

基于高阶抑制达曼光栅的微透镜阵列焦距的快速测量

郑奉禄^{1,2}, 余俊杰^{1,3*}, 朱镕威^{1,3}, 马国庆^{1,3}, 张军勇^{3,4**}¹中国科学院上海光学精密机械研究所光芯片集成研发中心, 上海 201800;²上海科技大学, 上海 201210;³中国科学院大学, 北京 100049;⁴中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201899

摘要 提出了一种用高阶抑制二维达曼光栅作为分光元件替代普通衍射光栅实现微透镜阵列焦距快速测量的方法。高阶抑制二维达曼光栅具有优良的分光效果,且高阶衍射级次能够得到有效抑制,通过信噪比的提高降低焦距测量误差。设计并制备了一分五的高阶抑制二维达曼光栅,分束后的光束经过微透镜,在其焦面附近形成高对比度聚焦光斑阵列。相比常规一维光栅,所提方法通过测量每个微透镜焦面内光斑两两之间的距离,得到多个焦距值,从而有效减少测量的随机误差。实验结果表明,该方案对微透镜阵列焦距的单次测量误差小于 3.5%,重复测量误差在 4.5% 之内。该方案对微透镜阵列的焦距分布快速评估具有实用价值。

关键词 测量; 高阶抑制达曼光栅; 微透镜阵列; 焦距测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230952

1 引言

自从微电子技术问世以来,人们在电子电路技术领域不断追求缩小尺度。电子元器件尺寸的微型化,相应地也推动了微电子机械系统的长足进步,出现了功能越来越完善的微装置结构。当微电子机械系统与光学领域结合时,便出现了“微光学”^[1]。微透镜阵列(MLA)是微光学阵列元件中一类重要的元器件^[2],阵列化的微透镜器件在众多领域有广泛应用,如波前传感^[3-4]、激光光束整形^[5-6]、光学成像^[7-9]、光互连与光计算^[10]、仿生技术^[11]以及现代照明^[12-13]等。小型化与集成化的趋势对微透镜阵列焦距的测量精度和测量效率提出了更高的要求。对于微透镜阵列焦距,传统的检测方法有干涉仪测量法、显微镜测量法、光强测量法等,这些方法均难以同时满足高精度和快速测量的要求。传统的转角法^[14]由于需要转动光管或者透镜,一般单次测量不能确定光斑的移动量,且容易受到测量装置的影响。基于光栅多缝衍射的转角法利用光栅多缝衍射原理^[15],通过计算相邻级次分开的距离确定焦距,提高了测量效率。然而,这种方案的单次测量仅能得到单个焦距值,依然需要通过多次测量来消除随机误差。此外,传统光栅能够实现较好的分光效果,但是其高阶衍射级次会引入额外的测量噪声,影响测量精

度。基于 Hartmann-Shack 波前检测原理的检测技术^[16]提高的测量效率有限,且目前的方法单次采集仅能得到单个焦距值,为了消除随机误差实际还是需要多次测量。

针对上述问题,本文提出一种利用高阶抑制的二维达曼光栅(HOSDG)代替传统光栅衍射的转角法焦距快速测量方案。首先设计一种高阶抑制的二维达曼光栅,实现多个等强度二维分布的衍射级次,其光强集中、均匀性好,且高阶衍射级次能够得到有效抑制。其次,通过选择不同的两焦点之间的间距值,可以由单次测量得到多个焦距值,从而单次采集即可有效降低测量随机误差。作为一个例子,本文选取一分五的高阶抑制二维达曼光栅,单次采集实现了等效于传统一维光栅十次测量的效果。因此,本项目方案一方面通过抑制高阶衍射级次有效提高了焦面阵列光斑的信噪比,具有较高的测量精度;另一方面可以实现单次采集等效多次测量效果,极大地降低了测量随机误差,提升了微透镜焦距测量的效率。

2 基本原理

2.1 达曼光栅测量微透镜阵列焦距的原理

传统转角法测量透镜焦距的方法由于机械转动装

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-08-06; 录用日期: 2023-09-05; 网络首发日期: 2023-09-15

基金项目: 上海市自然科学基金(20ZR1464700)、上海市超精密光学加工与检测专业技术服务平台、国家自然科学基金(62175245)

通信作者: *junjiey@siom.ac.cn; **zhangjy829@siom.ac.cn

置和测角装置的影响,满足不了微透镜焦距的精密测量。为此,朱咸昌等^[15,17]利用光栅的衍射原理进行了改进,利用光栅的分光特性单次测量即可得到横向焦斑距离,从而完成微透镜焦距的测量。然而在实际测量过程中,为了减小测量随机误差,这种基于经典衍射光栅的测量方法同样需要通过多次测量得到多个焦距以求其平均值作为焦距值。本文提出一种利用高阶抑制二维达曼光栅的微透镜焦距快速测量方法,其实验光路原理示意图如图 1 所示,图 1 中 h 为相邻两级次分

开的距离, f 为微透镜焦距, f_1 和 f_2 分别对应所用成像透镜组 L_1 和 L_2 的焦距。激光器射出的激光经过扩束准直系统后,通过光栅衍射分束,再经过被测微透镜阵列,在其焦面附近即可产生多个焦斑。该微透镜阵列在其焦面附近形成的焦斑阵列被一对共焦透镜组 L_1 和 L_2 成像在探测相机的探测面上。通过计算探测面上每个微透镜孔径对应的光斑阵列之间的横向距离 H ,即可通过简单的几何关系推算出对应微透镜的焦距。

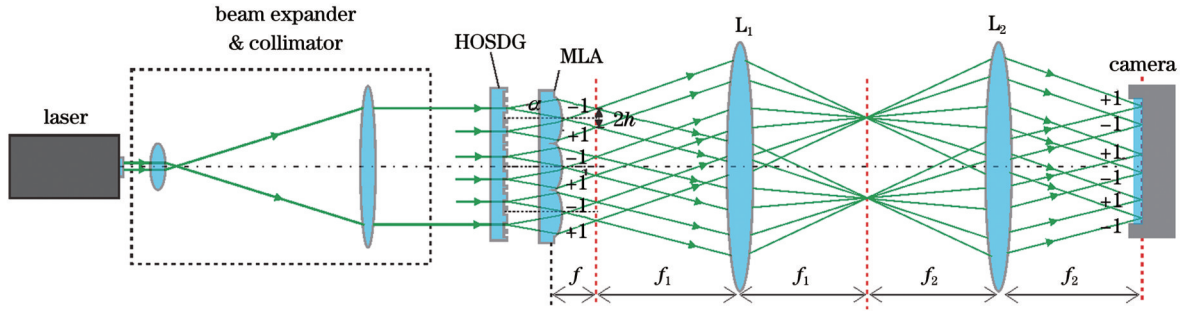


图 1 实验系统测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental measurement system

对于常规的衍射光栅,如图 2(a)所示,微透镜对应的焦距可以从 ± 1 级光斑之间的距离计算如下:

$$f = \frac{H}{2 \tan \alpha} \approx H \frac{d}{2\lambda} = \frac{hd}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: α 为光栅 ± 1 级对应的衍射角; h 是光栅 ± 1 级与 0 级分开的距离,由光栅方程 $d \sin \alpha = m\lambda$ 决定; d 为光栅周期; λ 为激光工作波长。

这里采用的是一种二维分束光栅,即高阶抑制的二维达曼光栅。此时,每个微透镜孔径对应的光斑阵列是一个二维分布,且设计级次之间的能量分布均等。

这里以一分五的二维达曼光栅为例,如图 2(b)所示,分束之后的 5 个焦点对应级次分别为 $(-1, -1)$ 、 $(-1, +1)$ 、 $(+1, -1)$ 、 $(+1, +1)$, 以及 $(0, 0)$ 。这 5 个焦点可以组合形成 10 组焦斑之间的距离 $H_1 \sim H_{10}$ 。对比常规光栅结果,图 2 中边长对应的距离为 H ,而对角线的距离为 $\sqrt{2}H$,对角线的一半即为 $\sqrt{2}H/2$ 。这 10 个距离对应大小分别为 $H_1(H_2) = \sqrt{2}H$, $H_3 \sim H_5 = H$, $H_7 \sim H_{10} = \sqrt{2}H/2$,最后由式(1)即可计算出对应焦距值。因此,通过单次测量即可计算出 10 个焦距值,可以有效减小随机测量误差。

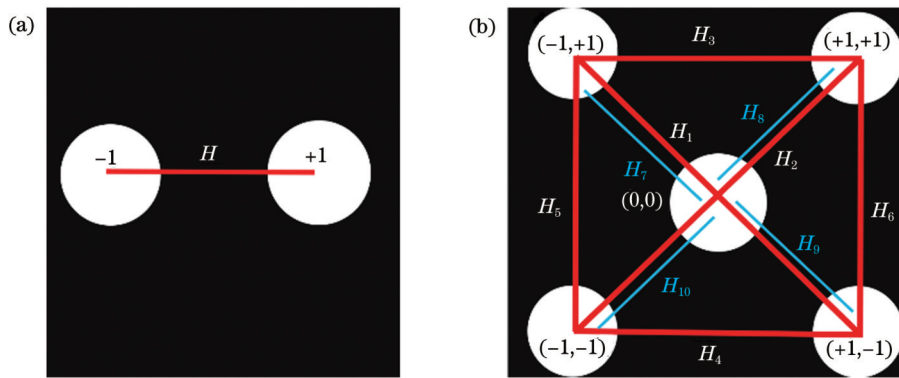


图 2 测量原理示意图。(a)普通光栅测量原理示意图;(b)5分束光栅测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement principle. (a) Schematic diagram of general grating measurement principle; (b) schematic diagram of five-beam splitting grating measurement principle

2.2 光栅周期与微透镜焦距的约束条件

微透镜阵列子单元数较多,所以在测量时可能会出现两种情况:1)光栅周期较大,同一微透镜单元内多个衍射光斑分开距离不够,造成光斑混叠;2)光栅周期太小,不同微透镜单元之间的衍射光斑串扰。故此,光

栅与微透镜参数之间必须满足一定的约束条件。第一种情况需要考虑的是瑞利判据^[18],即衍射光斑两级次之间的中心距离要大于一个艾里斑半径,但是考虑图像处理方便,取间隔至少一个艾里斑直径 $2.44f\lambda/D$, D 为微透镜口径, λ 为光波长。同一子透镜成像的最近

邻两光斑的距离满足式(1)^[15],因此对于第一种情况的约束条件是

$$2h = 2 \cdot \frac{f\lambda}{d} > 2.44f \frac{\lambda}{D}, \quad (2)$$

即最近邻两光斑的距离大于艾里斑直径。

对于第二种情况,需要满足的约束条件是

$$D - 2h = D - \frac{2f\lambda}{d} > 2.44f \frac{\lambda}{D}, \quad (3)$$

即相邻子透镜之间的衍射光斑距离大于艾里斑直径。

由此可以分别得到不同参数的约束条件为

$$\frac{2Df\lambda}{D^2 - 2.44f\lambda} < d < \frac{D}{1.22}, \quad (4)$$

$$D > \frac{\frac{2f\lambda}{d} + \sqrt{\left(\frac{2f\lambda}{d}\right)^2 + 9.76f\lambda}}{2}, \quad (5)$$

$$D > 1.22d, \quad (6)$$

$$f < \frac{dD^2}{2.44\lambda d + 2\lambda D}. \quad (7)$$

以上约束条件表示,在已知另外两个参数的情况下,代入公式,如果待确定参数超出结果范围,那么会出现光斑混叠或级次串扰的情况。这些约束条件的存在,说明了光栅法测量微透镜焦距的实际测量范围与微透镜口径及所采用光栅的周期等因素相关。

2.3 高阶抑制达曼光栅的设计与测试

相比于一维光栅,二维光栅能够在每个微透镜子孔径内产生多个等强度衍射光斑,因而可以实现单次测量得到多个焦距测量值,从而极大地减少焦距测量的随机误差。常规的二维达曼光栅是正交型二值相位达曼光栅,因具有设计简单、制作工艺成熟、无需套准(二台阶二值结构)等优点而被广泛使用^[19-20]。常规二维达曼光栅可以实现等强度衍射光斑阵列,然而其高

阶衍射级次较强,对测量结果会带来不可避免的噪声。本文提出一种高阶抑制的二维达曼光栅,通过加入复振幅调制实现对高阶衍射级次的抑制。这里选用一分五高阶抑制二维达曼光栅,其工作的级次分别为(0,0)、(+1,+1)、(+1,-1)、(-1,+1)、(-1,-1)。在理想状态下,一分四二维达曼光栅透过率函数可以表示为

$$T(x, y) = \cos [2\pi(x + y)/d] + \cos [2\pi(x - y)/d], \quad (8)$$

式中:(x, y)为光栅平面内坐标。

基于这种一分四达曼光栅,可以通过调节相位延迟来实现0级与其他4个级次的能量相等,从而实现一分五的效果。对于这种连续复振幅调制,实际制备工艺很难实现,因此是在制备工艺允许的条件下做出逼近该函数分布的光栅,即对式(8)中的振幅和相位做二值化。图3给出了这种高阶抑制达曼光栅的设计原理示意图,其二值化的过程是通过设定其振幅对应归一化振幅的绝对值小于 α' 为0,大于 α' 为1;设定其相位对应实部大于0为 $\beta\pi$,小于0为0; α' 和 β 均为大于0小于1的实数。通过模拟退火算法^[21],以5个需要的级次的总能量最大、均匀性最好,以及对应其他噪声级次最小为目标优化,得到振幅优化系数 $\alpha' = 0.4$,相位优化系数 $\beta = 0.6819$ 。图3(a)和(b)分别给出了这种高阶抑制达曼光栅归一化周期内的振幅及相位分布,图3(c)给出了这种光栅对应的二值化之后的复振幅分布。常规纯相位型达曼光栅的高阶衍射噪声为11.13%(定义为不必要的高阶级次最大值与需要的5个级次平均值的比值),通过上述优化之后得到的高阶抑制达曼光栅其高阶衍射噪声降低至5.3%。5个工作级次之间的不均匀度为0.41%,其定义为 $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$,其中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别代表5个级次中光强的最大值和最小值。

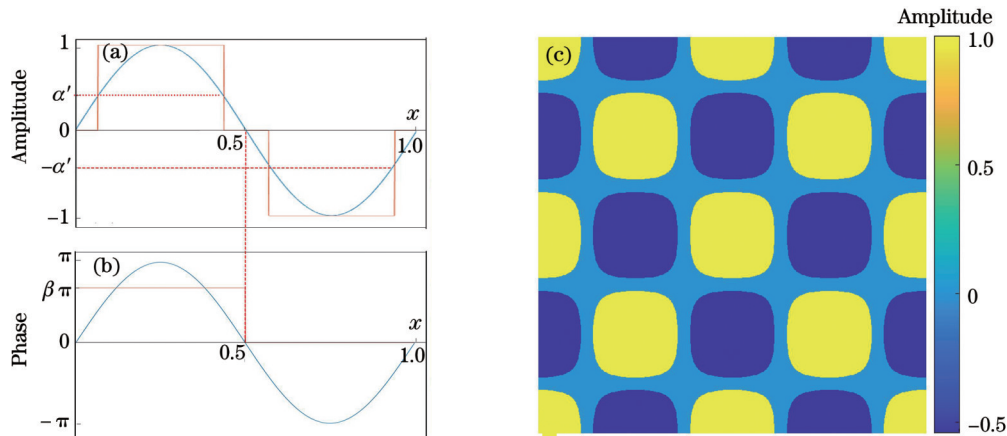


图3 高阶抑制达曼光栅设计基本原理。(a)振幅二值化原理示意图;(b)相位二值化原理示意图;(c)优化后的达曼光栅复振幅二维分布

Fig. 3 Fundamental principle of high-order-suppression Dammann grating design. (a) Schematic diagram of amplitude binarization principle; (b) schematic diagram of phase binarization principle; (c) complex amplitude distribution of optimized grating design

通过两次标准光刻套刻及等离子刻蚀,制备了该高阶抑制一分五达曼光栅以及常规相位型一分五达曼光栅。图 4 给出了这两种一分五达曼光栅远场衍射光斑的数值仿真结果和实验结果。图 4(a)和图 4(c)是常规相位型达曼光栅远场衍射光斑的数值仿真和实验结果,图 4(b)和图 4(d)是高阶抑制达曼光栅对应的仿真和实验结果。从图 4 可以明显看出,通过复振幅调制改进后的高阶衍射级次得到了有效抑制,这将有利于后期数据处理过程中提高每个光斑的质心定位精

度,从而降低实际微透镜阵列焦距的测量误差。实验中,优化前后的旁瓣的效率比实际测试值分别为 19.66% 和 9.88%;5 个工作级次之间的不均匀度实测值为 21.04%。由上述原理可知,这种水平的不均匀度对焦距测量误差无影响。此外,根据光栅方程 $d \sin \alpha = m\lambda$,通过测量 3.1 m 外不同级次光斑分开的角度,得到光栅周期的制作误差为 $0.024 \mu\text{m}$,由式(1)可以得到该误差对焦距的测量精度影响为 0.024%,因此由光栅周期误差导致的测量误差远小于实际测量误差。

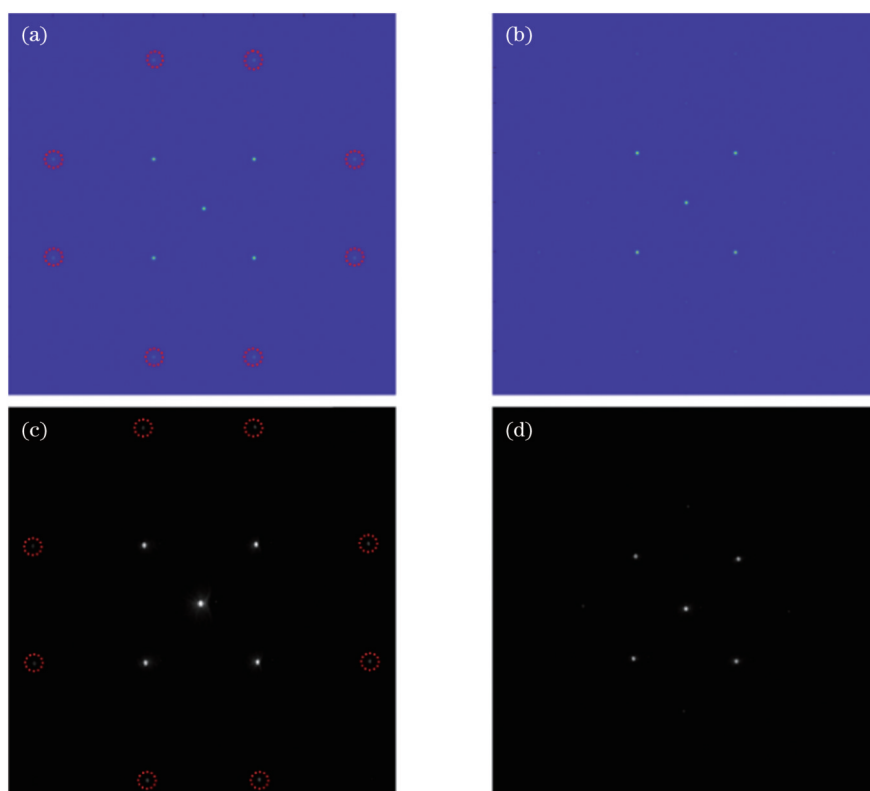


图 4 常规相位型达曼光栅与高阶抑制达曼光栅远场衍射光斑对比。(a)常规相位型达曼光栅仿真图;(b)高阶抑制达曼光栅仿真图;(c)常规相位型达曼光栅实验结果;(d)高阶抑制达曼光栅实验结果

Fig. 4 Image comparison before and after grating improvement. (a) Simulation diagram with conventional phase-type Dammann grating; (b) simulation diagram with HOSDG; (c) experimental diagram with conventional phase-type Dammann grating; (d) experimental diagram with HOSDG

3 实验结果与分析

3.1 实验条件与结果

在验证实验中,光源采用 532 nm 半导体泵浦固体激光器(MLL-U-532),两个透镜选用焦距分别为 $f_1=300 \text{ mm}$ 和 $f_2=200 \text{ mm}$ 的透镜,探测相机采用的是互补金属氧化物半导体(CMOS)相机(Edmund Optics, EO2323, $1920 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$, $4.8 \mu\text{m}$)。实验所用的测量对象是一个衍射型微透镜阵列(上海七栅光电,定制规格,对应的焦距设计值为 12 mm ,微透镜子口径为 $500 \mu\text{m}$,设计波长为 532 nm)。分束光栅采用自主设计加工的高阶抑制一分五二维达曼光栅(周期 d 为 $120 \mu\text{m}$)。实验中,利用高阶抑制二维光栅进行单次测量,其探测面采集结果如图 5(a)所示。从图 5(a)可

以看出,通过分束光栅得到了高信噪比的 5 焦点阵列,即每个微透镜对应 5 个焦点。由于相机探测面的限制,视场中单次采集到的是 11×7 共 77 个微透镜的对应光斑阵列的结果。由于所采用的微透镜阵列焦距较小,因此在实验中用 300 mm 和 200 mm 的双透镜成像系统,通过投影成像的方式将微透镜对应焦面投影成像在探测面上。因此,两透镜之间的距离及物距决定了图像的放大率。实验中利用相邻微透镜之间的间距 D 来实现放大倍率的标校。为了验证本方案的重复性与可靠性,实验中通过调节两个透镜之间的距离,实现不同放大倍率下同一批子透镜重复 15 次测量得到焦距值。对于每次测量结果,利用质心算法对图中每个光斑进行了光斑中心定位,然后利用不同光斑间距可以实现多次焦距测量,从而减小随机测量误

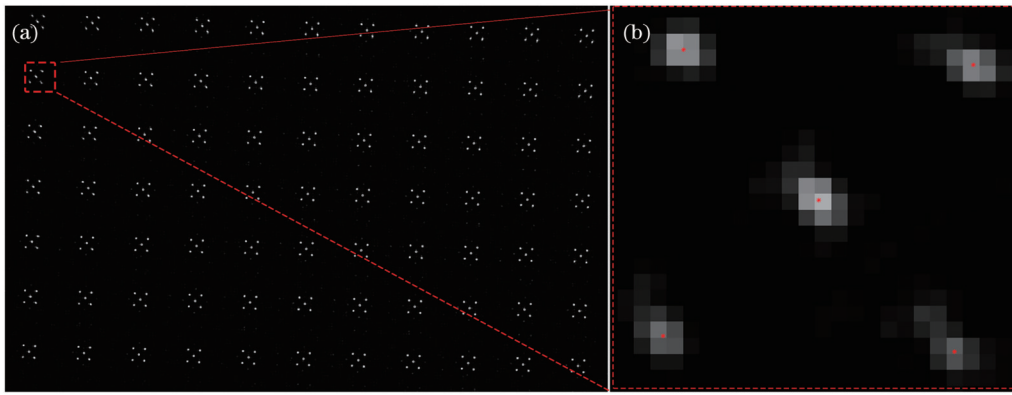


图 5 原始实验结果与质心定位。(a)实验结果图;(b)子透镜成像光斑质心定位

Fig. 5 Experimental results and centroid positioning. (a) Experimental image; (b) spot centroid positioning in single sublens image

差。图 5 给出了典型的相机探测到的焦面上的光斑阵列及单个微透镜孔径内的原始光斑分布。图 5(b)中,红色的标记点为算法定位的质心坐标。

3.2 实验数据处理

整个焦距计算的后期数据处理算法流程示意图如图 6 所示。首先,对原始光斑图像进行掩模操作,即以低阈值标准进行粗二值化,对二值化的光斑图像进行紧邻光斑的膨胀融合处理,并剔除无效信息光斑。所得二值化掩模如图 7(a)所示。其次,将掩模作用在实验图像上,将原始光斑阵列划分区域,用质心法计算出

每个光斑的质心,并结合聚类分析算法归类输出各个透镜对应的 5 个光斑质心坐标点矩阵,再对每个透镜的质心坐标按照顺时针排序,从而得到特定光斑坐标顺序的矩阵。最后,利用数据坐标矩阵求取 10 组光斑对应的 10 个焦距,并求平均值,即得到所测微透镜阵列每个子透镜的焦距值。图 7(b)和图 7(c)给出了该微透镜阵列的局部焦距测量结果,其中图 7(b)为对应的焦距平均值的空间分布,行列与图 7(a)中透镜位置对应,图 7(c)为单次测量的 10 个组合方式对应的焦距平均误差分布。

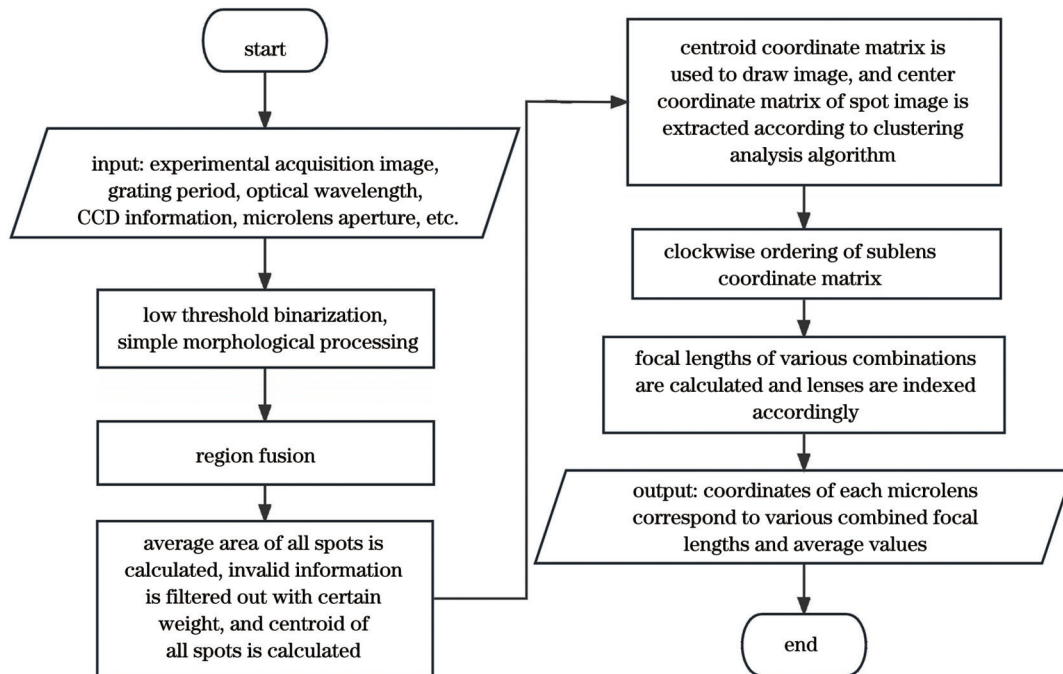


图 6 焦距计算后期数据处理算法流程图

Fig. 6 Flow chart for late-stage data processing of focal length calculation

二维达曼光栅的优势是可以利用单次采集的光斑阵列图像得到 10 个光斑组合,分别计算该微透镜的焦距,相当于单次采集即可实现 10 次测量,从而可以有效减少随机误差。图 7(c)是在放大率为 1.229 的情况下得到的实验结果。从图 7(c)可以明显看出,不同

方向测量的焦距的大小和误差明显不同,因此单一方向的测量值由于随机误差而不足以充分描述当前透镜焦距情况。通过计算所有数据得到的平均值较单个方向上的结果更加稳定可靠,随机误差得到有效降低。

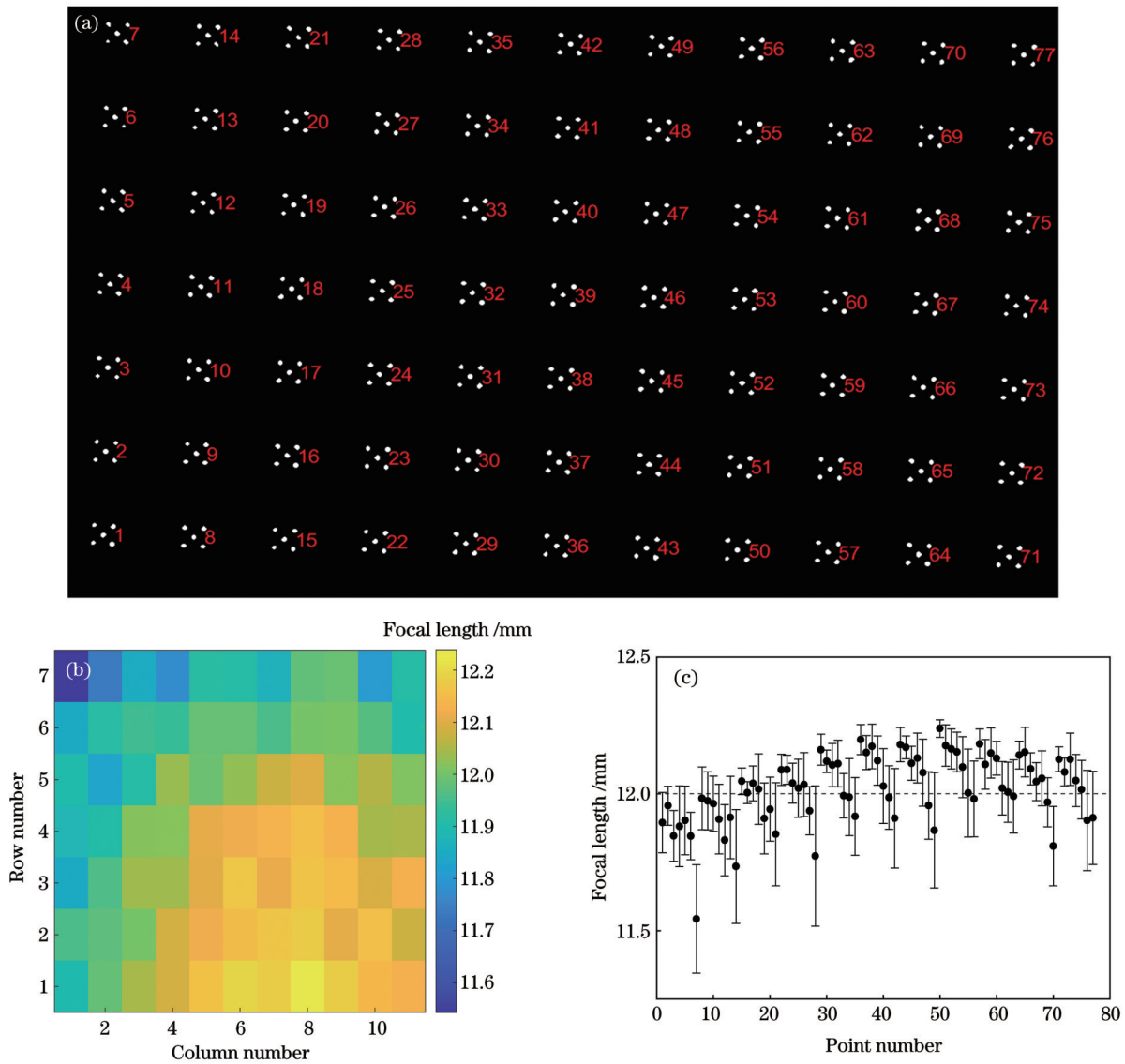


图7 实验数据分析图。(a)单次测量二值化图像及标序;(b)微透镜焦距平均值二维分布;(c)单次测量10种组合焦距均值误差分布
Fig.7 Experimental data analysis diagram. (a) Binary image and point numbering for single measurement; (b) two-dimensional distribution of average focal lengths of microlenses; (c) average value and error distribution of 10 focal lengths in single measurement

此外,对同一区域同一批子透镜在不同放大率下15次测量的焦距平均值与误差分布如图8所示,15次的放大率分别为:1.271,1.265,1.268,1.250,1.252,1.253,1.249,1.244,1.246,1.242,1.239,1.240,1.231,1.227,1.229。此外,通过显微镜配合标准分辨率板成像测量,微透镜的间距误差在 $2.5\ \mu\text{m}$ 之内,该放大率导致的透镜焦距精度误差为0.48%。图8所用透镜标序如图7(a)所示。从图8可以看出,本方案对阵列中单元数较多的微透镜单次测量误差为3.5%,15次重复测量误差均在4.5%之内,且在这种单元数较多的情况下,只有个别微透镜的测量误差超过3%。因此,本方案可以作为有效的定标依据,并应用于单元数较多的微透镜阵列焦距的快速测量。

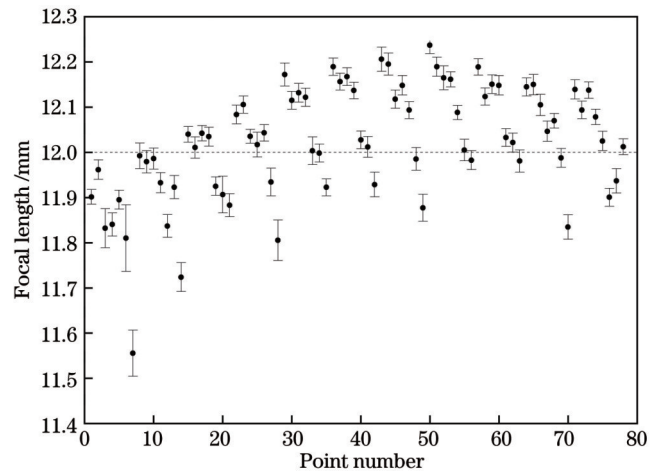


图8 15次测量焦距均值误差分布
Fig.8 Average value and error distribution of focal lengths in 15 measurements

4 结 论

本文提出了一种基于高阶抑制的二维达曼光栅测量微透镜阵列焦距的方案,将传统一维衍射型光栅替换为高阶抑制二维达曼光栅,可有效抑制高阶衍射能量,提高质心定位测量信噪比。所设计的二维达曼光栅使得每个微透镜孔径内产生多个聚焦光斑,利用多个光斑两两组合达到单次采集即可实现多次测量的效果,这可以极大地降低随机测量误差、提高测量效率。另外,在对于光栅口径和探测相机探测面足够大的情况下,可以通过单次采集实现大量微透镜阵列焦距的同时测量,并可以进行精准定位反映整体微透镜焦距的分布情况。在原理验证实验中,自行设计并加工了一种一分五高阶抑制二维达曼光栅,利用二维达曼光栅的分束特性,一次采集相当于进行了 10 次普通光栅的实验,有效降低了测量随机误差,使得单次测量误差为 3.5%,重复测量误差在 4.5% 以内。总之,本方案在大规模微透镜焦距测量方面提高了测量效率并降低了测量误差,因而具有重要的应用价值,并将对微透镜加工、检测以及应用起到推动作用。

参 考 文 献

- [1] 李恩琪. 微透镜阵列成像质量的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
Li E Q. Study on imaging quality of microlens array[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [2] Nishizawa K, Oikawa M. Micro-optics research activities in Japan [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1751: 54-56.
- [3] Oliveira O G, de Lima Monteiro D W, Costa R F O. Optimized microlens-array geometry for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 55: 155-161.
- [4] Martínez-Cuenca R, Durán V, Climent V, et al. Reconfigurable Shack-Hartmann sensor without moving elements[J]. Optics Letters, 2010, 35(9): 1338-1340.
- [5] Sales T R M. Structured microlens arrays for beam shaping[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5175: 109-120.
- [6] Cao A X, Pang H, Wang J Z, et al. Center off-axis tandem microlens arrays for beam homogenization[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 2400207.
- [7] Hain M, von Spiegel W, Schmiedchen M, et al. 3D integral imaging using diffractive Fresnel lens arrays[J]. Optics Express, 2005, 13(1): 315-326.
- [8] Wu J M, Guo Y D, Deng C, et al. An integrated imaging sensor for aberration-corrected 3D photography[J]. Nature, 2022, 612 (7938): 62-71.
- [9] 桂博瀚, 李常伟. 基于波面分割及多平面相位恢复的定量相位成像技术[J]. 光学学报, 2023, 43(14): 1411002.
Gui B H, Li C W. Quantitative phase imaging technology based on wavefront segmentation and multiphase retrieval[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 1411002.
- [10] Jahns J. Free-space optical digital computing and interconnection [M]//Wolf E. Progress in Optics, Vol. 38. Amsterdam: Elsevier, 1998: 419-513.
- [11] 李江, 高筱钧, 付作立, 等. 超快激光仿生复眼加工研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002704.
Li J, Gao X J, Fu Z L, et al. Research advancement on fabrication of artificial compound eye using ultrafast laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002704.
- [12] 聂娟, 杜佳林, 李凡星, 等. 基于微透镜阵列的大面积 LED 阵列光源匀化方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1525003.
Nie J, Du J L, Li F X, et al. Light source homogenization method for large-area LED array based on microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1525003.
- [13] 王彬. 微透镜阵列在 LED 光源中的应用研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
Wang B. Research on the application of microlens array in LED light source[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013.
- [14] DeBoo B J, Sasian J M. Novel method for precise focal length measurement[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4832: 114-121.
- [15] 朱咸昌, 曹学东, 吴时彬, 等. 基于光栅多缝衍射的转角法测量微透镜焦距[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0523001.
Zhu X C, Cao X D, Wu S B, et al. Focal length measurement of microlens by rotation method based on grating multislit diffraction [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0523001.
- [16] 朱咸昌, 伍凡, 曹学东, 等. 基于 Hartmann-Shack 波前检测原理的微透镜阵列焦距测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1122-1128.
Zhu X C, Wu F, Cao X D, et al. Focal length measurement of microlens-array based on wavefront testing principle of Hartmann-Shack sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1122-1128.
- [17] 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 C, 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.
- [18] 马科斯·波恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论[M]. 杨葭荪, 译. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. Yang J S, Transl. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [19] Dammann H, Klotz E. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1977, 24(4): 505-515.
- [20] Zhou C H, Liu L R. Numerical study of Dammann array illuminators[J]. Applied Optics, 1995, 34(26): 5961-5969.
- [21] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Jr, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.

Fast Measurement of Focal Length of Microlens Arrays Using High-Order-Suppression Dammann Gratings

Zheng Fenglu^{1,2}, Yu Junjie^{1,3*}, Zhu Rongwei^{1,3}, Ma Guoqing^{1,3}, Zhang Junyong^{3,4**}

¹Photonic Integrated Circuits Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Joint Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective Microlens array is one of the most important components in micro-optics, and it has been widely used in many fields. It is becoming more and more important to achieve higher measurement accuracy and faster measurement speed of the microlens array focal length. Traditional measurement methods such as interferometer measurement, microscope measurement, light intensity measurement, etc., are difficult to meet the requirements of high precision and rapid measurement simultaneously. Because the traditional scanning angle method needs to rotate the light tube or lenses, and the movement of the light spot cannot be determined in a single measurement, the measurement result is easy to be affected by the measuring device. Therefore, the scanning angle method based on multi-slit diffraction grating uses the multi-slit diffraction principle to determine the focal length by calculating the distance between adjacent orders, which improves the measurement efficiency. However, a single measurement can only obtain a single focal length value in this scheme, and it is still necessary to implement multiple measurements to eliminate various random errors. In addition, the non-negligible high diffraction orders of the traditional grating will introduce additional measurement noise, which will deteriorate the positioning accuracy of the centroids of those desired spots, resulting in the deterioration of the final accuracy. So, in order to eliminate random errors, multiple measurements have to be implemented in practice. To address the above problems, a fast focal length measurement scheme based on high-order-suppression Dammann gratings (HOSDGs) rather than traditional gratings is proposed in this paper.

Methods In this study, a specially designed HOSDG is used to measure the focal length of the microlens. After the beam passes through the HOSDG, the diffractive light transmits through the microlens, and finally the camera receives the focused spot of each sublens on its focal plane. The distribution of the focus spots of each sublens is related to the focal length and the diffraction angle of the grating. After data processing, multiple distances among several desired orders are obtained, and then several values of the focal length for each sublens are calculated. In order to suppress the influence of high-order diffraction, the complex amplitude modulation combined with simulated annealing algorithm is used to optimize HOSDGs. In the experiment, this grating is fabricated by multistep overlapped lithography and wet etching technologies.

Results and Discussions The simulation results show that the high order sidelobe ratio is reduced from 11.13% to 5.3% (Fig. 4), and the experiment results indicate that the sidelobe ratio is reduced from 19.66% to 9.88%, which suggests that the high-order diffraction is effectively suppressed by this specially designed HOSDG. Due to its multiple equal-intensity orders (Fig. 5), HOSDG makes it possible to obtain multiple values of focal length through a single measurement after late-stage data processing (Fig. 7). It is shown that the single measurement error of the focal length of 11×7 microlenses is 3.5%, and the errors of the 15 repeated measurements are all within 4.5%.

Conclusion In this paper, a two-dimensional Dammann grating based on high-order diffraction suppression is proposed to measure the focal length of microlens array, which can effectively suppress the high-order diffraction energy and improve the measurement signal-to-noise ratio. In the proof-of-principle experiment, the designed five-beam HOSDG generates multiple focused light spots within each microlens aperture. The combination of multiple light spots to achieve a single acquisition is equivalent to 10 times of ordinary grating experiments, which effectively reduces the measurement random error, making the single measurement error less than 3.5% and repeated measurement error less than 4.5%. Therefore, this scheme can improve the measurement efficiency and reduce the measurement error in the high-precision measurement of the focal length of large-scale microlens array. This work will promote the fabrication, measurement and application of various microlenses.

Key words measurement; high-order-suppression Dammann grating; microlens array; focal length measurement