

## 光学学报

## 基于远场光分布测量微透镜面形误差峰谷值的方法

唐乐<sup>1,2,4</sup>, 夏良平<sup>1,4\*</sup>, 张满<sup>1</sup>, 张为国<sup>3</sup>, 孙昊<sup>2\*\*</sup>, 王春艳<sup>2</sup>, 党随虎<sup>1</sup>, 杜春雷<sup>1,4</sup><sup>1</sup>长江师范学院微纳光电器件与智能感知系统重点实验室, 重庆 408100;<sup>2</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>3</sup>中国科学院重庆绿色智能技术研究院微纳制造与系统集成研究中心, 重庆 400714;<sup>4</sup>珠海迈时光电科技有限公司, 广东 珠海 519060

**摘要** 针对传统微透镜面形测试光路复杂和效率不高的问题,提出了一种基于微透镜远场光斑高效提取环带状面形误差峰谷(PV)值的方法。基于几何光学原理,计算了不同环带误差形成的光斑的分界线位置;建立了环带误差的三维模型,通过仿真不同误差模型下的远场光斑,获得了分界线内外光强比值和环带误差值的对应关系;最后利用微纳加工技术制备出不同环带误差的微透镜阵列,搭建测试光路,通过测试获得了不同环带误差下的光斑能量分布,通过模型计算获得的微透镜环带状面形误差PV值与干涉仪测试结果一致。

**关键词** 光学器件; 微透镜; 远场光斑; 环带状面形误差; 光斑能量比

**中图分类号** O439 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231883

## 1 引言

在光学领域中,光学系统和光学芯片的小型化、集成化的发展是一种必然趋势<sup>[1]</sup>,其核心微光学元件尺寸也从毫米、微米级发展为纳米级,微透镜在聚焦、匀化和整形<sup>[2-3]</sup>等方面有着广泛应用。随着精密模压技术、纳米压印技术和光刻技术<sup>[3-5]</sup>等加工技术的快速发展,微透镜的加工技术日趋成熟,在微光学系统成像<sup>[6]</sup>、照明<sup>[7]</sup>和光通信领域<sup>[8]</sup>发挥着不可替代的作用。

微透镜的光学性能由面形精度决定,面形误差的检测技术至关重要。在加工制备过程中,由于光刻胶的非线性效应的存在,微透镜表面经常会出现一圈凸起或凹陷的环带误差,这种环带状面形误差的存在严重影响了微透镜的光学性能,因此迫切需要一种快速获取这种环带面形误差的方法。传统微透镜的面形检测方法通常有轮廓仪法<sup>[9-10]</sup>、哈特曼波前检测法<sup>[11]</sup>和干涉测量法<sup>[10]</sup>。轮廓仪法是由探针获取微透镜表面的一维线条数据,需要通过“点云”数据的拼接拟合得到全面形信息,这种方法获取整体面形特征的速度较慢,效率低下。哈特曼波前检测法的动态测量范围较大,测量相对简单,但是测量精度取决于微透镜阵列的光学质量和对应的波前重构算法,这种方法的前置透镜阵列结构精度的提升和

算法的优化难度较大。干涉测量法具有更高的测试精度,但是其整体光路系统的搭建与标定更为复杂,且测试效率有待提升。

基于微透镜面形测试方法的发展现状,本文提出了一种利用微透镜远场光斑快速获取环带状面形误差峰谷(PV)值<sup>[12]</sup>的方法。这种方法能够快速获取环带状面形误差的PV值和误差的方向信息,能够为微透镜加工过程中误差值的补偿、加工精度的提升以及成品的筛选提供帮助。相比于传统的测试方法,本文方法的测试光路更简洁,操作更简单,测试效率得到显著提升,能大规模应用于微透镜制备过程中的测试环节,具有广泛的应用前景。

## 2 检测原理

面形误差一般指光学表面存在的加工缺陷引起的实际表面与理想表面存在的一定程度的偏差。在微透镜的制备过程中,光刻胶本身存在的非线性效应,会导致透镜表面出现一圈凸起或凹陷的环带面形偏差。透镜表面形貌的起伏会改变其波前,从而影响光强分布。透镜实际面形 $h(x,y)$ 是由误差面形 $h_{\text{Error}}(x,y)$ 和理想面形 $h_{\text{Ideal}}(x,y)$ 叠加而成<sup>[13]</sup>,可表示为

$$h(x,y) = h_{\text{Ideal}}(x,y) + h_{\text{Error}}(x,y). \quad (1)$$

因此,微透镜实际面形引起的透镜的相位变化可

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-01-22; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 重庆市科技局项目(CSTB2022NSCQ-LZX0056, 2022TIAD-KPX0159)、重庆市教委项目(KJZD-K202101403, KJXC2020049, HZ2021014, CXQT20027, KJZD-K202201401)、吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20220755KJ)

通信作者: \*xialp@yznu.edu.cn; \*\*sunh@cust.edu.cn

表示为

$$\varphi(x, y) = k[d + (n - 1)h(x, y)], \quad (2)$$

式中:  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为光束的工作波长;  $n$  为透镜材料的折射率;  $d$  为透镜的厚度。根据透镜的相位变化, 可得微透镜引起的光场变换函数为

$$\tilde{i}(x, y) = \exp[i\varphi(x, y)] = \exp(ikd) \exp[ik(n - 1)h(x, y)]. \quad (3)$$

在微透镜表面面形误差的影响下, 准直光场穿过微透镜后, 远场能量分布随之发生变化, 可表示为

$$I(f_x, f_y) = |A\mathcal{F}\{\tilde{i}(x, y)\}|^2, \quad (4)$$

式中:  $A$  为入射光振幅;  $\mathcal{F}$  为傅里叶变换的算符。

微透镜面形误差  $h_{\text{Error}}(x, y)$  的存在会影响其远场

光斑能量分布, 相应地, 通过研究远场光斑能量的分布可反推特定形貌的面形误差。微透镜在加工过程中容易产生如图 1(a)、(b) 所示的环带状面形误差, 该误差面形呈现出一圈凸起或凹陷的环带。沿箭头方向可以获取其截面轮廓, 如图 1(c) 所示,  $D$  代表透镜的直径,  $d$  代表环带误差的直径。从环带误差的截面图中能够清楚地看到“峰-谷-峰”、“谷-峰-谷”两种误差形状的存在。本文将截面环带出现双波峰的环带误差定义为正环误差, 即  $H$  的取值为正, 将双波谷的环带误差定义为负环误差, 即  $H$  的取值为负,  $H$  的数值大小等于面形误差  $h_{\text{Error}}(x, y)$  的 PV 值:

$$P_V = |H|. \quad (5)$$

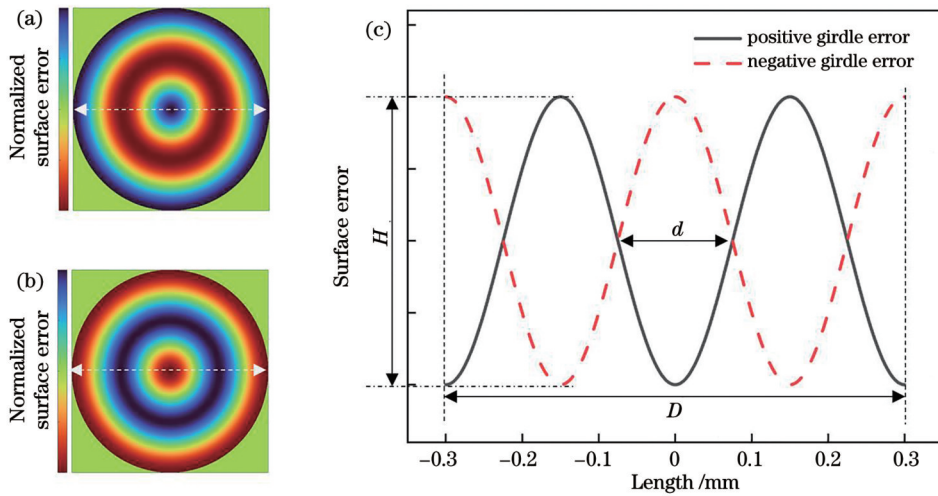


图 1 环带面形误差及截面轮廓图。(a) 负环波前像差图; (b) 正环波前像差图; (c) 环带误差截面轮廓图

Fig. 1 Girdle error and section profile. (a) Negative girdle wavefront aberration map; (b) positive girdle wavefront aberration map; (c) girdle error cross section profile

根据几何光学原理<sup>[14]</sup>, 光线经过微透镜传播到远场探测器上的几何光路如图 2 所示, 其中入射平行光束的束腰半径为  $w_0$ , 光束的出射角度为  $\alpha$ , 微透镜的焦距为  $f$ , 探测器与焦点的距离为  $L$ , 接收面上的光斑半径为  $w_1$ , 在不考虑衍射的理想情况下, 光线传播满足

$$\tan \alpha = \frac{w_0}{f} = \frac{w_1}{L}. \quad (6)$$

通过环带误差在透镜通光口径的占比, 可以计算出正负环面形误差各自影响光斑能量分布的区域, 并

将其进行划分, 划分的分界线记为  $R_1$ , 计算公式如下:

$$R_1 = \frac{d}{D} w_1 = \frac{dw_0 L}{Df}. \quad (7)$$

在准直光束入射下, 正环误差和负环误差微透镜会形成不同的波前, 从而影响探测面光斑的能量分布。基于图 3 所示的几何光线追迹结果, 可以看到分界线  $R_1$  以内: 存在正环误差的微透镜, 其远场光斑能量高度集中在中心位置, 中心光强远大于其他区域; 存在负环误差的微透镜, 中心位置的能量大幅削弱, 而分界线  $R_1$  以外区域形成了一圈能量较强的环状亮条纹。

以上分析表明, 微透镜环带状面形误差在远场会产生特定形状的光强分布, 且正环误差和负环误差对应的光斑分别集中在分界线  $R_1$  以内和以外。基于这一现象, 本文提出根据分界线  $R_1$  来划定区域, 通过分界线内外区域总能量的比值确定环带误差  $H$  的大小和方向的方法, 分界线  $R_1$  以内区域记为  $S_1$ , 以外区域记为  $S_2$ , 如图 3 所示,  $S_1$  和  $S_2$  区域能量强度的比值  $E_{S_1/S_2}$  可表示为

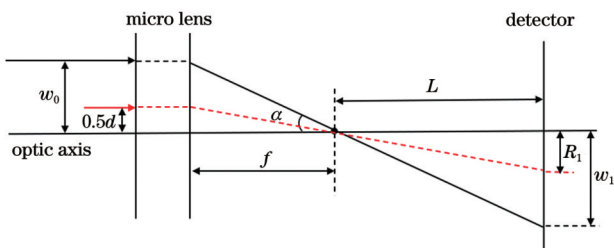


图 2 光线几何传播光路图

Fig. 2 Optical path figure of geometric propagation of light

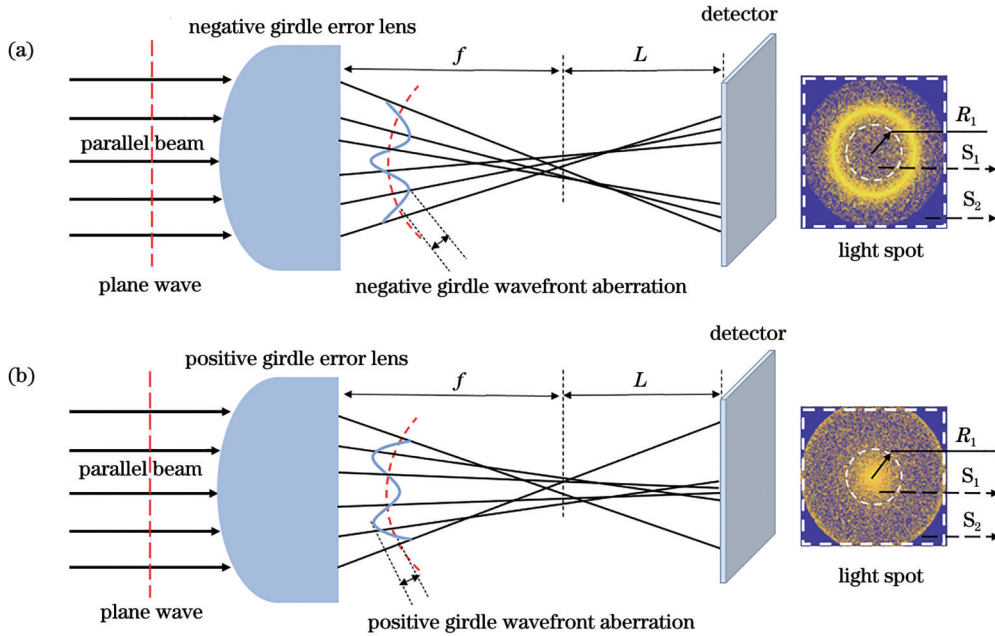


图 3 环带状面形误差的光线追迹示意图。(a)负环误差光线追迹图;(b)正环误差光线追迹图

Fig. 3 Girdle error ray tracing diagrams. (a) Negative girdle error ray tracing; (b) positive girdle error ray tracing

$$E_{S_1/S_2} = \frac{\sum_{\sqrt{x^2+y^2} \leq R_1} P(x,y)}{\sum P(x,y)}, \quad (8)$$

式中:  $P(x,y)$  代表探测面每一个像元点对应的光强;  $(x,y)$  为以光斑中心为原点的像元点的坐标。

### 3 模拟仿真

为了进一步验证利用微透镜远场光斑来分析表面环带误差的可行性, 本文对环带误差透镜的模型进行

了仿真分析。根据图 1 中的误差结构, 利用三维软件构建了环带误差对应  $H$  为  $-2 \mu\text{m}$ 、 $-1.5 \mu\text{m}$ 、 $-1 \mu\text{m}$ 、 $500 \text{ nm}$ 、 $200 \text{ nm}$ 、 $100 \text{ nm}$ 、 $20 \text{ nm}$ 、 $0 \text{ nm}$ 、 $20 \text{ nm}$ 、 $100 \text{ nm}$ 、 $200 \text{ nm}$ 、 $500 \text{ nm}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$  的 15 组存在环带波前像差的透镜结构模型。将这些不同误差的透镜代入光学仿真软件中进行计算, 仿真光路与图 2、3 一致, 其中光源为  $632.8 \text{ nm}$  波段的准直光源, 探测面与透镜的焦点距离  $L$  为  $70.535 \text{ mm}$ , 微透镜的相关参数如表 1 所示。

表 1 微透镜光学参数表

Table 1 Table of microlens optical parameters

Material	Clear aperture /mm	Radius /mm	Conic	Focal Length /mm
D263teco	0.3	4.5	-0.5771	8.464

通过仿真计算在探测器上得到了远场的光斑强度分布, 部分能量分布如图 4 所示。从图中可以看到: 环带误差  $H$  值越小, 光斑内部形成的环状亮条纹越清

晰, 环带能量强度在光斑整体强度的占比越大; 环带误差  $H$  值越大, 光斑中心区域能量越强, 并且在整体光强中的占比也随之增大。

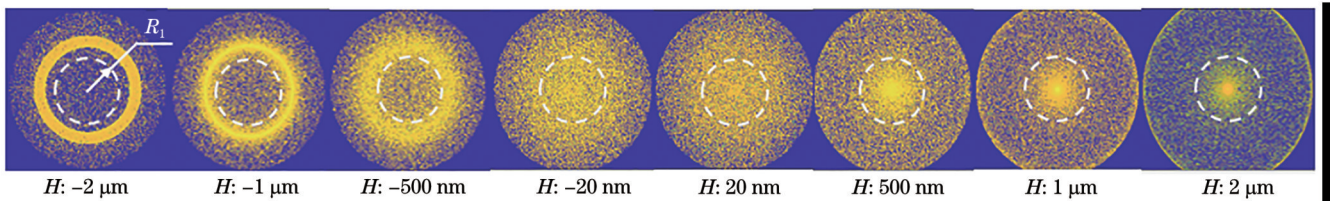


图 4 不同  $H$  下的探测面光强分布图

Fig. 4 Distributions of light intensity of detection surface under different  $H$

对于上述微透镜参数, 由式 (7) 计算出了  $R_1$  的值为  $0.625 \text{ mm}$ , 在仿真结果中对  $R_1$  圆形区域进行了框选, 如图 4 所示, 可以明显看到圆形分界线能够很好地

将两种特征区分开来。根据分界线  $R_1$  框选出的  $S_1$  和  $S_2$  区域, 利用式 (8) 计算出  $S_1$  区域光强总和与探测器上光斑整体面积  $S_2$  区域光强总和的比值, 结果如表 2 所



表 2 基于几何追迹仿真结果计算  $S_1$  区域光强和  $S_2$  区域光强的占比

Table 2 Ratio of light intensity in  $S_1$  region and  $S_2$  region calculated based on geometric tracking simulation results

$E_{S_1/S_2}$	0.0219	0.0314	0.0484	0.0800	0.1097	0.1214	0.1320	0.1336
$H$	$-2 \mu\text{m}$	$-1.5 \mu\text{m}$	$-1 \mu\text{m}$	$-500 \text{ nm}$	$-200 \text{ nm}$	$-100 \text{ nm}$	$-20 \text{ nm}$	0
$E_{S_1/S_2}$	0.1352	0.1459	0.1590	0.1974	0.2526	0.2967	0.3335	
$H$	20 nm	100 nm	200 nm	500 nm	1 $\mu\text{m}$	1.5 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	

示,随着环带误差  $H$  值的增大,  $S_1$  区域能量的占比逐步增大。

### 4 实验验证

针对上述方法,开展了相应的实验验证。首先,根据图 1 中的误差结构,给出了环带误差  $H$  从  $-2 \mu\text{m}$  到  $2 \mu\text{m}$  的 9 组微透镜加工数据图,微透镜参数与表 1 一致。其次,利用激光直写技术加工出微透镜的光刻胶模板,并使用 PDMS (Polydimethyl siloxane) 压印的方式转印微透镜图案,最终加工出实验所需的微透镜结构。

在透镜的制备过程中,因为存在加工误差,加工精度受限,所获得的微透镜环带误差  $H$  值发生了一定程度的偏移。在白光干涉仪下采集了所有透镜的面形数据,最终获得的微透镜环带误差  $H$  分别为  $-1.91 \mu\text{m}$ 、 $-1.2 \mu\text{m}$ 、 $-453 \text{ nm}$ 、 $-350 \text{ nm}$ 、 $-60 \text{ nm}$ 、 $53 \text{ nm}$ 、 $560 \text{ nm}$ 、 $1.08 \mu\text{m}$ 、 $1.63 \mu\text{m}$ 。干涉仪拟合出的面形误差图片及截面轮廓形状部分展示如图 5 所示,其呈现的环带误差特征与预设的基本一致,其中图 5(a)~(e) 对应的  $H$  值分别为  $-1.91 \mu\text{m}$ 、 $-453 \text{ nm}$ 、 $53 \text{ nm}$ 、 $560 \text{ nm}$ 、 $1.63 \mu\text{m}$ 。

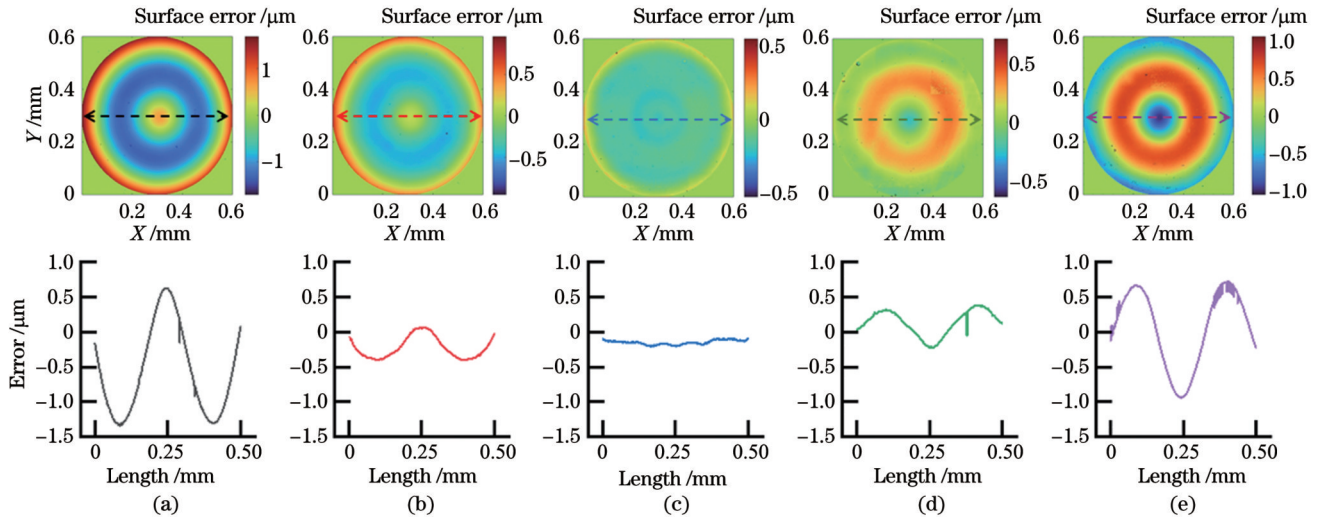


图 5 干涉仪实测面形误差及截面轮廓图。(a)  $H = -1.91 \mu\text{m}$ ; (b)  $H = -453 \text{ nm}$ ; (c)  $H = 53 \text{ nm}$ ; (d)  $H = 560 \text{ nm}$ ; (e)  $H = 1.63 \mu\text{m}$   
 Fig. 5 Interferometer measured surface error and section profiles. (a)  $H = -1.91 \mu\text{m}$ ; (b)  $H = -453 \text{ nm}$ ; (c)  $H = 53 \text{ nm}$ ; (d)  $H = 560 \text{ nm}$ ; (e)  $H = 1.63 \mu\text{m}$

得到待测微透镜以后,搭建了与仿真光路一致的实验光路,其中探测相机与透镜后焦点的距离  $L$  为  $70.535 \text{ mm}$ ,光源为  $632.8 \text{ nm}$  波段的氦氖激光,探测器为有效像素为  $3072 \times 2048$ 、像元尺寸为  $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$  的 INOVANCE CMOS 相机。因为激光功率较高,在光路中加入了透过率为 5% 和 10% 的衰减片,最终在

探测面上得到的光强分布如图 6 所示,正环误差和负环误差的微透镜呈现完全不同的光斑特征,随着  $H$  值的不断增大,光斑能量从由外圈环带亮条纹集中向中心区域集中变化。基于实验测试结果和式(8),分别计算了以  $R_1 = 0.625 \text{ mm}$  为半径的  $S_1$  区域内的总能量强度和整个探测面  $S_2$  区域的总能量强度,并将  $S_1$  和  $S_2$  区

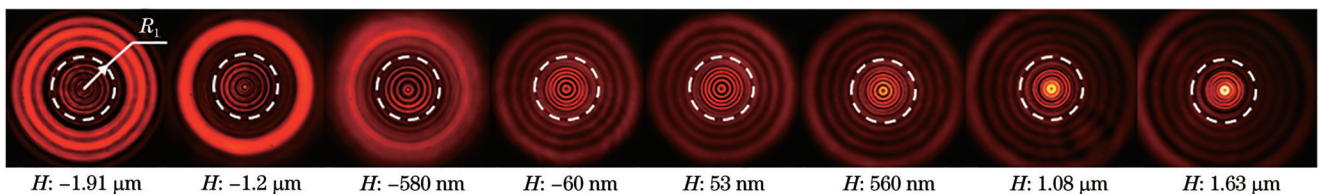


图 6 不同  $H$  下的实验光斑能量强度分布图

Fig. 6 Energy intensity distributions of experimental light spot under different  $H$

域总能量强度的比值记为  $E_{sv1/sv2}$ , 数据见表 3。在实测过程中, 由于微透镜口径较小, 在激光照射下产生了衍

射条纹, 但光斑呈现的整体特征与仿真几何追迹结果的趋势基本一致。

表 3 基于实验结果计算  $S_1$  区域光强和  $S_2$  区域光强的占比

Table 3 Light intensity ratio of  $S_1$  region and  $S_2$  region calculated based on experimental results

$H$	$-1.91 \mu\text{m}$	$-1.2 \mu\text{m}$	$-580 \text{ nm}$	$-60 \text{ nm}$	$53 \text{ nm}$	$560 \text{ nm}$	$1.08 \mu\text{m}$	$1.63 \mu\text{m}$
$E_{sv1/sv2}$	0.0662	0.0694	0.0752	0.0861	0.0963	0.1003	0.1039	0.1045

## 5 结果讨论与分析

如图 6 所示, 在微透镜的实际测试过程中, 有限的口径会引起一定程度的衍射效应<sup>[15-16]</sup>, 形成的衍射条纹会对光斑的光强分布产生影响, 因此需要对几何仿真结果进行修正补偿。通过对表 2 中的几何仿真结果和表 3 的实测结果的分析, 发现两者存在显著的线性相关性, 进行拟合计算, 并对仿真结果  $E_{sv1/sv2}$  进行修正补偿:

$$E_{sv1/sv2} = \frac{\sum_{\sqrt{x^2+y^2} \leq R_1} P'(x,y)}{\sum P(x,y)} = A \frac{\sum_{\sqrt{x^2+y^2} \leq R_1} P(x,y)}{\sum P(x,y)} + C, \quad (9)$$

式中:  $P'(x,y)$  为考虑衍射效应下探测面每一个像元点对应的光强;  $A$  为线性系数,  $C$  为补偿值, 在本文中  $A$  取 0.343,  $C$  取 0.059。

将仿真结果和实验测试结果进行整理, 结果展示如图 7 所示, 随着环带误差峰谷值  $H$  的不断增大,  $R_1$  范围内光强和总光强的比值  $E_{sv1/sv2}$  逐渐增大, 且在不同  $H$  值下的仿真结果和实测结果基本一致。因此, 在实际应用过程中, 根据探测器在远场获得的光场, 通过计算分界线内外的能量比值, 就能快速获取对应的环带面形误差  $H$ , 并根据  $H$  的正负判断微透镜环带面形误差的方向, 这为微透镜表面误差值的补偿和精度的进一步提升提供了一种快速评价手段。

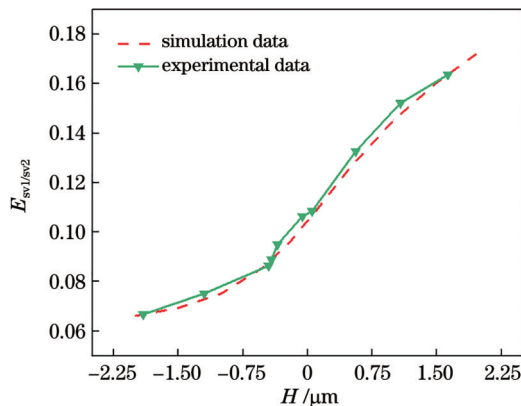


图 7 实验和补偿后的仿真值  $E_{sv1/sv2}$  随环带误差  $H$  的变化

Fig. 7 Variation of simulation value  $E_{sv1/sv2}$  with girdle error  $H$  after experiment and compensation

## 6 结 论

本文研究了微透镜环带状面形误差 PV 值和远场光斑之间的关系, 给出了利用远场光斑快速获取环带误差的原理, 建立了微透镜环带状误差的结构模型, 仿真了不同误差模型下微透镜光斑的能量分布, 得到了特定区域之间光强比值和环带误差值的关系, 最终利用微纳加工技术制备出不同环带误差结构的微透镜模型。搭建了与仿真一致的测试光路, 测试证明了通过分析微透镜远场光斑来获取环带状面形误差的可行性, 这一方法为微透镜加工过程中误差值的补偿、加工精度的提升以及成品的筛选提供指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Yan J B, Fang L, Sun Z H, et al. Complete active-passive photonic integration based on GaN-on-silicon platform[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(4): 046003.
- [2] Yuan W, Xu C, Xue L, et al. Integrated double-sided random microlens array used for laser beam homogenization[J]. *Micromachines*, 2021, 12(6): 673.
- [3] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2100001.
- [4] Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. Development of microlens arrays: from fabrication to photonic applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2100001.
- [5] 王蕾. 微透镜阵列的模压仿真与制造技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [6] Wang L. Studies on molding simulation and manufacturing technology of microlens array molding[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [7] Modaresialam M, Chehadi Z, Bottein T, et al. Nanoimprint lithography processing of inorganic-based materials[J]. *Chemistry of Materials*, 2021, 33(14): 5464-5482.
- [8] Zhang T Y, Yu H B, Shi J L, et al. Correlative AFM and scanning microlens microscopy for time-efficient multiscale imaging[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(12): 2103902.
- [9] 刘佳红, 张方, 黄惠杰. 步进扫描投影光刻机照明系统技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922011.
- [10] Liu J H, Zhang F, Huang H J. Research progress on illumination system technology of step-and-scan projection lithography tools[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922011.
- [11] Lee J, Jeon K, Kim G, et al. Fabrication of cylindrical microlens array using rotatable multi-arrayed needle coating module for light out-coupling of OLEDs[J]. *Organic Electronics*, 2022, 100: 106387.
- [12] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0112001.
- [13] Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0112001.
- [14] 郝群, 刘一鸣, 胡摇, 等. 光学非球面面形误差和参数误差干

- 涉测量[J]. 光学学报, 2023, 43(15): 1522003.
- Hao Q, Liu Y M, Hu Y, et al. Interferometric measurement of optical aspheric surface form error and parameter error[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 1522003.
- [11] Lan B, Liu C, Tang A, et al. Distorted wavefront detection of orbital angular momentum beams based on a Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Optics Express, 2022, 30(17): 30623-30629.
- [12] 张梦瑶, 田爱玲, 王大森, 等. 基于逆向优化策略的面形绝对检测平移量研究[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1804003.
- Zhang M Y, Tian A L, Wang D S, et al. Translation of surface shape absolute testing based on reverse optimization strategy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1804003.
- [13] 孙昊, 唐乐, 王春艳, 等. 微柱镜面周期性纹理结构衍射杂散光研究[J]. 中国激光, 2024, 51(5): 0513001.
- Sun H, Tang L, Wang C Y, et al. Diffractive stray light of periodic texture of micro-cylindrical lens[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(5): 0513001.
- [14] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [15] Luan Y S, Li D H, Lu L, et al. Optimal design of microlens aperture size for focused plenoptic camera[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(20): 1339-1342.
- [16] Zhu D Z, Xu L, Ding C L, et al. Direct laser writing breaking diffraction barrier based on two-focus parallel peripheral-photoinhibition lithography[J]. Advanced Photonics, 2022, 4(6): 066002.

## Method of Measuring Surface Error Peak to Valley of Micro Lens Based on Far-Field Light Distribution

Tang Le<sup>1,2,4</sup>, Xia Liangping<sup>1,4\*</sup>, Zhang Man<sup>1</sup>, Zhang Weiguo<sup>3</sup>, Sun Hao<sup>2\*\*</sup>, Wang Chunyan<sup>2</sup>,  
Dang Suihu<sup>1</sup>, Du Chunlei<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Micro Nano Optoelectronic Devices and Intelligent Perception Systems, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China;

<sup>2</sup>School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>3</sup>Research Center for Micro-Nano Manufacturing and System Integration, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;

<sup>4</sup>Zhuhai Multiscale Optoelectronics Technology Co., Ltd, Zhuhai 519060, Guangdong, China

### Abstract

**Objective** In the field of optics, the miniaturization and integration of optical systems and optical chips are inevitable trends. Micro lenses, as core devices, are widely used in optical imaging, homogenizing lighting, and optical communication. The accuracy of the surface shape determines the optical properties of micro lenses, making the detection of surface shape errors crucial. During fabrication, the nonlinear effect of photoresist often leads to the appearance of convex or concave annular errors on the micro lens surface. These annular errors significantly impact the optical performance of micro lenses, necessitating the development of a method to quickly detect them. Compared with the traditional profiler, Hartmann wavefront detection, and interferometry methods, this method ensures a simpler test light path, easier operation, and improved test efficiency.

**Methods** The study focused on the impact of surface shape errors on the distribution of light fields, based on the structure model of the banded error. The position of the boundary ( $R_1$ ) of the light spot formed by different banded errors was calculated following the principles of geometrical optics. Additionally, a method was proposed to determine the surface shape error of the band by analyzing the ratio of light intensity inside and outside the boundary. Through simulations of far-field light spots under different error models, the relationship between the ratio of light intensity inside and outside the boundary and the error value of the band was established. To validate the findings, micro lens arrays with various banded errors were fabricated using micro-nano machining technology. A test light path was then constructed to measure the spot energy distribution under different banded errors. The measured results were basically consistent with the simulated values.

**Results and Discussions** Based on the 3D model structure of the girdle error, the peak to valley (PV) value of the girdle surface error of the micro lens obtained through optical software simulation and experimental testing, is found to be consistent with the interferometer test results. This confirms the validity of the theory of the girdle error, which involves dividing the region by the boundary line ( $R_1$ ) and determining the girdle error using the light intensity ratio inside and outside the region.

**Conclusions** We examine the relationship between the PV value of the girdle surface error of the micro lens and the far-field spot. We present the principle of quickly determining the girdle error using the far-field spot and establish a structure model for the girdle error of the micro lens. The energy distribution of the micro lens spot is simulated under different error models, and the relationship between the light intensity ratio in specific regions and the girdle error value is determined. Furthermore, micro lens models with different banded error structures are fabricated using micro-nano machining technology. A test light path consistent with the simulation is constructed, demonstrating the feasibility of analyzing the far-field spot of the micro lens to obtain the girdle surface error. This method can guide the compensation of error values in the micro lens machining process, improve machining accuracy, and facilitate the screening of finished products.

**Key words** optical devices; micro lens; far-field spots; girdle surface error; ratio of spot energy