

# 光刻机扫描狭缝刀口半影宽度测量技术

刘志帆<sup>1</sup>, 陈明<sup>2</sup>, 步扬<sup>2\*</sup>, 徐静浩<sup>2</sup>, 范李立<sup>2</sup>, 张建华<sup>1</sup>, 王向朝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;

<sup>2</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

**摘要** 扫描狭缝是步进扫描光刻机用于控制曝光剂量的重要单元。随着光刻工艺节点减小到 90 nm 及以下, 光刻照明分系统对刀口半影宽度的测量精度和重复性提出了更高要求。基于此, 提出一种基于光瞳像的光刻机扫描狭缝刀口半影宽度测量技术。分析了共面扫描狭缝刀片成像光路, 推导得到掩模面半影区与光瞳像的对应关系。搭建了扫描狭缝刀口半影检测系统, 并对 90 nm 光刻机照明分系统的扫描狭缝刀口半影宽度进行测量。实验结果表明, 所提测量技术可有效改善光强波动对刀口半影宽度测量的影响, 扫描狭缝刀口半影宽度的测量重复性达到 0.026 mm, 提高了 3.46 倍(与传统扫描法相比)。该技术可用于高数值孔径浸没式光刻机照明分系统光学半影参数的测量。

**关键词** 测量; 光刻机; 扫描狭缝; 半影宽度; 成像测量; 光瞳

**中图分类号** TN305.99; TP23; TP29

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.1004005

## Blade Edge's Penumbra Measurement for Scanning Slit of Lithographic Tools

Liu Zhifan<sup>1</sup>, Chen Ming<sup>2</sup>, Bu Yang<sup>2\*</sup>, Xu Jinghao<sup>2</sup>,  
Fan Lili<sup>2</sup>, Zhang Jianhua<sup>2</sup>, Wang Xiangzhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** Scanning slit is one of the most important elements in step-and-scan lithographic tools for controlling exposure doses. As the technology of lithography extends to 90-nm (and lower) process nodes, the lithographic-tool illumination subsystem has presented significant requirements for the precision and repeatability of the penumbra measurement. Based on this, a blade edge's penumbra measurement technique for scanning slits of lithographic tools based on the pupil image is proposed. The corresponding relationship between the penumbra of the mask surface and pupil image is deduced by analyzing the imaging optical path of the coplanar scanning slit. A penumbra measurement system is developed, and the scanning slit edges' penumbra of a 90-nm lithographic-tool illumination system is measured. The experimental result shows that the proposed measurement method can effectively reduce the impact of light-intensity fluctuation on the penumbra measurement. The repeatability of the penumbra measurement is 0.026 mm, which is 3.46-times higher than that of the conventional scanning method. This technique can be used to measure the optical penumbra parameters of high-numerical-aperture immersion-lithographic-tool illumination subsystems.

**Key words** measurement; lithographic tools; scanning slit; penumbra width; imaging measurement; pupil

**OCIS codes** 120.4820; 110.2970; 110.3960

## 1 引言

集成电路在国民经济各领域已得到广泛应用,

成为现代社会不可或缺的重要工业产品。光刻机是集成电路制造的核心装备之一, 其光刻分辨率决定着集成电路图形的特征尺寸<sup>[1-4]</sup>。人们对集成电路

收稿日期: 2019-03-21; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 国家科技重大专项课题(2009ZX02205-001)、广西高校光电信息处理重点实验室开放基金(KFJJ2016-03)

\* E-mail: buyang@siom.ac.cn

芯片集成度的要求越来越严格,为使光刻工艺的特征尺寸越来越小,光刻机已经发展到步进扫描投影光刻阶段<sup>[5-7]</sup>。

扫描狭缝是步进扫描投影光刻机曝光分系统的重要部件之一,其功能是确定曝光视场尺寸和中心位置,控制曝光剂量,并与掩模台和硅片台完成同步扫描曝光。光刻曝光时,扫描狭缝刀口会在掩模面及硅片面上形成光学半影区。当掩模面或硅片面处扫描狭缝刀片的半影最小时,扫描狭缝位于最佳位置。扫描狭缝的装调误差及刀口的热变形会使半影宽度增大,进而影响曝光性能。随着光刻机曝光分系统数值孔径增加到 1.35,对半影宽度的控制,特别是重复性要求进一步提高<sup>[8]</sup>。

现有的常用扫描狭缝刀口半影宽度测量的方法为归一化光强-坐标曲线(即扫描法)。依据采样路径的不同,可将扫描法分为等间隔采样法、二分查找法和二向边界扫描查找法等<sup>[9-10]</sup>。现有扫描法所用的机械装置结构简单,体积较小,已应用于整机检测。但受采样路径等因素的影响,该结构存在测量周期长、误差大、重复性低等不足,无法满足高数值孔径条件下的检测需求。

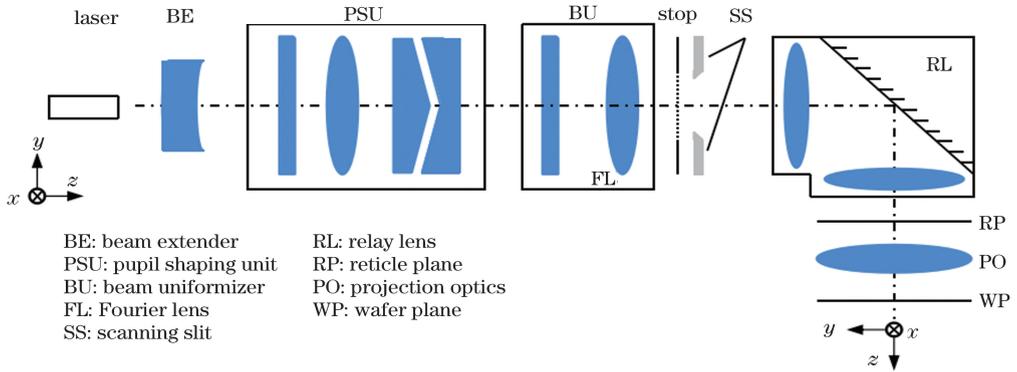


图 1 步进扫描光刻机曝光系统示意图

Fig. 1 Exposure system diagram of step-and-scan lithographic tool

## 2.2 扫描狭缝刀口半影

步进扫描式光刻机以准分子激光器作为光源,通常采用沿扫描方向( $y$  方向)截面呈梯形轮廓的照明光场来提高曝光剂量的均匀性<sup>[16]</sup>。使用离焦法实现梯形照明光场的方式是在矩形照明光场的基础上,通过组件间的离焦和遮挡实现的。具体是先采用微透镜阵列和傅里叶镜组构成的匀光单元实现矩形均匀照明的光路<sup>[17]</sup>,如图 2 所示。其中, $W_x$  和  $W_y$  分别表示矩形照明视场在  $x$  方向和  $y$  方向上的宽度。当中继镜组的物面与傅里叶镜组的后焦面之间存在轴向间隔时,在中继镜组的物面即产生  $x$  方

本文提出一种基于光瞳像的扫描狭缝刀口半影宽度测量技术。根据刀口附近有无照明光瞳图像时对应的位置坐标,得到刀口半影宽度。搭建光瞳成像检测装置,并利用该装置对 90 nm 光刻机照明分系统掩模面刀口半影宽度进行测量。

## 2 基本原理

### 2.1 光刻机照明系统

步进扫描投影光刻机曝光光学系统由照明分系统和投影物镜分系统组成<sup>[11]</sup>,如图 1 所示,其中, $z$  向为光轴传输方向, $x$  向和  $y$  向分别为掩模台或硅片台的非扫描方向和扫描方向。入射激光束经扩束单元、光瞳整形单元和匀光单元匀光后,在傅里叶镜组后焦面上获得均匀照明光场。该均匀照明光场经中继镜组后照射到掩模板上,投影物镜再将掩模板图成像到涂覆有光刻胶的硅片上<sup>[12-13]</sup>。视场光阑位于傅里叶镜组的后焦面,用以确定照明视场的中心位置和窗口大小,扫描狭缝置于中继镜组物面,两者之间存在一定的轴向间隔。扫描狭缝面与掩模面、掩模面与硅片面分别关于中继镜组、投影物镜呈物像共轭关系<sup>[14-15]</sup>。

向和  $y$  方向上边缘均呈梯形的照明分布。然后通过扫描狭缝将非扫描方向的梯形边缘遮挡,使梯形边缘变为直角边缘。这样,在掩模面上便得到非扫描方向截面呈矩形、扫描方向截面呈梯形的梯形照明视场。由物像共轭关系可知,掩模面上的梯形照明光场在硅片面上也呈梯形光强分布。硅片上每个曝光单元所接收的曝光剂量总和为梯形光强沿扫描方向的积分。为满足不同曝光区域尺寸的需求,可以通过调节刀片的位置改变照明光强轮廓尺寸。图 3 所示为梯形照明下扫描狭缝成像光路图。当刀片在梯形照明顶部区域移动时,可形成不同窗口大小

的照明光场。被刀片遮挡的光强分界线并不是完美的竖线,而是有一定宽度的,称之为扫描狭缝刀口半影宽度。扫描狭缝刀口半影主要是由刀片离焦误差和中继镜组像差造成的。

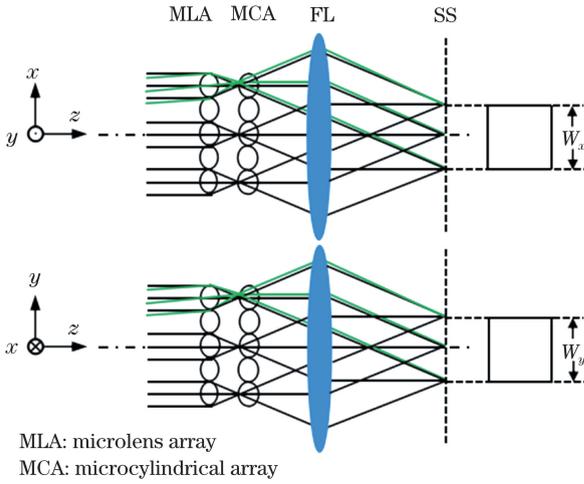


图 2 矩形照明光场示意图

Fig. 2 Diagram of rectangle lighting field

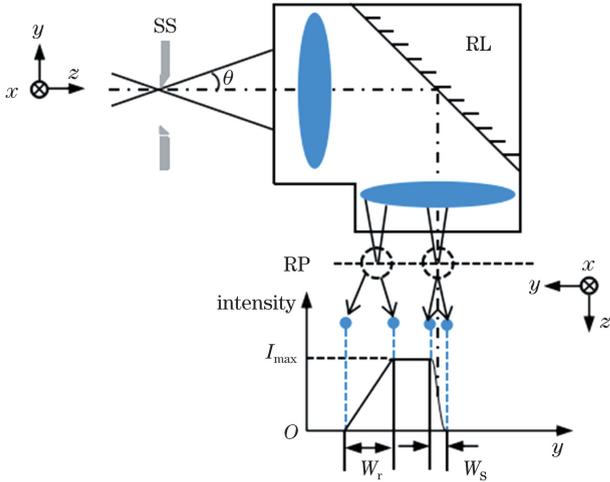


图 3 梯形照明下扫描狭缝刀口成像光路图

Fig. 3 Scanning slit imaging optical path under trapezoidal illumination

图 3 中,  $I_{max}$  为梯形照明光场扫描方向的归一化最大光强,  $W_t$  为梯形照明光场扫描方向的边缘宽度,  $W_s$  为扫描狭缝经中继镜组后在掩模面上的刀口半影宽度,  $\theta$  为中继镜组物面的光束半孔径角, 且有

$$\theta = \arcsin(N_{APO} \cdot \sigma_{max} \cdot \beta_{IL} \cdot \beta_{PO}), \quad (1)$$

式中:  $N_{APO}$  为投影物镜数值孔径;  $\sigma_{max}$  为照明系统中照明光瞳最大相干因子;  $\beta_{IL}$ 、 $\beta_{PO}$  分别为中继镜组和投影物镜系统的横向放大率。

扫描狭缝通常由 4 个方向相互垂直的刀片组成。根据刀片之间的位置关系, 可将狭缝分为共面

式和非共面式两种结构, 本文以共面式扫描狭缝为对象进行讨论。根据成像理论, 当扫描狭缝刀片位于中继镜组物面时, 其与掩模面呈物像关系, 此时掩模面上的刀口像轮廓最清晰, 宽度也最小。当扫描狭缝刀口相对中继镜组物面存在一定的轴向间隔时, 刀口在掩模面上产生的光学半影将增大。设扫描狭缝刀片相对中继镜组物面的轴向间隔为  $l$ , 刀片厚度为  $d$ , 则刀口在掩模面上产生的半影宽度  $W_s$  为

$$W_s = (2l + d) \cdot \tan \theta \cdot \beta_{IL} + \delta, \quad (2)$$

式中:  $\delta$  为中继镜组引入的系统误差, 较之半影宽度可忽略。对于投影物镜数值孔径为 0.75 的步进扫描投影光刻机, 当最大相干因子  $\sigma_{max}$  为 0.89, 中继镜组和投影物镜的横向放大率  $\beta_{IL} = -3$ 、 $\beta_{PO} = -0.25$  时, 由(1)式可知, 中继镜组物方半孔径角  $\theta$  约为  $30^\circ$ 。由(2)式可知, 通过控制共面扫描狭缝中刀片相对于中继镜组物面的轴向间隔  $l$  和楔形刀片厚度  $d$ , 就可以对掩模面内的刀口半影宽度进行约束。实际曝光过程中, 扫描狭缝机械系统的振动、刀口的热变形, 以及光学系统弥散斑等因素都会影响刀口成像和半影宽度。当掩模面上刀口像超出掩模板光刻单元各边范围时, 硅片上相邻曝光单元也将被曝光。因此, 精确测量和控制刀口半影宽度是保障曝光性能的必要前提。

### 2.3 传统测量方法

传统刀口半影测量方法(即扫描法), 利用能量点探测器对掩模面或硅片面光场区域边缘进行扫描探测, 通常需要对采样小孔直径或采样步长进行合理设定。基于扫描法得到的光场边缘光强分布如图 4 所示。

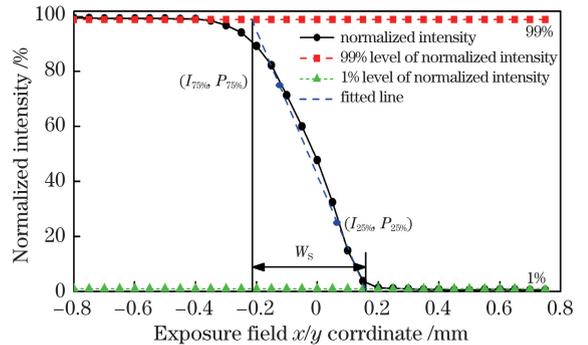


图 4 基于扫描法得到的光场边缘光强分布

Fig. 4 Light intensity distribution at edge of light field based on scanning method

根据归一化光强-坐标分布曲线, 用线性拟合分别求出归一化光强为 75% 和 25% 的点  $I_{75\%}$ 、 $I_{25\%}$  及其对应的视场  $x$  向或  $y$  向坐标  $P_{75\%}$ 、 $P_{25\%}$ , 则对应

的刀口半影宽度为

$$W_s = 1.96 |P_{75\%} - P_{25\%}| \quad (3)$$

由图4可以看出,根据有限离散点经线性拟合得到的归一化光强曲线计算得到的刀口半影宽度存在拟合误差,且测量过程中受采样步长的限制,需采集额外的冗余信息。另外,光强信号的波动会降低现有扫描法的测量重复性。图5所示为不同采样步长下归一化光强-坐标曲线。

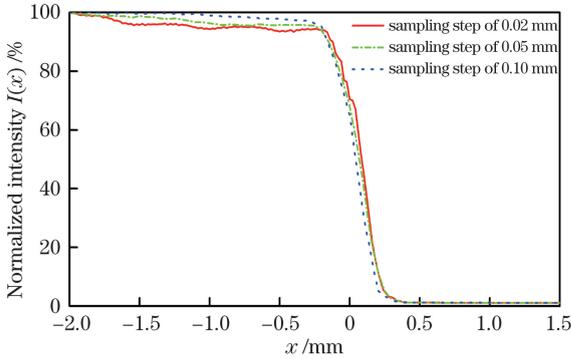


图5 现有扫描法在不同采样步长下的刀口半影测量结果  
Fig. 5 Measurement result of penumbra by using the conventional scanning method with different sampling steps

本文提出的基于光瞳像的成像法度量扫描狭缝刀口半影宽度的测量技术,可对现有扫描方法进行有效改进。

### 3 实 验

#### 3.1 成像检测原理及测量装置

当采用微透镜阵列和傅里叶透镜组作为光刻机照明分系统匀光单元时,利用小孔光阑和傅里叶透镜可将掩模面变换到光瞳面,即将入射照明光束转换为光瞳面照明光瞳分布,如图6所示。

如图6所示, $D_t$ 表示掩模面上梯形照明顶部区

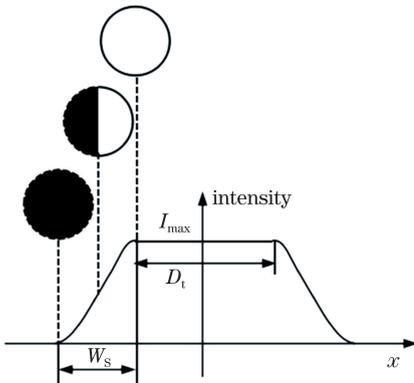


图6 掩模面光强和光瞳面子光瞳分布示意图

Fig. 6 Distribution of intensity of mask surface and sub-pupil of pupil plane

域,由完整照明光瞳叠加形成。由于扫描狭缝刀片的遮挡,梯形照明腰部区域只有部分照明光瞳参与叠加;当照明光瞳恰好消失时,对应的是梯形照明的底部位置。也就是说,在扫描狭缝刀口附近,完整照明光瞳位置与照明光瞳消失位置的最小距离之差即为刀口半影宽度。这就是所提出的基于光瞳像(即成像法)测量扫描狭缝刀口半影宽度的基本原理。

为将掩模面光强转换为光瞳面子光瞳图像,即获取掩模面任一点处的光瞳像,必须先利用小孔光阑作为空间滤波器,再利用傅里叶变换透镜将具有孔径角的会聚光束变换为平行光束,准直后的平行光束被 CCD 接收,所成像即为光瞳像<sup>[18]</sup>,如图7所示。其中, $\theta$ 为中继镜组物面的光束半孔径角。

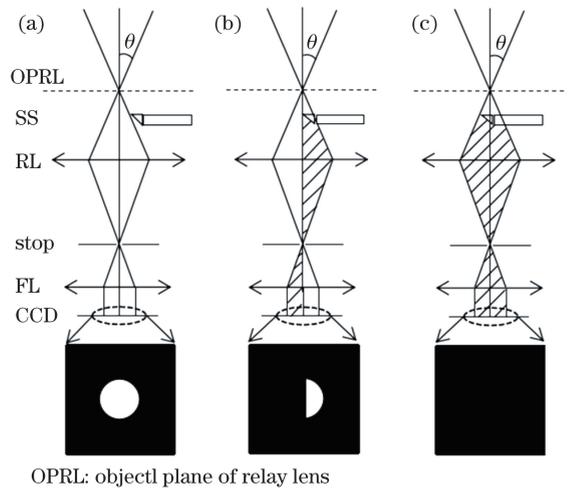


图7 成像法测量刀口半影宽度原理图。

(a)  $P_{100\%}$ ; (b)  $P_{50\%}$ ; (c)  $P_0$

Fig. 7 Principle of blade edge's penumbra width measurement by proposed imaging method. (a)  $P_{100\%}$ ; (b)  $P_{50\%}$ ; (c)  $P_0$

当 CCD 相机由位移台驱动向远离曝光视场中心方向移动时,CCD 最后观测到完整照明光瞳(刀片直边衍射恰好消失)时所对应的坐标位置为  $P_{100\%}$ ; CCD 初始观测到光瞳消失(刀片直边衍射光消失)时所对应的坐标位置为  $P_0$ 。位置坐标  $P_{100\%}$ 、 $P_0$  由位移台自带光栅尺读数给出。则刀口半影宽度为

$$W_s = |P_{100\%} - P_0| \quad (4)$$

可利用阈值法将光瞳像转换为二值图,即以光瞳图像中最大光强值的一半作为阈值,高于该阈值的区域作为光瞳区,以视场中心的光瞳区作为参考。当视场边缘所采光瞳图像的光瞳区与参考光瞳区之比开始小于 100%时,对应于完整光瞳位置  $P_{100\%}$ ; 当所采图像的光瞳区与参考光瞳区之比等于 0 时,对应于光瞳消失位置  $P_0$ 。

根据上述测量原理,搭建了一套成像检测装置(图 8),该装置主要包括倾斜/旋转调整架、 $xyz$  直线位移台、CCD 相机、傅里叶镜头和小孔光阑及相应的软件操控程序系统。

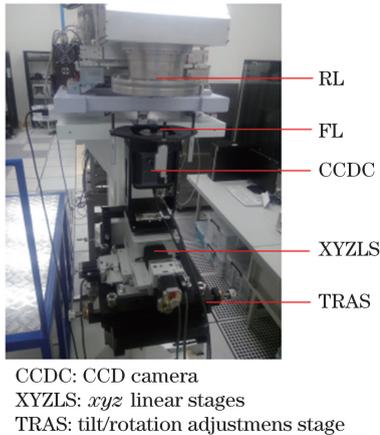


图 8 光瞳成像检测系统结构图

Fig. 8 Diagram of pupil imaging measurement system

该成像检测系统所搭载的深紫外 CCD 相机的像素尺寸为  $16 \mu\text{m}$ , 三维直线位移台的定位精度为  $0.1 \mu\text{m}$ 。测量刀口半影时,位移台驱动 CCD 相机沿着待测扫描狭缝刀口的垂直方向移动,在曝光视场区域内,照明光束经小孔光阑和傅里叶镜头准直形成照明光瞳像,并被 CCD 相机接收。通过 CCD 相机观察光瞳像的完整性,结合位移台  $x$  或  $y$  坐标轴光栅尺的读数,只需确定扫描狭缝刀口附近光瞳像完整和消失所对应的坐标,两坐标距离之差的绝对

值即为待测刀口的半影宽度。由于位移台的定位精度远高于 CCD 像素尺寸,故而可以在视场边缘附近进行迭代寻优,找到最接近的完整光瞳位置和光瞳开始消失的位置。采用光瞳区域占比分析可以极大地降低光束光强波动和光斑位置抖动对位置判断的影响,理想情况下,可分辨出数个像素对光瞳区域占比的影响,即分辨能力可达到像素级,约  $16 \mu\text{m}$ 。另外,通过直线位移台驱动 CCD 相机在掩模面曝光视场内运动,可实现对任意位置处光瞳像的观察、采集。

### 3.2 实验步骤

实验过程中,在每个采样点处分别对扫描狭缝 4 个方向上刀片的刀口半影重复测量 10 次,计算求出 10 次测量的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$ 。以  $3\sigma$  作为测量重复性的定义,对现有扫描法和所提成像法的重复性进行分析和讨论。

共面式扫描狭缝单元主要由置于同一平面的 4 个相互正交的刀片及驱动部件组成。当 4 个刀片形成的狭缝面与光轴垂直时,4 个方向上的刀片在掩模面或硅片面上形成的刀口半影一致,且单个刀片在掩模面或硅片面内的不同位置处形成的刀口半影也一致。测量时,需要对掩模中心位置和整个掩模照明光场内刀口半影的一致性和均匀性进行评估。实验中,掩模面内照明系统非扫描方向( $x$  方向)的最大矩形窗口宽度为  $104 \text{ mm}$ ,扫描方向( $y$  方向)梯形照明顶部宽度为  $28 \text{ mm}$ ,底部宽度为  $44 \text{ mm}$ 。掩模面照明视场内采样点编号及位置坐标如图 9 所示。

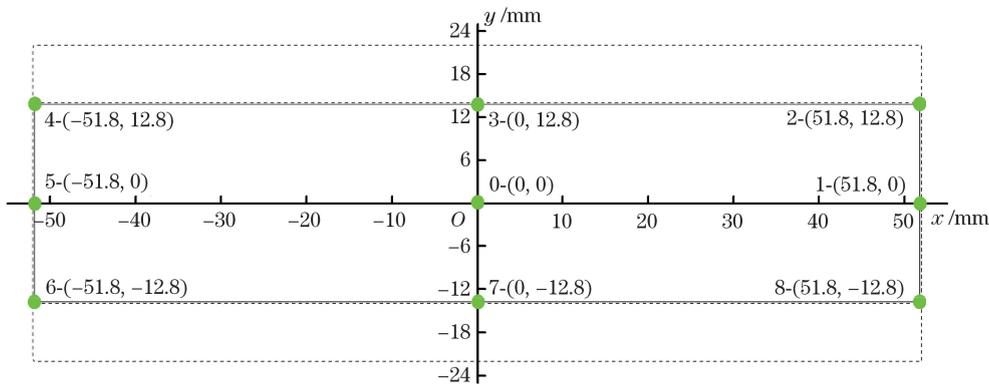


图 9 采样点编号及位置坐标示意图

Fig. 9 Diagram of sampling points' number and coordinate

### 3.3 实验结果

利用现有扫描法和所提成像法对掩模面照明光场内 4 个方向的刀片在上述 9 个采样点处的半影宽度进行测量实验。为保证两种测量方法的可比性,在现有扫描法的能量点探测器中和所提成像法中,小孔光阑的孔径均为  $0.1 \text{ mm}$ 。另外,扫描法采样范围为

$\pm 2.0 \text{ mm}$ ,步长定为  $0.05 \text{ mm}$ 。两种测量方法所得到的刀口半影宽度的测量重复性折线图如图 10 所示。

图 10 表明:现有扫描法在同一方向上 9 个采样点处的测量重复性存在较大波动;所提成像法在同一方向上 9 个采样点的测量重复性一致,且 4 个方向上的重复性也具有很好的一致性;所提成像法的

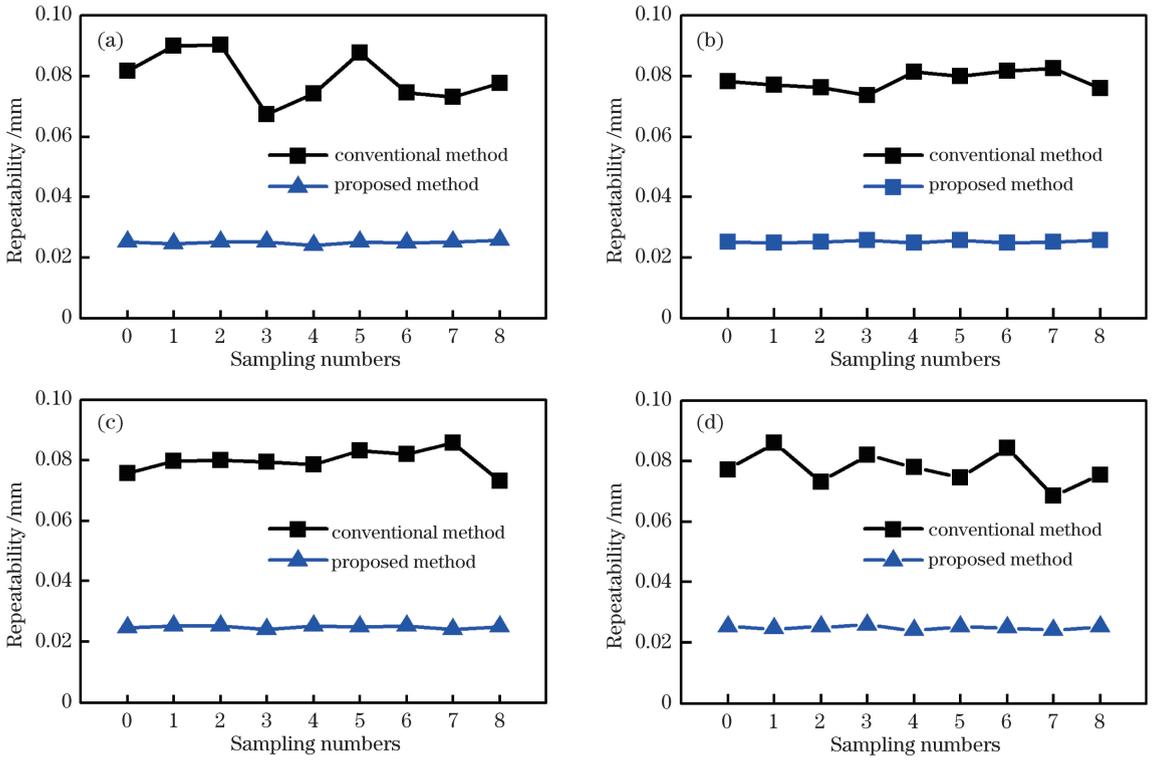


图 10 两种方法的刀口半影宽度的测量重复性。(a)  $x$ -方向;(b)  $x$ +方向;(c)  $y$ -方向;(d)  $y$ +方向  
 Fig. 10 Repeatability of blade edge's penumbra width measured by two methods. (a) In  $x$ - direction;  
 (b) in  $x$ + direction; (c) in  $y$ - direction; (d) in  $y$ + direction

刀口半影测量重复性明显优于现有扫描法的测量重复性。

#### 4 分析与讨论

根据以上实验结果,分别对扫描法和所提成像法的测量重复性进行定量分析。两种测量方法测得的测量重复性的最大值和最小值的统计结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出:现有扫描法的最大和最小测量重复性分别为 0.090 mm 和 0.067 mm;所提成像法的最大和最小测量重复性分别为 0.026 mm 和 0.024 mm。与现有扫描法相比,所提成像法的刀口半影测量重复性提高了 3.46 倍;所提成像法的测量

重复性 0.026 mm 与 CCD 像元尺寸 16  $\mu$ m 接近。图 11 所示为现有扫描法和所提成像法在测量刀口半影过程中的采样路径示意图,可以看出,现有扫描法为提高拟合精度,需减小采样步长,从而导致冗余数据过多。然而,采样步长不能无限减小。如图 5 所示,当采样步长减小到一定程度时,归一化光强-坐标曲线受光强波动的影响显著,导致测量重复性降低;而所提成像法通过图像阈值分割判断光瞳区域,只需在刀口半影附近进行迭代查找目标位置,即可快速准确得到半影宽度。根据光瞳区域判断刀口半影宽度,可有效避免光强波动对测量结果的影响,测量重复性较现有扫描法得到明显提高。

表 1 两种方法下的刀口半影测量重复性

Table 1 Repeatability of blade edge's penumbra width measured by two methods mm

Direction	Conventional method				Proposed method			
	Mean		Repeatability		Mean		Repeatability	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
$x$ -	0.409	0.355	0.090	0.067	0.484	0.454	0.026	0.024
$x$ +	0.401	0.359	0.083	0.074	0.488	0.452	0.026	0.025
$y$ -	0.410	0.381	0.086	0.073	0.492	0.468	0.025	0.024
$y$ +	0.380	0.340	0.086	0.069	0.474	0.454	0.026	0.024

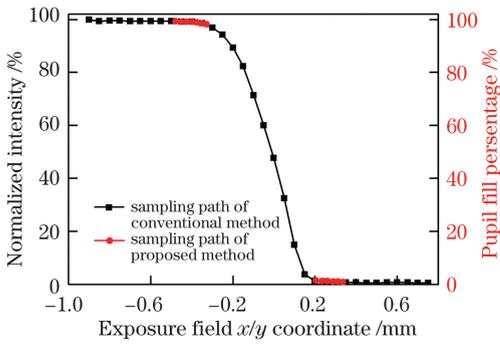


图 11 两种刀口半影测量方法的采样路径

Fig. 11 Sampling paths of two methods for measuring blade edge's penumbra

所提成像是基于光瞳像的,即在掩膜面上实际参与掩模成像光束的照明光瞳光强分布,实验发现,所提成像法的刀口半影宽度测量精度主要受孔径光阑和 CCD 像素尺寸的限制。当位移台定位精度高于 CCD 传感器像元尺寸时,成像法测量精度主要取决于感光元件的像素尺寸。鉴于较小的像素易引入噪声,且硬件价格昂贵等因素,可通过图像局部放大或图像超分辨处理等软件手段来提高成像法测量刀口半影宽度的准确度。

## 5 结 论

分析了扫描狭缝刀片半影的成因,提出了基于光瞳像的扫描狭缝刀口半影宽度检测技术。搭建了一套成像半影检测装置,对数值孔径为 0.75 的 90 nm 节点光刻机照明系统掩模面内扫描狭缝 4 个方向上的刀口半影进行了测量。实验结果表明:在相同的实验条件下,基于所提成像法的刀口半影宽度测量重复性达到 0.026 mm,较现有扫描法提高了 3.46 倍。基于图像阈值分割方法可有效降低光强波动对测量的影响。所提方法具有方便快捷、实时直观等优点,并可用于高数值孔径(1.35)光刻机照明分系统光学半影参数的测量。

## 参 考 文 献

[1] Li M X, Wang L, Dong L H. Development of a novel optical variable attenuator in lithography exposure system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0103002.  
李美萱, 王丽, 董连和. 光刻曝光系统中新型光可变衰减器的研制 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0103002.

[2] Li Z Z, Li S K, Wang X Z. Source and mask optimization using stochastic parallel gradient descent algorithm in optical lithography [J]. Acta Optica

Sinica, 2014, 34(9): 0911002.

李兆泽, 李思坤, 王向朝. 基于随机并行梯度速降算法的光刻机光源与掩模联合优化方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911002.

[3] Yang C X, Li S K, Wang X Z. Source mask optimization based on dynamic fitness function [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0111006.

杨朝兴, 李思坤, 王向朝. 基于动态适应度函数的光源掩模优化方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0111006.

[4] Zhu B E, Wang X Z, Li S K, et al. Aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0112002.

诸波尔, 王向朝, 李思坤, 等. 超大数值孔径光刻机投影物镜波像差检测方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0112002.

[5] 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.

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.

[6] Yao C C, Gong Y. Research on temperature distribution of deep ultraviolet lithographic projection objective [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0516001.

姚长呈, 巩岩. 深紫外光刻投影物镜温度特性研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0516001.

[7] Cheng W L, Zhang F, Lin D L, et al. Multi-degree-of-freedom uniformity correction method of illumination system in lithography machine [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1022004.

程伟林, 张方, 林栋梁, 等. 光刻机照明系统的多自由度均匀性校正方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1022004.

[8] Li J L. Motion model of dual-stage in ArF immersion lithography [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 2-21.

李金龙. ArF 浸没光刻双工件台运动模型研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 2-21.

[9] Lin D L, Zhang F, Huang H J. Research of scanning slit with minimal penumbra of blade's edge in lithography [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(5): 1046-1053.

林栋梁, 张方, 黄惠杰. 刀口半影最小化的光刻机扫描狭缝研究 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(5): 1046-1053.

[10] Xie C K, Chen M, Yang B X, et al. Development and performance testing of pulsed excimer laser

- energy detector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102006.  
谢承科, 陈明, 杨宝喜, 等. 准分子激光脉冲能量探测器的设计与性能测试[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102006.
- [11] Wong A K K. Resolution enhancement techniques in optical lithography [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001: 31-70.
- [12] Cheng W L, Zhang F, Lin D L, *et al.* High precision correction method of illumination field uniformity for photolithography illumination system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0722001.  
程伟林, 张方, 林栋梁, 等. 光刻机照明光场均匀性高精度校正方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0722001.
- [13] Gan Y, Zhang F, Zhu S Y, *et al.* Evaluation algorithm of pupil characteristic parameters in lithography illumination system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304007.  
甘雨, 张方, 朱思羽, 等. 光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304007.
- [14] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. 7th ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999: 116-141.
- [15] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 57-74.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 57-74.
- [16] Chen M, Wang Y, Zeng A J, *et al.* Flat Gauss illumination for the step-and-scan lithographic system [J]. Optics Communications, 2016, 372: 201-209.
- [17] Chen M, Chen L Q, Zeng A J, *et al.* Generation of trapezoidal illumination for the step-and-scan lithographic system [J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6820-6826.
- [18] Cai Y M, Wang X Z, Bu Y, *et al.* Optical design of Fourier transform lens for measurement of illumination pupil of lithography tools [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0416001.  
蔡燕民, 王向朝, 步扬, 等. 光刻机照明光瞳测量用傅里叶变换物镜光学设计[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0416001.