

## 微反射镜阵列角位置检测中的光斑串扰抑制算法

王婷<sup>1,2</sup>, 胡敬佩<sup>1,2\*</sup>, 黄立华<sup>1,2</sup>, 曾爱军<sup>1,2</sup>, 黄惠杰<sup>1,2</sup>, Sergey Avakaw<sup>3</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049;<sup>3</sup>白俄罗斯共和国开放式股份公司“精密电子机械制造设计局-光学机械设备”, 白俄罗斯 明斯克 220033

**摘要** 针对微反射镜阵列(MMA)微反射镜集中度高、尺寸小,在实际检测过程中相邻镜面反射光容易出现串扰的问题,提出了一种用于微反射镜阵列角位置检测的光斑串扰抑制算法。对照射到阵列中待测微反射镜及邻域微反射镜上的光强进行标定,通过求解光强矩阵方程获得每个微反射镜的角位置信息。仿真结果显示,在检测光斑尺寸大于单个微反射镜尺寸的串扰情况下,该方法的检测精度可保持 10  $\mu\text{rad}$  以上,满足光刻机使用指标需求。所提出的检测方法可有效解决 MMA 检测过程中的串扰问题,对光刻机自由光瞳照明模块的角位置检测具有重要意义。

**关键词** 测量; 自由光瞳照明; 微反射镜阵列(MMA); 角位置检测; 光斑串扰抑制算法

中图分类号 TG82; O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230482

## 1 引言

光刻机是制造超大规模集成电路的关键装备之一。随着半导体行业的飞速发展,人们对光刻机性能的要求不断提升。在光刻机曝光光源波长与投影物镜数值孔径比值固定的情况下,降低工艺因子( $k_1$ )可有效提高光刻机分辨率。此时出现了各种分辨率增强技术(RET)<sup>[1]</sup>,其中光源掩模联合优化(SMO)技术<sup>[2-4]</sup>,通过联合优化照明系统的光瞳照明模式与掩模图形<sup>[5]</sup>,可有效提高光刻分辨率并增加焦深,在 28 nm 以下节点的浸没式光刻机<sup>[6]</sup>中有着广泛的应用。目前产生照明模式的方式有两类:一种方法是通过衍射变换元件(DOE)和傅里叶变换透镜实现不同的光瞳照明模式,但其缺乏灵活性,单一的 DOE 只可产生单一光瞳<sup>[7]</sup>;另一种方法则是通过自由光瞳照明模块中微反射镜阵列(MMA)角位置分布的精确调控实现不同自由光瞳照明模式的输出<sup>[8]</sup>,此方法具有更多的灵活性,并且可实时补偿照明系统偏差,目前自由光瞳照明模块已成为 28 nm 以下节点浸没式光刻机的标配。

微反射镜阵列作为实现自由光瞳照明的核心元件,其角位置的精准检测是确保任意照明模式实现的前提<sup>[9]</sup>。目前国内外用于反射镜镜面角位置检测的方法有光学内反射小角度测角法、激光干涉法<sup>[10]</sup>、激光自准直法<sup>[11-12]</sup>等。然而以上测角方法仅限于单个较大口径反射镜镜面的角位置检测。关于小尺寸、高集中度

的微反射镜阵列反射镜面的角位置检测研究鲜有报道。尽管研究人员提出了一种基于阵列光源标定相对光强检测 MMA 镜面角位置的方案<sup>[13]</sup>,但并未给出该方案的检测精度等相关信息。此外,该方案中阵列光源的实现存在较大的技术难度。

为满足自由光瞳照明模块对 MMA 镜面角位置检测的需求,本文对一种基于微机电系统(MEMS)振镜二维逐点扫描的 MMA 角位置检测装置进行研究,该装置包括二维光点阵列产生组件、傅里叶镜组<sup>[9]</sup>和位置探测器(PSD)接收组件。MMA 微反射镜集中度高、尺寸小,并且在实际检测光路中,主光轴与 MMA 微反射镜法线存在夹角,导致聚焦光斑在 MMA 面上离焦,最终使得相邻镜面反射光容易出现串扰的问题。针对该问题,本文提出了一种微反射镜阵列角位置检测过程中的光斑串扰抑制算法。仿真结果显示,在检测光斑尺寸大于单个微反射镜尺寸的串扰情况下,该方法的检测精度可保持在 10  $\mu\text{rad}$  以上,满足光刻机使用指标要求。

## 2 角位置检测装置的工作原理

自由光瞳模块中的 MMA 由 4096 个转动角二维可控、小尺寸、高集中度的微反射镜组成,如图 1 所示。单个微反射镜基于静电驱动原理,以平行板电容中电荷间的库仑力作为驱动力<sup>[14]</sup>,带动蛇形梁产生不同扭矩,使圆形反射镜面沿两个相互垂直的转轴转动。仿真时尽可能还原 MMA 的实际工作状态,

收稿日期: 2023-02-02; 修回日期: 2023-04-20; 录用日期: 2023-04-28; 网络首发日期: 2023-05-09

基金项目: 上海市集成电路科技支撑专项(20501110600)、上海市政府间科技合作计划(20500711300)

通信作者: \*hujingpei@siom.ac.cn

对 MMA 进行如下建模:每个微反射镜的整体尺寸为  $0.93\text{ mm} \times 0.93\text{ mm}$ , 圆形镜面的直径为  $0.8\text{ mm}$ , 二维转角范围均在  $\pm 2^\circ$  以内, 并且镜面的反射率设置为  $97\%$ , 镜面边缘区域(环形外框、蛇形梁等)的

射率设置为  $50\%$ 。MMA 不同的角位置分布产生不同的照明模式, 为确保 MMA 各个微反射镜转动至自由光瞳模块所需的角位置, 须对 MMA 进行角位置检测。

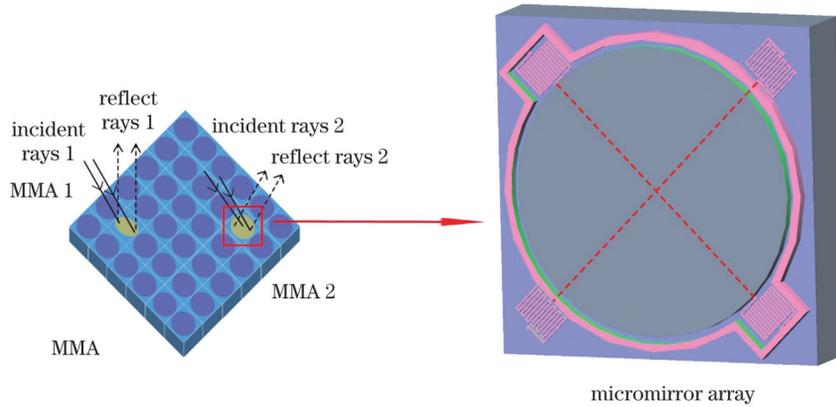


图 1 MMA 示意图

Fig. 1 Schematics of MMA

角位置检测装置原理图如图 2 所示, 主要包括二维光点阵列产生组件、傅里叶镜组和 PSD<sup>[15]</sup>。其中, 待测 MMA 位于二维光点阵列产生组件和傅里叶镜组之间, 为避免检测装置遮挡自由光瞳模块主光路, 检测装置的入射光线与 MMA 镜面法线之间存在  $35^\circ$  夹角。二维光点阵列组件由 MEMS 振镜和平场聚焦透镜组成,  $405\text{ nm}$  的单模激光经过二维光点阵列产生组件后聚焦到 MMA 每个微反射镜的镜面上<sup>[16-17]</sup>, 且到达每个镜面的主光线相互平行。随后, 被 MMA 每个微反射镜反射的不同角度的光再次经过傅里叶变换镜组聚焦到 PSD 的不同位置上。PSD 是基于横向效应的光生伏特器件<sup>[18]</sup>, 照射在其有效区域上的光斑会产生光电流, 输出的位移信号与入射光斑的形状和密度分布无关, 只与有效区域光斑的质心位置相关, 即利用光斑质心的坐标可以推算出 PSD 上的电信号。当 MMA

微反射镜发生不同角度转动时, PSD 上光斑质心的位置产生不同的偏移, 其中 PSD 上光斑质心的偏移距离与镜面偏转角满足关系<sup>[9]</sup>

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta d}{f}\right), \quad (1)$$

式中:  $\Delta\theta$  为镜面发生转动引起的反射光线偏转角度;  $\Delta d$  为 MMA 镜面发生偏转时 PSD 上光斑质心的偏移距离;  $f$  为傅里叶镜组的等效焦距。反射镜面的二维转动角度与反射光线的偏转角度存在如下换算关系: 当入射光与反射镜转轴垂直时, 反射光偏转角与镜面转角满足 2 倍关系<sup>[19]</sup>; 当入射光与反射镜转轴不垂直时, 2 倍关系不再满足<sup>[20]</sup>, 此时通过坐标系转换可获得镜面转角与反射光线之间的关系<sup>[21]</sup>。因此, 通过对 PSD 上的信号进行处理即可获得 MMA 中每个微反射镜的角位置。

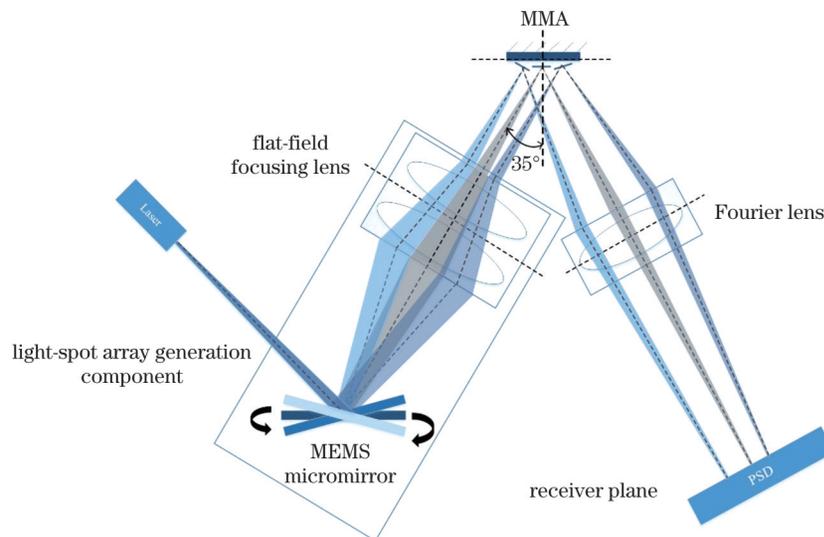


图 2 角位置检测模块原理示意图

Fig. 2 Schematic of angle position detection module

在实际自由光瞳模块中, MMA 包含的微反射镜数量有数千个之多, 为节省时间本文以  $3 \times 3$  数量的 MMA 进行简化仿真, 其仿真模型如图 3 所示。当照射到 MMA 微反射镜上的光斑尺寸过大时, 被照射的反射镜周围边框及邻域微反射镜镜面也会受到照射, 该部分反射光将同时被 PSD 接收, 进而与 PSD 的输出信号发生串扰并影响检测精度。

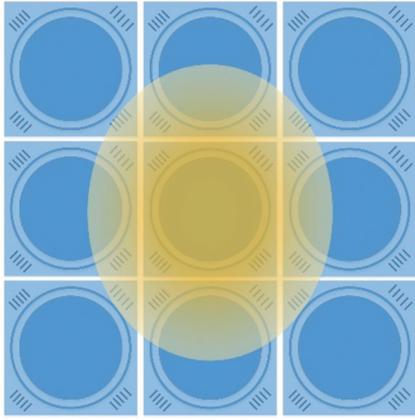


图 3 大尺寸高斯光斑在 MMA 上光强分布示意图

Fig. 3 Schematic of light intensity distribution of large size Gaussian spot on MMA

表 1 不同高斯发散角下 MMA 上的高斯光斑尺寸与 MMA 镜面尺寸的比值

Table 1 Ratio of Gaussian spot size on MMA to MMA mirror size under different Gaussian divergence angles

Gaussian beam divergence angle / ( $^{\circ}$ )	Size of spot along long axis / mm	Size of spot along short axis / mm	Size ratio	Extra-spot ratio
0.024	0.470614	0.392755	0.28880	0
0.050	0.943926	0.777051	1.14606	0.14606
0.070	1.316465	1.079978	2.22149	1.22149

此外, 在角位置检测装置中, 光点阵列出射光的远心度不可避免地存在一定偏差, 且整个系统也存在一定的像差。为减小角位置检测装置中光路设计对 MMA 镜面角位置求解精确度的影响, 需要在仿真时对系统误差进行标定。标定方法如下: 在角位置检测装置中, 用一块平面镜代替 MMA 放置于系统中, 保证平面镜镜面与原 MMA 零位镜面重合。转动光点阵列中 MEMS 振镜, 使光束对原 MMA 中每个微反射镜的位置进行扫描, 并获取不同位置处的光斑质心信息, 从而求解出不同位置处的角度偏差。该部分的系统误差在仿真中主要来源于角位置检测装置中部分光路设计误差, 在实际检测中还有加工和装调误差及电路控制等系统误差。因此, 为提升 MMA 角度检测精度, 无论是否使用串扰抑制算法, 均需要在求解 MMA 微反射镜镜面转角时进行标定。此外, 需要注意的是, 标定使用的平面反射镜的面形精度直接影响系统的测试精度, 需要对其面形进行严格控制以满足测试指标需求。

为进一步研究 MMA 角位置检测时的串扰问题, 本文设置入射高斯光束的发散角分别为  $0.024^{\circ}$ 、 $0.050^{\circ}$  和  $0.070^{\circ}$ , 其经过光点阵列产生组件后在 MMA 位置处形成不同尺寸的会聚高斯光斑。由于入射光束与 MMA 法线成  $35^{\circ}$  夹角, 照射到 MMA 上的光斑呈椭圆形状, 如图 3 所示。取光强降至 13.5% 时采集到的光斑尺寸作为高斯光斑的尺寸, 结果如表 1 所示。为方便后续评价, 在入射光斑中心与被测微反射镜镜面中心重合的前提下, 我们定义入射光斑面积和微反射镜镜面面积的差值与单个微反射镜镜面面积的比值为光斑超出比。需要说明的是, 光斑超出比表示照射至 MMA 镜面的光斑与 MMA 微反射镜的尺寸大小关系, 该值在入射光斑尺寸小于镜面尺寸时为 0。当高斯光源发散角分别为  $0.024^{\circ}$ 、 $0.050^{\circ}$  和  $0.070^{\circ}$  时, 光斑超出比分别为 0、14.61% 和 122.10%。当光斑超出比为 14.61% 时, 照射至 MMA 的光斑超出中心反射镜镜面但未照射至周围镜面; 当光斑超出比为 122.1% 时, 照射至 MMA 的光斑超出中心反射镜镜面且照射至周围镜面。利用此参数可观察后续光斑串扰抑制算法在不同尺寸光斑串扰下的抑制效果。

### 3 MMA 角度检测过程中的光斑串扰抑制算法

在不失一般性的情况下, 我们设 MMA 由  $m \times n$  个微反射镜组成。当入射光斑大于单个微反射镜尺寸且照射至邻域微反射镜时, 其反射光经过傅里叶变换镜组后在 PSD 上形成诸多串扰小光斑, PSD 将获取所有光斑的综合质心和光强信息。此时, PSD 采集到的光斑质心满足

$$Y = \frac{I_b}{I} \times y_b + \sum_{i=1}^{m \times n} \frac{K_i}{I} \times y_i, \quad (2)$$

式中:  $Y$  和  $I$  分别为 PSD 探测到的所有光斑的综合质心坐标和总光强;  $y_b$  和  $I_b$  分别为光斑照射至 MMA 外框结构时 PSD 探测到的总质心坐标和光强;  $y_i$  和  $K_i$  分别为光斑照射至 MMA 中第  $i$  个微反射镜镜面时 PSD 探测到的质心坐标和光强。  $Y$ 、 $I$ 、 $y_b$ 、 $I_b$ 、 $K_i$  均可通过调节 MMA 中各个镜面的转角测量得到, 此时 MMA 中各微反射镜的角位置  $y_i$  可通过各个微反射镜镜面的质

心求得。因 MMA 外框结构相关的质心与光强可提前测出, 可视作常数项, 为方便求解, 将与 MMA 外框结构相关的项移至式(2)的等号左侧。为了研究光斑串扰时抑制算法对各微反射镜转角的求解准确性, 本文以大尺寸光斑照射 MMA 为例进行说明, 即光斑大于单个微反射镜尺寸且照射至邻域微反射镜。

当 MMA 中各个微反射镜处于不同角位置时, 转动光点阵列中的 MEMS 振镜, 使光斑对 MMA 中各个微反射镜进行扫描。当光斑照射不同微反射镜时, PSD 采集到的光斑质心经过变形得到

$$\begin{cases} Y_1 - \frac{I_{b1}}{I_1} \times y_{b1} = \sum_{i=1}^{m \times n} \frac{K_i}{I_1} \times y_i \\ Y_2 - \frac{I_{b2}}{I_2} \times y_{b2} = \sum_{i=1}^{m \times n} \frac{K_i}{I_2} \times y_i \\ \vdots \\ Y_{m \times n} - \frac{I_{bm \times n}}{I_{m \times n}} \times y_{bm \times n} = \sum_{i=1}^{m \times n} \frac{K_i}{I_{m \times n}} \times y_i \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $Y_i (i=1, 2, \dots, m \times n)$  和  $I_i (i=1, 2, \dots, m \times n)$  分别为光斑扫描 MMA 时 PSD 获取的所有光斑的综合质心坐标和光强信息;  $y_{bi} (i=1, 2, \dots, m \times n)$  和  $I_{bi} (i=1, 2, \dots, m \times n)$  分别为光斑扫描 MMA 过程中光斑照射到 MMA 外框结构时 PSD 探测到的总质心坐标和光强;  $K_i (i=1, 2, \dots, m \times n)$  为光斑照射到 MMA 中第  $i$  个微反射镜时 PSD 探测到的光强, 因光斑照射至 MMA 不同微反射镜时, 各个微反射镜镜面反射至 PSD 的光强不同, 即  $K_i (i=1, 2, \dots, m \times n)$  均不相同;  $y_i (i=1, 2, \dots, m \times n)$  为待求项, 表示光斑照射到 MMA 第  $i$  个微反射镜镜面时 PSD 探测到的质心坐标, 因 MMA 各个微反射镜的角位置未发生改变, 各微反射镜镜面反射至 PSD 的质心坐标不会发生改变, 即  $y_i (i=1, 2, \dots, m \times n)$  均相同。式(3)中每一个方程均为光斑照射单个微反射镜时的质心方程, 即通过求解式(3)式可得到 MMA 各个微反射镜镜面质心, 最终在光斑串扰情况下可求解各个微反射镜的角位置。

为了增强此方法的通用性, 将光斑扫描每一个微反射镜镜面的相对光强  $\frac{K_i}{I} (i=1, 2, \dots, m \times n)$  整合, 得到一个  $(m \times n) \times (m \times n)$  的相对光强矩阵 ( $A_{mn}$ ):

$$A_{mn} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}}{I_1} & \dots & \frac{K_{1(m \times n)}}{I_1} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{K_{i1}}{I_i} & \dots & \frac{K_{i(m \times n)}}{I_i} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{K_{(m \times n)1}}{I_{m \times n}} & \dots & \frac{K_{(m \times n)(m \times n)}}{I_{m \times n}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $K_{i(m \times n)}$  为光斑照射到 MMA 中第  $i$  行第  $m \times n$  列微反射镜时 PSD 探测到的光强。由于 MMA 中的微

反射镜处于不同角位置时各个微反射镜的转动角度较小, 微反射镜上的辐照光源的面积变化很小。因此求解不同微反射镜转角时可使用同一个相对光强矩阵  $A_{mn}$ 。

相对光强矩阵  $A_{mn}$  的标定方法如下: MMA 中每个微反射镜处于各自待测的角位置, 首先转动光点阵列组件的 MEMS 振镜, 使得光斑照射 MMA 中的第一个微反射镜, 通过 PSD 获取所有光斑的综合质心光强信息  $I_1$ 。当光斑只照射 MMA 单个微反射镜镜面时, 其光强需要分两步获得: 第一步测得 MMA 的外框结构光强。若光斑照射 MMA 的位置不发生改变, 仅调整所有微反射镜, 使所有的反射光无法照射到 PSD, 此时 PSD 采集到的光强即为 MMA 上各微反射镜外框结构的光强  $I_b$ 。第二步测得第一个微反射镜镜面与外框结构的光强之和。将第一个微反射镜旋转回其待测角度, 再用光斑照射 MMA, 此时 PSD 得到第一个微反射镜镜面与外框结构的光强之和。用两次得到的光强作差即得到第一个微反射镜镜面的反射光强  $K_{11}$ 。随后将第一个微反射镜旋转至 PSD 采集不到光线的位置, 将第二个微反射镜旋转至待测角度, 重复以上两个步骤, 得到第二个微反射镜镜面反射光强  $K_{12}$ , 依此类推, 依次得到  $m \times n$  个微反射镜的镜面反射光强。此时便获得了相对光强矩阵  $A_{mn}$  中第一个行向量, 随后转动 MEMS 振镜, 使光斑照射第二个微反射镜, 重复以上所有操作, 获得  $A_{mn}$  中第二个行向量, 不断转动 MEMS 振镜, 实现 MMA 微反射镜扫描, 最终便可获得相对光强矩阵  $A_{mn}$ 。

将式(3)用矩阵方程的形式表达, 即

$$C_{(m \times n) \times 1} = A_{mn} \times P_{(m \times n) \times 1}, \quad (5)$$

式中:  $C_{(m \times n) \times 1}$  为式(3)中所有方程等号左侧所有数据构成的  $(m \times n) \times 1$  的列矩阵;  $P_{(m \times n) \times 1}$  为 MMA 中各个镜面在 PSD 上形成的质心坐标的  $(m \times n) \times 1$  的列矩阵。在标定一次相对光强矩阵  $A_{mn}$  后, 当 MMA 中各个反射镜处于其他待测角位置时, 只要转动光点阵列组件中的 MEMS 振镜, 实现 MMA 微反射镜的逐一扫描, 便可获得不同的质心坐标与外框结构光强, 即  $C_{(m \times n) \times 1}$ 。随后求解式(5)即可得到各个微反射镜镜面的质心信息  $P_{(m \times n) \times 1}$ 。最终通过坐标系旋转, 即可获得 MMA 中各个微反射镜的角位置信息。

## 4 仿真分析结果

为验证算法的正确性, 我们使用上述  $3 \times 3$  的 MMA 进行仿真, 其中每个微反射镜镜面均可在二维正交方向上转动。我们定义 MMA 基准面为 XY 面, 镜面绕 X 轴旋转的角度为  $\alpha$ , 镜面绕 Y 轴旋转的角度为  $\beta$ 。设定 MMA 中间位置的微反射镜的初始转角  $\alpha=1.5^\circ$ 、 $\beta=1.3^\circ$ 。其余所有微反射镜转角  $\alpha=0.5^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 。分别使用光斑超出比为 0、14.61%、122.1% 的三

种不同光斑尺寸照射 MMA。在未使用光斑串扰抑制算法情况下, MMA 各微反射镜镜面转角的求解误差(检测值和设置值之差的绝对值)如表 2 所示。可以看出,随着光斑尺寸的逐渐增大,四周邻域镜面形成的串扰对 MMA 镜面角位置的求解精度的影响逐渐增加。当光斑超出比为 122.1%,即光斑尺寸超出 MMA 中心

微反射镜镜面且照射至四周微反射镜镜面时,角位置测量的最大误差已达到 5387.48  $\mu\text{rad}$ 。值得注意的是,  $3 \times 3$  MMA 中不同位置处的微反射镜的检测误差存在差异,这是由于检测系统离轴,其在空间上不对称。因此,为满足检测需求,须保证最大检测误差在检测指标以内。

表 2 未使用串扰抑制算法时镜面角位置的误差  
Table 2 Errors of mirror angular positions without crosstalk suppression algorithm

Mirror No.	Extra-spot ratio is 0		Extra-spot ratio is 14.6%		Extra-spot ratio is 122.1%	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
1	1.78	$1.20 \times 10^{-2}$	411.78	1.96	980.72	19.01
2	1.75	$1.97 \times 10^{-2}$	295.45	171.78	340.69	930.71
3	1.78	$8.59 \times 10^{-3}$	411.42	1.26	981.29	10.91
4	1.56	$1.35 \times 10^{-2}$	413.54	27.60	828.47	292.78
5	4.59	4.35	1630.42	1587.64	5181.64	5387.48
6	1.57	$3.39 \times 10^{-2}$	412.34	28.13	826.03	285.32
7	1.56	$2.16 \times 10^{-2}$	396.32	2.73	947.39	16.84
8	1.56	$5.72 \times 10^{-2}$	278.23	173.74	300.24	933.25
9	1.58	$6.56 \times 10^{-2}$	395.90	2.02	945.72	9.52

在检测 MMA 微反射镜角位置时,使用串扰抑制算法后, MMA 中各微反射镜镜面角位置的求解误差如表 3 所示。相比未使用光斑串扰抑制算法,在不同光斑尺寸下,使用光斑串扰抑制算法后,各个微反射镜镜面的角位置误差均减小,其角位置的求解精度均有提升。对于光斑超出比为 122.1% 的入射光斑,微反射镜最大检测误差由 5387.48  $\mu\text{rad}$  降低到 7.29  $\mu\text{rad}$ ,

满足检测误差小于 10  $\mu\text{rad}$  的自由光瞳照明模块的指标需求。此外,我们根据数据还可以看出, MMA 中间微反射镜的求解误差在不同光斑尺寸下均为  $10^{-2}$   $\mu\text{rad}$  量级,周围微反射镜的检测误差反而较大。这是由于中间微反射镜位于角位置检测系统光轴上,系统远心度误差以及其他像差最小,而随着微反射镜逐渐偏离检测系统光轴,系统像差增大,因此误差增大。

表 3 使用串扰抑制算法时镜面角位置的误差  
Table 3 Errors of mirror angular positions with crosstalk suppression algorithm

Mirror No.	Extra-spot ratio is 0		Extra-spot ratio is 14.6%		Extra-spot ratio is 122.1%	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
1	$2.27 \times 10^{-2}$	$5.60 \times 10^{-3}$	$2.41 \times 10^{-1}$	$5.11 \times 10^{-1}$	7.29	4.45
2	$2.09 \times 10^{-2}$	$5.37 \times 10^{-3}$	$2.11 \times 10^{-1}$	$6.61 \times 10^{-2}$	7.02	$2.47 \times 10^{-1}$
3	$2.09 \times 10^{-2}$	$3.77 \times 10^{-3}$	$2.37 \times 10^{-1}$	$4.55 \times 10^{-1}$	7.29	4.42
4	$3.49 \times 10^{-3}$	$3.70 \times 10^{-3}$	$2.44 \times 10^{-2}$	$4.91 \times 10^{-1}$	$1.26 \times 10^{-1}$	4.27
5	0	0	$1.75 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^{-2}$
6	$1.75 \times 10^{-3}$	$1.66 \times 10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-2}$	$4.37 \times 10^{-1}$	$8.73 \times 10^{-2}$	4.26
7	$1.92 \times 10^{-2}$	$3.14 \times 10^{-4}$	$2.95 \times 10^{-1}$	$4.58 \times 10^{-1}$	7.27	4.33
8	$1.92 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-5}$	$1.85 \times 10^{-1}$	$1.77 \times 10^{-2}$	6.90	$2.69 \times 10^{-1}$
9	$1.92 \times 10^{-2}$	$1.15 \times 10^{-3}$	$2.91 \times 10^{-1}$	$4.13 \times 10^{-1}$	7.24	4.29

## 5 结 论

针对 28 nm 及以下节点光刻机自由光瞳照明模块中 MMA 角位置检测的需求,提出了一种用于 MMA 角位置检测的光斑串扰抑制算法,以提高 MMA 微反射镜镜面角位置的检测精度。该算法在入射光斑尺寸存在串扰的情况下,通过标定角位置检测装置中 MMA 各个

微反射镜面的相对光强占比,提高了 MMA 每个微反射镜镜面角位置的检测精度。仿真结果表明,使用该方法测量 MMA 微反射镜的角位置时,可将检测精度提升至 10  $\mu\text{rad}$  以内,此精度已达到光刻机自由照明模块对 MMA 微反射镜角位置检测的要求。因此,所提检测方法可有效解决 MMA 检测过程中的串扰问题,对于光刻机自由光瞳照明模块的实际应用具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] 陈宝钦. 光刻技术六十年[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922031.  
Chen B Q. Sixty years of lithography technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922031.
- [2] 曾宗顺, 张方, 牛志元, 等. 基于遗传算法的微反射镜阵列角位置分布算法[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0805003.  
Zeng Z S, Zhang F, Niu Z Y, et al. Angular position distribution algorithm of micro mirror array based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805003.
- [3] Coskun T H, Dai H X, Huang H T, et al. Accounting for mask topography effects in source-mask optimization for advanced nodes[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7973: 79730P.
- [4] 王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源掩模投影物镜联合优化方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1022001.  
Wang L, Li S K, Wang X Z, et al. Source mask projector optimization method of lithography tools based on particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1022001.
- [5] 廖陆峰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于衍射谱分析的全芯片光源掩模联合优化关键图形筛选[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2122001.  
Liao L F, Li S K, Wang X Z, et al. Critical pattern selection based on diffraction spectrum analysis for full-chip source mask optimization[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2122001.
- [6] 付婧媛, 苏芮, 阮晓东, 等. 浸没式光刻机浸液系统污染控制研究现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922014.  
Fu J Y, Su R, Ruan X D, et al. Research status and progress of pollution control of immersed mask aligner immersion system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922014.
- [7] Zhang F, Zhu J, Yue W R, et al. An approach to increase efficiency of DOE based pupil shaping technique for off-axis illumination in optical lithography[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4482-4493.
- [8] Zimmermann J, Gräupner P, Neumann J T, et al. Generation of arbitrary freeform source shapes using advanced illumination systems in high-NA immersion scanners[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764005.
- [9] Ma X Z, Zhang F, Huang H J, et al. Angle position monitoring technology of micro-mirror array for freeform illumination module in immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10827: 1082733.
- [10] 董磊, 阮宇翔, 王建立, 等. 基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811016.  
Dong L, Ruan Y X, Wang J L, et al. Progress in high accurate angle measurement technology of long-distance target based on computational interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811016.
- [11] 李金阳, 吴简彤, 韩慧群. 小角度测量的光学方法及应用[J]. 应用科技, 2006, 33(7): 15-18.  
Li J Y, Wu J T, Han H Q. Small Angle measurement with optical methods and its application[J]. Applied Science and Technology, 2006, 33(7): 15-18.
- [12] 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.  
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.
- [13] Patra M. Microlithographic projection exposure apparatus and related method: US8593645[P]. 2013-11-26.
- [14] 徐丹慧. 基于 MEMS 扫描镜的激光微投影系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.  
Xu D H. Design and implementation of laser micro-projection system based on MEMS scanning mirror[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [15] 潘文博. 激光二维微角度测量系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
Pan W B. Research on two-dimensional laser micro-angle measuring system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [16] 张奇. 全介电超表面平场超分辨聚焦器件研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
Zhang Q. Study on all-dielectric metasurfaces flat-field super-resolution focusing devices[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [17] 钟义晖, 龚强, 朱天凤. 基于 MEMS 高速光学扫描系统[J]. 应用激光, 2021, 41(2): 391-394.  
Zhong Y H, Gong Q, Zhu T F. High speed optical scanning system based on MEMS[J]. Applied Laser, 2021, 41(2): 391-394.
- [18] Martin C, Jelinsky P, Lampton M, et al. Wedge-and-strip anodes for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors[J]. Review of Scientific Instruments, 1981, 52(7): 1067-1074.
- [19] 赵悦. 微反射镜阵列的设计和工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
Zhao Y. Design and fabrication of micromirror arrays[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [20] 王超. 高分辨率三维激光雷达成像技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.  
Wang C. Research on high-resolution 3D imaging lidar techniques [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [21] Craig J J. Introduction to robotics: mechanics & control[M]. 3rd ed. Mass: Addison-Wesley Pub. Co., 1986.

## Algorithm for Suppressing Optical Spot Crosstalk in Angular Position Detection of Micromirror Array

Wang Ting<sup>1,2</sup>, Hu Jingpei<sup>1,2\*</sup>, Huang Lihua<sup>1,2</sup>, Zeng Aijun<sup>1,2</sup>, Huang Huijie<sup>1,2</sup>, Sergey Avakaw<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Company of KBTEM-OMO Replication Unitary Scientific and Production Enterprise, Minsk 220033, Belarus

### Abstract

**Objective** Lithographic technology is crucial for fabricating ultralarge-scale integrated circuits. The performance requirements of lithography machines are constantly increasing owing to rapid developments in the semiconductor industry. The use of various

resolution enhancement techniques has also led to a continuous reduction in the critical dimensions of integrated circuits. Among them, the source mask optimization (SMO) technology optimizes the pupil illumination mode and mask pattern of the illumination system, effectively improving the lithography resolution and increasing the depth of focus, and thus has been widely used in immersion lithography machines at  $\leq 28$  nm nodes. In particular, two methods are commonly employed to implement the freeform illumination: One uses diffractive optical elements to achieve freeform illumination. However, it lacks flexibility because a single element can only produce a single pupil shape. The other method involves precise control of the angular position distribution of the micromirrors in a freeform illumination module to realize different freeform illumination modes. This method is more flexible and can compensate for illumination system deviations in real time. Currently, the freeform illumination module has become a standard feature of immersion lithography machines at  $\leq 28$  nm nodes. Micromirror arrays (MMAs) are the core components for implementing freeform illumination, and accurate monitoring of their angular positions is a prerequisite for implementing any illumination mode. However, owing to the high integration and small size of the micromirrors in an MMA, adjacent mirror surface reflections can easily cause crosstalk during the actual detection. This study proposes a spot crosstalk suppression algorithm for detecting the angular positions of MMAs, which enables high-precision detection of the angular position of each micromirror, even under crosstalk conditions.

**Methods** A spot crosstalk suppression algorithm for monitoring the angular position of an MMA is proposed to address the issue of crosstalk between adjacent mirror surface reflections, which is prone to occur because of the high integration and small size of the MMA. Accordingly, the relative light intensity matrix is first calibrated by the light intensity of the micromirrors under test and neighboring micromirrors in the array. Because the relative light intensity matrix remains unchanged during the testing process, the centroid light intensity matrix equation can be derived through unified testing and data processing of the MMA. Solving the light intensity matrix equation, the influence of spot crosstalk during the testing process can be eliminated, and ultimately, the angular position information of each micromirror in the MMA can be obtained.

**Results and Discussions** This study is based on an MMA angle position detection unit (Fig. 2), and three different spot overfill ratios are considered (Table 1). The simulation results show that when the MMA is illuminated with spots under different extra spot ratios, the use of spot crosstalk suppression algorithms can improve the accuracy of the angular position of each micromirror in the MMA (Tables 2 and 3). When the crosstalk exists between the spot size and the size of a single micromirror, the spot-crosstalk suppression algorithm significantly improves the accuracy of the angular position of each micromirror in the MMA. The maximum detection error of the micromirror is reduced from 5387.48  $\mu\text{rad}$  to 7.29  $\mu\text{rad}$ , meeting the requirement of the free pupil illumination module specification that the detection error is less than 10  $\mu\text{rad}$ . The data also show that the accuracy of the angular position of the middle micromirror in the MMA is  $10^{-2}$   $\mu\text{rad}$  for different spot sizes; whereas, the error of the angular position of the peripheral micromirror is larger owing to its deviation from the detection system axis. Overall, the spot-crosstalk suppression algorithm can significantly improve the accuracy of the angular position of each micromirror in the MMA when crosstalk exists.

**Conclusions** This study proposes a spot crosstalk suppression algorithm. The reflection intensities of the micromirrors to be tested and their neighboring mirrors are measured in advance to determine the relative light intensity matrix in the MMA angle position measurement. The centroid light-intensity matrix equation of the MMA can be derived by combining this matrix with the relative light-intensity matrix obtained through MMA scanning and calibration. The angle position of each micromirror in the MMA can be obtained by solving the centroid light intensity matrix equation, which significantly improves the accuracy of the angle position determination when spot crosstalk is present. With this method, the accuracy of the angle-position determination of each micromirror in the MMA can be improved to within 10  $\mu\text{rad}$ , which meets the requirements for detecting the angle positions of the micromirrors in the free-illumination module of lithography machines. Therefore, the proposed detection method effectively solves the crosstalk problem in the MMA detection process, which is of great significance for the practical application of free-pupil illumination modules in lithography machines.

**Key words** measurement; freeform pupil illumination; micromirror array (MMA); angle position detection; algorithm of spot crosstalk suppression