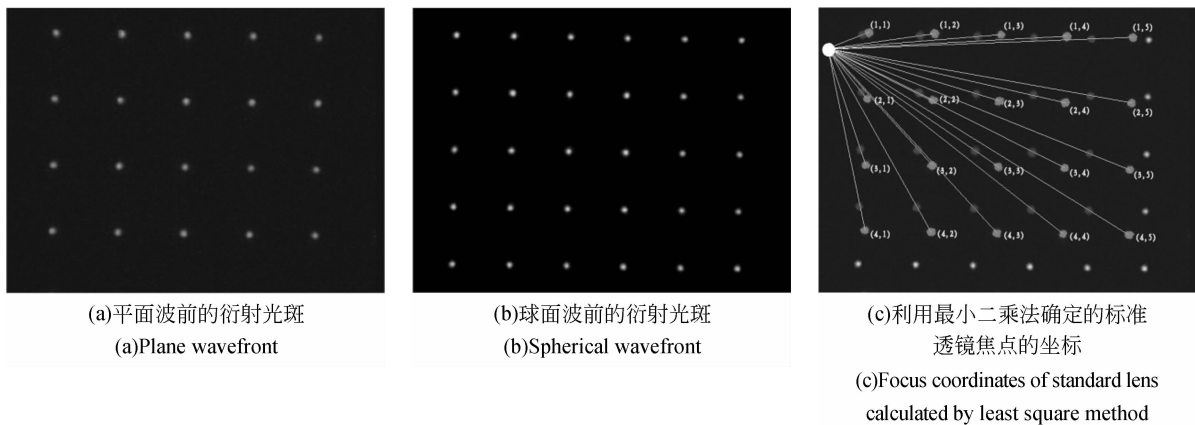


图 3 微透镜阵列焦面光斑分布图

Fig. 3 Distribution of light spots at focal plane of MLA

表 1 微透镜阵列焦距测量结果

Tab. 1 Results of focal length measurement of MLA

(mm)

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FL	8.40	8.42	8.26	8.47	8.45	8.40	8.38	8.41	8.43	8.44	8.43	8.45	8.48	8.46	8.44	8.47	8.44	8.45	8.47	8.45

根据图像梯度定焦评价函数确定微透镜阵列各个子单元的焦点位置,结合 CCD 探测器采集的图像可标定微透镜阵列各个子单元的中心位置坐标  $(x_{ij}, y_{ij})$ ; 同样可确定球面波前入射各子单元相应的光斑中心坐标  $(X_{ij}, Y_{ij})$ ; 根据最小二乘法即可确定标准透镜焦点坐标在采集图像上的坐标  $(x, y)$ 。如式(5)所示,  $m, n$  为 CCD 可测量的子单元行、列数。受 CCD 视场限制,一次采集可完成 4 行 5 列即 20 个微透镜阵列子单元的焦距检测。被测微透镜阵列的设计焦距  $f$  为 8.5 mm, 选取焦距  $F$  为 75 mm 的双胶合透镜作为标准透镜, 根据焦距计算公式(1)和修正公式(2), 焦距的测量结果如表 1 所示。

$$\begin{cases} \frac{y - y_{11}}{x - x_{11}} = \frac{Y_{11} - y_{11}}{X_{11} - x_{11}} \\ \vdots \\ \frac{y - y_{mm}}{x - x_{mm}} = \frac{Y_{mm} - y_{mm}}{X_{mm} - x_{mm}} \end{cases} \quad (5)$$

测量结果表明,利用 HSS 波前检测法测量微透镜阵列的焦距,一次可完成微透镜阵列多个子单元的测量,具有较高的检测效率,可用于单元数较多的微透镜阵列检测。

## 4 不确定度分析

根据微透镜阵列的焦距测量计算公式(1),其测量不确定度主要由 2 部分组成: CCD 探测器的垂轴方向测量误差  $U_d$  和  $U_s$ ; CCD 及光栅测微仪的轴向定位误差  $U_L$ 。

测量过程中,用  $4\times$  显微物镜和 CCD 组成探测系统以提高 CCD 的分辨率,标定探测器的参量  $1 \text{ pixel} = 1.886 \mu\text{m}$ 。根据不确定度合成原理:

$$U_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial d} U_d\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial s} U_s\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L} U_L\right)^2} \quad (6)$$

### 4.1 光斑中心轴距测量不确定度 $U_d$

微透镜阵列子单元中心与主光轴间的距离  $d$  由 CCD 探测器采集图像,利用 Matlab 分析确定光斑的中心进而计算相应的光斑中心距。通过多次测量,利用 Matlab 软件,采取不同的编程算法如质心法、光强迭代算法等确定光斑的中心。测量结果表明,软件确定的光斑中心的精度达 0.1 pixel,即  $0.2 \mu\text{m}$ 。另外,CCD 探测器玻璃窗口厚度及平面度会对光斑垂轴距离产生影响。该 CCD 探测使用 K9 光学窗口,厚度为 2 mm,平面度为  $1'$ 。将它作为一个楔形板分析,根据平行平板和楔形板的成像

分析,所引起的偏差低于  $0.01 \mu\text{m}$ ,合成可得  $U_d = 0.2 \mu\text{m}$ 。

#### 4.2 衍射光斑中心距测量不确定度 $U_s$

衍射光斑的中心距  $s$  的测量原理与  $d$  相同,其检测不确定度  $U_s = 0.2 \mu\text{m}$ 。

#### 4.3 焦面间距离测量不确定度 $U_L$

标准透镜和被测微透镜阵列焦面间的距离  $L$  引起的测量不确定度,主要由标准透镜及微透镜阵列的定焦误差引起。定焦误差分为两类:CCD 探测器的定焦误差和检测系统的光路误差。

##### 4.3.1 CCD 探测器定焦不确定度 $U_{L1}$

测量过程中,利用 Watec 公司生产的 Wat-535EX2 型 8 位黑白相机进行定焦测量,设置步进电机的步距为  $0.1 \text{ mm}$ ,分别在标准透镜和微透镜阵列焦面附近采集图像。步进电机移动 CCD 探测器分别在标准透镜和微透镜阵列焦面附近逐帧采集图像并依次将图像编号。以采集的图像编号为横坐标,以图像评价函数值为纵坐标,利用 Matlab 软件分析梯度评价函数的变化趋势并确定其极大值。图像梯度评价函数曲线如图 5 和图 6 所示。

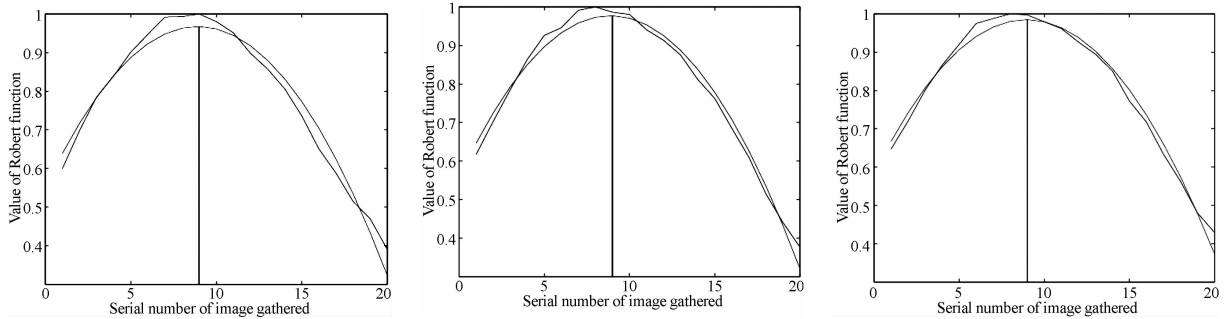


图 5 标准透镜定焦曲线

Fig. 5 Focus determining curves of standard lens

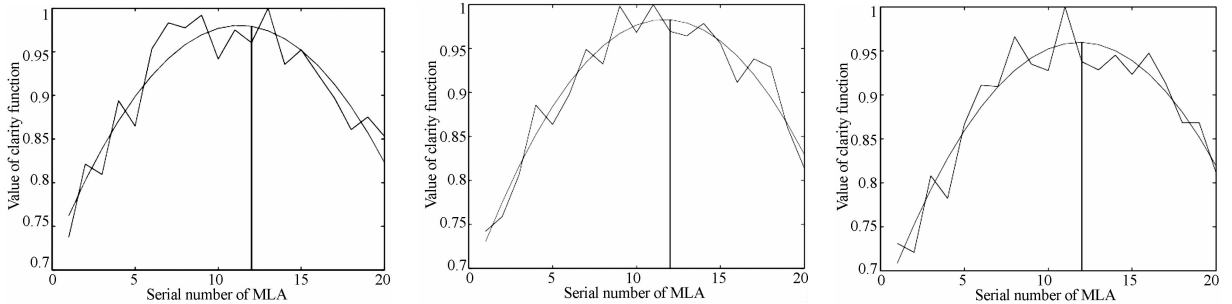


图 6 微透镜阵列子单元定焦曲线

Fig. 6 Focus determining curves of MLA sub-lens

由于 CCD 探测器噪声的影响,定焦曲线出现小范围的波动,利用二次曲线对图像梯度函数进行拟合。3 组测量结果表明,利用图像梯度评价函数可将标准透镜和微透镜阵列的某一子单元焦面确定在同一帧图像上。分别计算不同子单元区域的图像梯度评价函数,一组图像采集可完成微透镜阵列多个子单元的定焦检测。分析可得,图像梯度评价函数分的定焦精度  $U_{L1}$  不超过电机的步距  $0.1 \text{ mm}$ 。

##### 4.3.2 光栅测微仪测量不确定度 $U_{L2}$

CCD 探测器两次采集图像的初始位置距离  $L$

由光栅测微仪测量,其示值误差为  $3 \mu\text{m}$ ,取其测量不确定度  $U_{L2}$  为  $3 \mu\text{m}$ 。

##### 4.3.3 检测光路不确定度 $U_{L3}$

检测光路引起的测量不确定度主要是由平行光管的调焦产生的。利用实验室常用的 F-550 平行光管,用自准直法进行调节使星点板恰好位于平行光管物镜的焦面上,从而使得出射波前为平面波前。根据人眼清晰度法的调焦,取人眼极限分辨率  $\alpha_c$  为  $1'$ ,检测光源波长  $\lambda$  为  $550 \text{ nm}$ ,高斯目镜的焦距  $f_{eq}'$  为  $50 \text{ mm}$ ,数值孔径  $NA$  为  $0.1$ ,计算平行光管调焦的不确定度  $u_F$  为  $78 \mu\text{m}$ 。根据几何光学

垂轴放大率公式计算由此产生的标准透镜的定焦不确定度为  $1.45 \mu\text{m}$ ;微透镜阵列的定焦不确定度为  $0.02 \mu\text{m}$ ,合成测量不确定度  $U_{L3}$  为  $1.45 \mu\text{m}$ 。

根据误差合成原理,焦面间轴向测量不确定度  $U_L$  为  $0.1 \text{ mm}$ 。以不确定度最大的子单元为例: $d = 87.37 \mu\text{m}, s = 30.34 \mu\text{m}, L = 18.04 \text{ mm}$ ,计算误差源的误差灵敏度:

$$\frac{\partial f}{\partial d} = -\frac{s}{(d-s)^2}L = -168.28$$

$$\frac{\partial f}{\partial s} = \frac{d}{(d-s)^2}L = 484.61 \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial L} = \frac{s}{d-s} = 0.532$$

综合分析,各类测量不确定度及合成不确定度如表 1 所示。

表 1 测量不确定度

Tab.1 Measurement uncertainty

不确定度来源	光斑中心轴距 $U_d$	衍射光斑中心距 $U_s$	焦面间距离 $U_L$
标准不确定度	$0.2 \mu\text{m}$	$0.2 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$
合成不确定度	$U_f = \sqrt{(168.28 \times 0.2)^2 + (484.61 \times 0.2)^2 + (0.532 \times 100)^2} = 115.6 \mu\text{m}$		

取置信因子  $k = 2$ ,其扩展不确定度为  $231.2 \mu\text{m}$ 。分析表明,该方法的测量精度为  $3\%$ 。由此可知,用该方法测量微透镜阵列焦距,不仅具有较高的检测精度,还具有较高的检测效率。

## 5 结 论

本文根据 HSS 波前传感器检测原理,结合 FDTD,提出了一种微透镜阵列焦距的测量方

法。根据物理光学理论,分析了平面波前和球面波前通过微透镜阵列成像时焦面上光强分布的变化。通过不确定度分析和实验测量验证了该方法对微透镜阵列焦距检测的可行性。测量结果表明,该放大对微透镜阵列焦距的检测精度可达  $3\%$ ;同时,一次图像采集可分析和完成 20 个子单元的焦距测量,具有较高的检测效率,可用于单元数较多的微透镜阵列焦距的高精度检测。

## 参考文献:

[1] 郭方,王克逸,闫佩正,等. 用于大视场目标定位的复眼系统标定 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 913-920.  
GUO F, WANG K Y, YAN P ZH, *et al.*. Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 913-920. (in Chinese)

[2] SCHONBRUN E. A microfluidic fluorescence measurement system using an astigmatic diffractive microlens array [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1385-1394.

[3] TOLOSA A. Optical implementation of micro-zoom arrays for parallel focusing in integral imaging [J]. *Opt. Soc. Am.*, 2010, 27(3): 495-499.

[4] MIYASHITA T. Standardization for microlenses and microlens array [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(8B): 5391-5396.

[5] 殷智勇,汪岳峰,贾文武,等. 基于微透镜阵列光束均匀化的傅里叶分析[J]. 激光与红外, 2012, 42(2): 119-123.

YIN ZH Y, WANG Y F, JIA W W, *et al.*. Fourier analysis of light beam uniformity based on the microlens array [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(2): 119-123. (in Chinese)

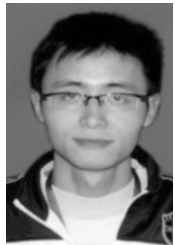
[6] 赵润,孙雷,王文军,等. 用于均匀照明的单片微透镜阵列面型设计 [J]. 材料与器件, 2011, 36(12): 915-919.  
ZHAO R, SUN L, WANG W J, *et al.*. Design of monolithic microlens array for homogeneous illumination [J]. *Materials and Devices*, 2011, 36(12): 915-919. (in Chinese)

[7] 张健,辛悦,刘伟奇,等. 基于微透镜阵列的三维成像 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1701-1706.  
ZHANG J, XIN Y, LIU W Q, *et al.*. Three-dimensional digital imaging based on microlens array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1701-1706. (in Chinese)

[8] 赵祥杰,骆永全,张大勇. 液晶微透镜阵列在波前传感领域的应用概述 [J]. 光电子技术, 2010, 30(3): 145-153.  
ZHAO X J, LUO Y Q, ZHANG D Y. The application of liquid crystal microlens array technology in

- the field of wave front sensor rearch [J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, 30(3): 145-153. (in Chinese)
- [9] 林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012(4): 337-351.  
LIN X D, XUE CH, LIU X Y, *et al.*. Currents status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2012(4): 337-351. (in Chinese)
- [10] 李晖, 张新宇, 张天序, 等. 电控可变焦  $128 \times 128$  元自适应液晶微透镜阵列 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2351-2358.  
LI H, ZHANG X Y, ZHANG T X, *et al.*. Electrically driving and controlling adaptive 128 element  $\times$  128 element liquid crystal micro-lens array with tunable focal length [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2351-2358. (in Chinese)
- [11] XIE D, ZHANG H H, SHU X Y, *et al.*. Fabrication of polymer microlens array with pneumatically diaphragm-driven drop-on-demand inkjet technology [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15186-15195.
- [12] BARDINAL V, DARAN E. Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter [J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6900-6907.
- [13] YI A Y, LI L. Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1707-1709.
- [14] LEI F, DANG L K. Measuring the focal length of optical systems by grating shearing interferometry [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(28): 6603-6608.
- [15] REICHEL T S, ZAPPE H. Combined twyman-green and mach-zehnder interferometer for microlens testing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(27): 5786-5792.
- [16] 张鹏, 曹学东, 吴时彬, 等. 基于图像测量技术的微透镜定焦方法研究 [J]. 仪器仪表用户, 2008, 5: 15-16.  
ZHANG P, CAO X D, WU SH B, *et al.*. The application of image processing technology for the measurement of micro-lens array focus [J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2008, 5: 15-16. (in Chinese)
- [17] 朱咸昌, 曹学东, 吴时彬, 等. 基于光栅多缝衍射测量微透镜焦距 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 52301.  
ZHU X CH, CAO X D, WU SH B, *et al.*. Focal length measurement of microlens by rotation method based on grating multiply diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 52301. (in Chinese)
- [18] 朱咸昌, 伍凡, 曹学东, 等. 光栅衍射法测量微透镜阵列焦距时产生的光斑干扰分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112010.  
ZHU X CH, WU F, CAO X D, *et al.*. Analysis of focus dislocation induced by the microlens array measuring based on grating diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112010. (in Chinese)
- [19] 沙定国. 光学测试技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.  
SHANG D G. *Optics Testing Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)

#### 作者简介:



朱咸昌(1987—),男,安徽安庆人,博士研究生,主要从事测试计量技术与仪器方面的研究。E-mail: zhuxianchang@126.com



吴时彬(1963—),男,四川成都人,研究员,硕士生导师,主要从事光学精密检测与系统检测技术方面的研究。E-mail: zkb@ioe.ac.cn

#### 导师简介:



曹学东(1970—),男,四川井研人,研究员级高工,硕士生导师,主要从事几何量测试技术的研究。E-mail: cxd@ioe.ac.cn



伍凡(1957—),男,四川广安人,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造与测试技术方面的研究。E-mail: wufan@ioe.ac.cn