

# 光刻机照明系统的多自由度均匀性校正方法

程伟林<sup>1,2\*\*</sup>, 张方<sup>1</sup>, 林栋梁<sup>1,2</sup>, 曾爱军<sup>1,2</sup>, 杨宝喜<sup>1,2</sup>, 黄惠杰<sup>1,2\*</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, 北京 100049

**摘要** 提出了一种光刻机照明系统的多自由度均匀性校正方法。当照明光瞳的部分相干因子发生变化时, 该方法的校正手指只需整体在光轴方向进行微调就能使照明光场的均匀性满足要求。仿真分析了校正手指的三维空间移动对照明光场均匀性的影响, 并验证了该方法的高效性。

**关键词** 光学设计; 光刻机; 照明系统; 多自由度均匀性校正

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1022004

## Multi-Degree-of-Freedom Uniformity Correction Method of Illumination System in Lithography Machine

Cheng Weilin<sup>1,2\*\*</sup>, Zhang Fang<sup>1</sup>, Lin Dongliang<sup>1,2</sup>, Zeng Aijun<sup>1,2</sup>, Yang Baoxi<sup>1,2</sup>, Huang Huijie<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A multi-degree-of-freedom uniformity correction method of the illumination system in a lithography machine is proposed. When the partial coherence factor of the illumination pupil changes, the fine tuning of the whole correction fingers along the direction of the optical axis in the proposed method is enough to make the light illumination uniformity meet the requirements. The effect of the three-dimensional spatial movement of correction fingers on the light illumination uniformity is analyzed by simulation, and the high efficiency of this method is verified.

**Key words** optical design; lithography machine; illumination system; multi-degree-of-freedom uniformity correction

**OCIS codes** 220.3740; 220.1230; 200.4880

## 1 引 言

光刻机是集成电路加工的关键设备之一, 照明系统是光刻机的一个重要组成部分, 其主要作用是提供特定分布的照明光场、监控激光脉冲能量、控制照明光瞳等, 以保证投影物镜将掩模图形高质量地成像至硅片上<sup>[1]</sup>。在步进扫描光刻机中, 硅片内任一点的曝光剂量是照明光场在扫描方向上的积分, 照明光场在扫描方向的积分均匀性是影响特征尺寸均匀性(CDU)的一个重要因素<sup>[2-4]</sup>。随着集成电路工艺尺寸的不断减小, 其对照明积分均匀性的要求提高, 如 90 nm 节点的光刻机要求照明积分的均匀

性小于 0.60%, 65 nm 及 45 nm 节点的光刻机要求照明积分的均匀性小于 0.30%<sup>[5-10]</sup>。影响光刻机的照明积分均匀性的因素有很多, 如透镜的加工镀膜、整机集成装调等。随着透镜辐照时间的增长, 透镜材料和膜层的透过率均匀性会恶化, 照明积分的均匀性也会变差。因此, 光刻机中需要有特定装置来校正照明光场的积分均匀性。

目前, 110 nm 节点的光刻机采用静态灰度滤波法<sup>[11]</sup>校正照明光场的积分均匀性, 该方法在校正板表面镀一层具有特定透过率分布的薄膜, 实现方式简单, 但只能针对特定强度分布的照明光场进行校正, 缺乏灵活性。90 nm 节点的光刻机采用动态灰度滤

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-05-18; 录用日期: 2018-05-21

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0110600)、上海市国际科技合作基金项目(16520710500)、上海市科技人才计划项目(17YF1429500)、中国科学院青年创新促进会资助

\* E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn; \*\* E-mail: chengweilin@siom.ac.cn

波法<sup>[12-13]</sup>校正照明光场的积分均匀性,该方法包含两块镀有相反透过率分布的校正板,通过改变两块校正板的相对位置来产生不同的透过率分布,这虽然在一定程度上提高了校正范围,但校正能力有限。65 nm 及 45 nm 节点的光刻机均通过手指阵列法校正照明光场的积分均匀性,该方法包含多个矩形平板结构的校正手指,每个校正手指均可独立地沿扫描方向伸入照明光场,其伸入照明光场的距离决定了照明光场的积分均匀性<sup>[14]</sup>。为了得到每个校正手指伸入照明光场的距离,需通过标定得到每个校正手指对照明光场的作用函数,该函数与照明模式及部分相干因子相关。在实际应用过程中,部分相干因子在最大值与最小值之间连续可调,标定照明光瞳所有部分相干因子的作用函数的工作量极大,这将大大降低使用效率。本文提出了一种应用于光刻机照明系统的多自由度均匀性校正方法,该方法通过调整校正手指在光轴方向的位置来提高照明光场均匀性的校正效率。

## 2 多自由度照明光场积分均匀性的校正原理

### 2.1 多自由度照明光场积分均匀性的校正结构

图 1(a)所示为光刻机照明系统的原理示意图。

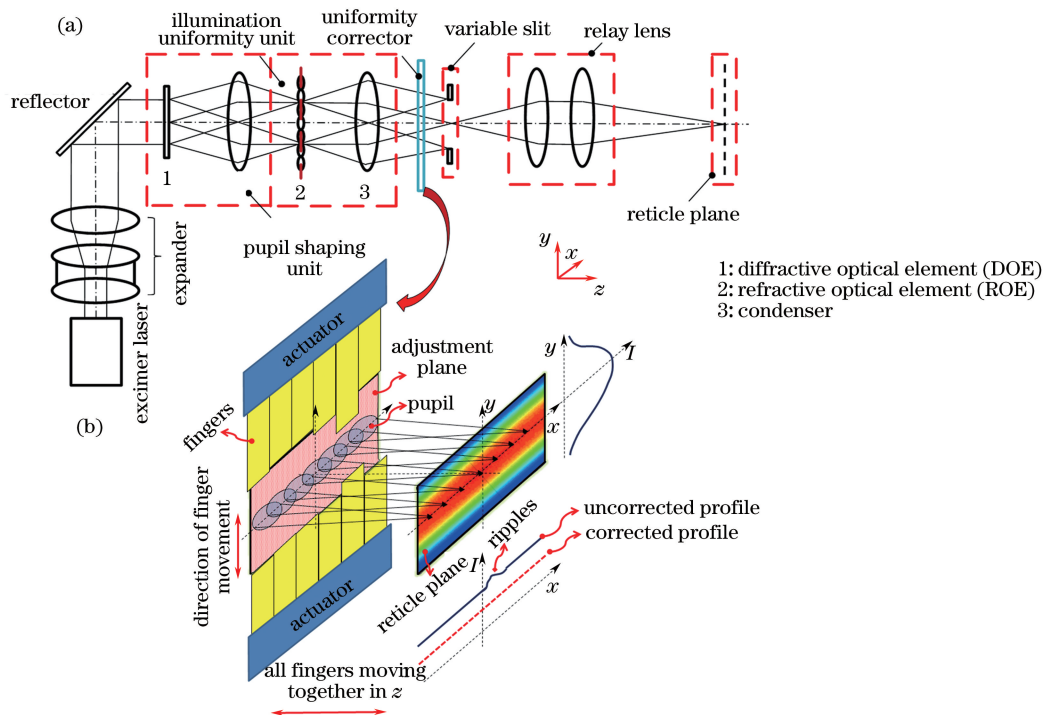


图 1 包含多自由度照明光场的积分均匀性校正装置的照明系统简图。(a)光刻机照明系统原理示意图;(b)多自由度积分均匀性校正原理图

Fig. 1 Schematic of illumination system comprising multi-degree-of-freedom integrated uniformity correction unit. (a) Schematic of illumination system in lithography machine; (b) schematic of multi-degree-of-freedom uniformity correction

准分子激光器发出的脉冲光束经过扩束镜组后入射到光瞳整形单元中,光瞳整形单元主要包括衍射光学元件、变焦准直镜组和变倍锥形镜组,光瞳整形单元将入射光束整形为不同的照明模式,如环形、二极、四极等照明模式等<sup>[15]</sup>。照明均匀化单元位于光瞳整形单元之后,由微透镜阵列和聚光镜组组成,并在聚光镜组后焦面上形成平顶高斯照明光场。平顶高斯照明光场在扫描方向(y 方向)为平顶高斯分布,在非扫描方向(x 方向)为均匀分布。可变狭缝刀口面与聚光镜组在后焦面重合,照明镜组作为中继透镜将可变狭缝刀口面成像到掩模面上。均匀性校正装置放置于聚光镜组与扫描狭缝之间,相对聚光镜组后焦面的离焦量为  $\Delta z$ ,如图 1(b)所示。均匀性校正装置中的校正手指分为两组,对称排布于照明光场的 y 方向,每个校正手指均可独立地沿 y 方向伸入或抽出照明光场,所有校正手指可一起在光轴方向(z 方向)运动,构成多自由度的照明光场均匀性校正装置。

聚光镜组后焦面照明光场内的任一视场点 A 对应校正面内光瞳形状的区域,如图 2 所示,根据几何关系可得到

$$P_{out} = 2\Delta z \times \tan U_{out}, \quad (1)$$

$$U_{out} = \sin^{-1}(N_{Apo} \times \sigma_{out}/M_o), \quad (2)$$

式中  $P_{out}$  为光瞳外环直径,  $U_{out}$  为孔径角,  $\sigma_{out}$  为外部分相干因子,  $M$  为照明镜组的放大倍率,  $N_{Apo}$  为投影物镜的物方数值孔径。

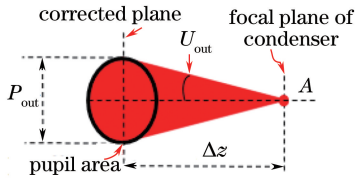


图 2 掩模面内任一点的光强与校正面光瞳区域内光强的关系  
Fig. 2 Relationship between light intensity at any point of reticle plane and that in pupil region at corrected plane

### 2.2 校正手指 $xy$ 平面的变化对照明均匀性的影响

假设照明光场内任一视场点  $A$  的未校正的光强为  $I_{x,y}$ , 则掩模面内未校正照明光场沿扫描方向积分后的光强分布  $I_u$  为

$$I_u = I(x) = \int_{-f/2}^{f/2} I(x,y) dy, \quad (3)$$

式中  $f$  为掩模面照明光场  $Y$  方向的宽度。

未校正照明光场的积分均匀性为

$$U_{uncorrected} = \frac{I_{u_{max}} - I_{u_{min}}}{I_{u_{max}} + I_{u_{min}}}, \quad (4)$$

式中  $I_{u_{max}}$ 、 $I_{u_{min}}$  分别为未校正照明光场的积分光强的最大值和最小值。

$A$  点在校正面内扩散为光瞳形状的区域, 因此该区域内任意一点的光强为

$$I_p = \frac{4I_{x,y}}{\pi \times P_{out}^2}. \quad (5)$$

当宽度为  $W_1$  的校正手指伸入照明光场边缘时, 如图 3(a) 所示, 光瞳形状区域被遮挡的部分为区域  $A$ , 校正手指在  $y$  向移动时遮挡的光强为

$$I_p^{s,y} = \int_{Zone A} \frac{4I_{x,y}}{\pi \times P_{out}^2} dS, \quad (6)$$

式中  $S$  为光瞳形状区域的面积。

当校正手指宽度由  $W_1$  增大为  $W_2$  时, 如图 3(b) 所示, 其遮挡光瞳的部分为区域  $A$ 、区域  $B$  及区域  $C$  之和, 其中区域  $A$  为校正手指在  $x$  方向的宽度变化前遮挡的区域, 因此校正手指在  $x$  方向的遮挡光强增量为

$$I_p^{s,x} = \int_{Zone B+Zone C} \frac{4I_{x,y}}{\pi \times P_{out}^2} dS. \quad (7)$$

由(6)、(7)式可知, 校正手指在  $xy$  面内的变化引起的视场点  $A$  的光强改变为

$$I_{x,y}^c = I_{x,y} - (I_p^{s,x} + I_p^{s,y}) = \int_{Zone A+Zone B+Zone C} \frac{4I_{x,y}}{\pi \times P_{out}^2} dS. \quad (8)$$

因此校正后照明光场积分的均匀分布  $I^c$  为

$$I^c = \int_{-f/2}^{f/2} I_{x,y}^c dy. \quad (9)$$

校正后照明光场的积分均匀性为

$$U_{corrected} = \frac{I_{max}^c - I_{min}^c}{I_{max}^c + I_{min}^c}, \quad (10)$$

式中  $I_{max}^c$ 、 $I_{min}^c$  分别为校正后照明光场积分光强的最大值和最小值。

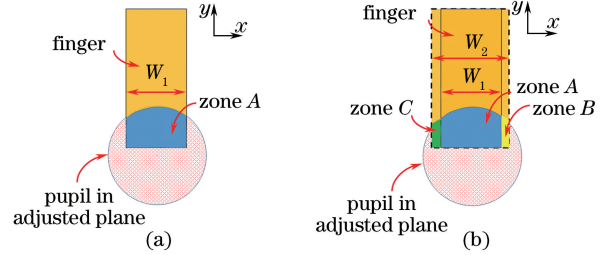


图 3 在  $xy$  平面变化的校正手指与光瞳区域作用的示意图。(a)校正手指沿  $y$  向移动;(b)改变校正手指宽度

Fig. 3 Schematic of interaction between correction fingers with change in  $xy$  plane and pupil region. (a) Correction fingers moving along  $y$  direction; (b) adjusting correction finger width

### 2.3 校正手指离焦量对照明均匀性的影响

图 4 所示为校正手指离焦量的变化对照明均匀性的影响示意图。校正手指所处的校正面  $B$  相对于聚光镜组后焦面的离焦量为  $\Delta z$ , 焦面内任一视场点  $A$  在校正面内均扩散为光瞳形状的区域, 如图 4(c) 所示的 pupil\_p1 区域。视场点  $A$  及扩散在校正面内的光瞳区域构成了一个光锥(到达视场点的所有光线的轨迹), 如图 4(b) 所示。当校正手指的离焦量增大, 即由  $\Delta z$  增大为  $\Delta z'$  时, 校正手指的作用面由  $B$  面变为  $B'$  面。在  $B'$  面内, 视场点  $A$  扩散为 pupil\_p2 光瞳形状区域, 如图 4(c) 中所示, 由于  $\Delta z' > \Delta z$ , 因此 pupil\_p2 区域的面积大于 pupil\_p1 区域的, 即

$$S_{pupil\_p2} > S_{pupil\_p1}. \quad (11)$$

当校正手指的离焦量为  $\Delta z$  时, 校正手指在  $B$  面内遮挡光瞳的区域为区域  $A$ ; 当校正手指的离焦为  $\Delta z'$  时, 校正手指在  $B'$  面内遮挡光瞳的区域为区域  $A$  + 区域  $D$ , 虽然校正手指伸入光场的距离没有变化, 但离焦量的增大使得校正手指在  $B'$  面遮挡光瞳的区域增大了。

对图 4(a) 用光线追迹的方法进行分析。当校正手指位于校正面  $B$  时, 在光锥中, 大于锥角  $U_1$  的光线会被校正手指遮挡而无法到达  $A$  点; 当校正手指位于校正面  $B'$  时, 大于锥角  $U_2$  的光线会被校

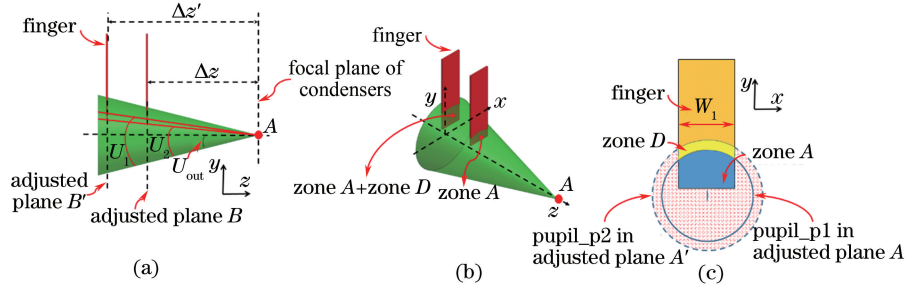


图 4 具有不同离焦量的校正手指与光瞳区域作用的示意图。(a)校正手指与光瞳在  $yz$  平面的作用;(b)校正手指与光瞳作用的轴测图;(c)校正手指与光瞳在  $xy$  平面的作用

Fig. 4 Schematic of interaction between correction fingers with different defocusing distances and pupil region. (a) Interaction of correction fingers and pupil in  $yz$  plane; (b) interaction of correction fingers and pupil in axonometric projection; (c) interaction of correction fingers and pupil in  $xy$  plane

正手指遮挡而无法到达  $A$  点,由图 4(a)不难看出,  $U_1 > U_2$ 。故校正手指离焦量的变化会对视场点  $A$  的光强产生影响,进而影响照明光场在  $y$  方向的积分沿  $x$  方向的分布均匀性(照明光场的积分均匀性)。

为了更清楚地了解校正手指的离焦量变化对光瞳能量的遮挡效果,依据图 4(c)建立几何模型,如图 5 所示,其中  $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $J$ 、 $K$  为交点, $O$  为原点。

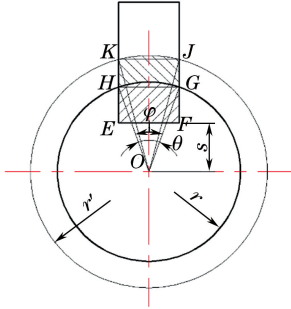


图 5 校正手指离焦量对遮挡光瞳区域影响的计算模型  
Fig. 5 Computational model for describing influence of correction finger defocusing distance on shaded pupil region

假设离焦量为  $\Delta z$  的校正面内光瞳半径为  $r$ ,离焦量为  $\Delta z'$  的校正面内光瞳半径为  $r'$ ,校正手指前端距离光瞳中心的距离为  $s$ ,根据几何关系可知

$$r = \Delta z \times \tan U_{\text{out}}, \quad (12)$$

$$r' = \Delta z' \times \tan U_{\text{out}}. \quad (13)$$

校正手指在离焦面  $B$  遮挡光瞳的区域  $A$  的面积可根据图 5 所示的几何关系计算得到,即

$$S_{\text{Zone A}} = S_{\angle OHG} - S_{\triangle OHG} + S_{\square EFGH} = \frac{r^2 \theta}{2} - \frac{r^2 \sin \theta}{2} + W_1 \times (r - s), \quad (14)$$

式中  $\theta$  为图 5 中扇形区域  $HOG$  的扇角。

校正手指在离焦面  $B'$  遮挡光瞳的区域  $A + D$  的面积为

$$S_{\text{Zone A}} + S_{\text{Zone D}} = S_{\angle OKJ} - S_{\triangle OKJ} + S_{\square EFKJ} = \frac{r'^2 \varphi}{2} - \frac{r'^2 \sin \varphi}{2} + W_1 \times (r' - s), \quad (15)$$

式中  $\varphi$  为图 5 中扇形区域  $KOJ$  的扇角。

校正手指在离焦面  $B$  遮挡光瞳后视场点  $A$  的光强  $I_{x,y}^{\text{cc}}$  为

$$I_{x,y}^{\text{cc}} = I_{x,y} - \frac{I_{x,y}}{\pi r^2} \times S_{\text{Zone A}}. \quad (16)$$

校正手指在离焦面  $B'$  遮挡光瞳后视场点  $A$  的光强  $I_{x,y}^{\text{cc}'}$  为

$$I_{x,y}^{\text{cc}'} = I_{x,y} - \frac{I_{x,y}}{\pi r'^2} (S_{\text{Zone A}} + S_{\text{Zone D}}). \quad (17)$$

将(12)~(15)式分别代入(16)、(17)式中得到

$$I_{x,y}^{\text{cc}} = I_{x,y} - \frac{I_{x,y}}{\pi (\Delta z \tan U_{\text{out}})^2} \left[ \frac{(\Delta z \tan U_{\text{out}})^2 \theta}{2} - \frac{(\Delta z \tan U_{\text{out}})^2 \sin \theta}{2} + W_1 (\Delta z \tan U_{\text{out}} - s) \right], \quad (18)$$

$$I_{x,y}^{\text{cc}'} = I_{x,y} - \frac{I_{x,y}}{\pi (\Delta z' \tan U_{\text{out}})^2} \left[ \frac{(\Delta z' \tan U_{\text{out}})^2 \varphi}{2} - \frac{(\Delta z' \tan U_{\text{out}})^2 \sin \varphi}{2} + W_1 (\Delta z' \tan U_{\text{out}} - s) \right]. \quad (19)$$

当校正手指的离焦量由  $\Delta z$  增大为  $\Delta z'$  时,视场点  $A$  的光强改变为

$$\Delta I = I_{x,y}^{\text{cc}'} - I_{x,y}^{\text{cc}} = \frac{I_{x,y}}{\pi (\tan U_{\text{out}})^2} \left[ \frac{(\Delta z \tan U_{\text{out}})^2 \theta / 2 - (\Delta z \tan U_{\text{out}})^2 \sin \theta / 2 + W_1 (\Delta z \tan U_{\text{out}} - s)}{\Delta z^2} - \frac{(\Delta z' \tan U_{\text{out}})^2 \varphi / 2 - (\Delta z' \tan U_{\text{out}})^2 \sin \varphi / 2 + W_1 (\Delta z' \tan U_{\text{out}} - s)}{\Delta z'^2} \right]$$

$$\left. \frac{(\Delta z' \tan U_{\text{out}})^2 \varphi / 2 - (\Delta z' \tan U_{\text{out}})^2 \sin \varphi / 2 + W_1 (\Delta z' \tan U_{\text{out}} - s)}{\Delta z'^2} \right]。 \quad (20)$$

当  $\Delta I$  为正时,  $\Delta z$  增大为  $\Delta z'$  后遮挡视场点  $A$  的光强变小, 反之亦然。因此通过校正手指离焦距的变化校正照明光场的积分均匀性为

$$I^{\text{cc}} = \int_{-f/2}^{f/2} I_{x,y}^{\text{cc}'} dy, \quad (21)$$

$$U_{\text{corrected}} = \frac{I_{\text{max}}^{\text{cc}} - I_{\text{min}}^{\text{cc}}}{I_{\text{max}}^{\text{cc}} + I_{\text{min}}^{\text{cc}}}, \quad (22)$$

式中  $U_{\text{corrected}}$  为校正后照明光场的积分均匀性,  $I_{\text{max}}^{\text{cc}}$ 、 $I_{\text{min}}^{\text{cc}}$  分别为校正照明光场积分光强的最大值和最小值。

### 3 多自由度均匀性校正的仿真研究

以 ArF-65 nm 节点光刻机的照明系统为仿真模型, 采用常用的传统照明和环形照明模式进行仿真, 其中传统照明模式的部分相干因子满足  $0.15 \leq \sigma \leq 0.93$ , 环形照明模式中内、外部分相干因子满足  $0.36 \leq \sigma_{\text{out}} \leq 0.96$ ,  $\min(\sigma_{\text{out}} - \sigma_{\text{in}}) \leq 0.2$ 。在掩模面形成的照明光场尺寸为  $104 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ , 投影物镜的像方数值孔径为 0.93, 其缩放比率为  $-0.25$ , 照明镜组的缩放比率为  $-1$ , 要求照明光场的积分均匀性不大于 0.3%。使用 LightTools<sup>R</sup> 软件进行了仿真验证, 其仿真模型如图 6 所示。

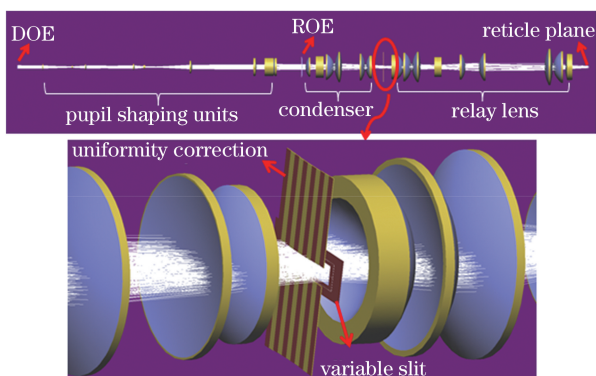


图 6 65 nm 节点光刻机照明系统的仿真模型

Fig. 6 Simulation model for 65 nm node illumination system in lithography machine

校正手指的排布及其与照明光场的位置关系如图 7 所示, 校正手指对称排布于照明光场扫描方向的两侧。当校正手指的宽度不同时, 校正照明光场需要校正手指的个数也不同, 图 8 所示为校正手指宽度与校正后照明积分均匀性之间的关系。由图 8 可知, 照明积分的均匀性随着校正手指宽度的减小线性降低, 当照明积分的均匀性为 0.3% 时, 对应的校正手指宽度为 9.5 mm。若设计校正手指的宽度

大于 9.5 mm, 校正后的照明积分均匀性无法满足指标 ( $\leq 0.3\%$ ); 若校正手指宽度为 4 mm, 虽然校正后的照明积分均匀性优于 0.2%, 但单侧校正手指的数量达到 27 个, 单个校正手指的驱动电机的外径厚度需小于 4 mm。目前商业化的电机很难满足这一要求, 因此设计校正手指的宽度为 9 mm, 则照明光场扫描方向单边校正手指的个数为 11, 总个数为 22。

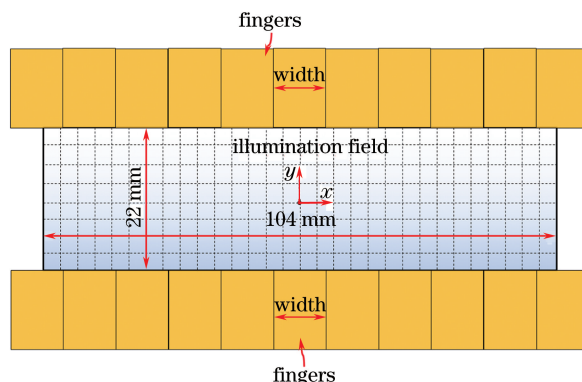


图 7 手指排布形式

Fig. 7 Layout of fingers

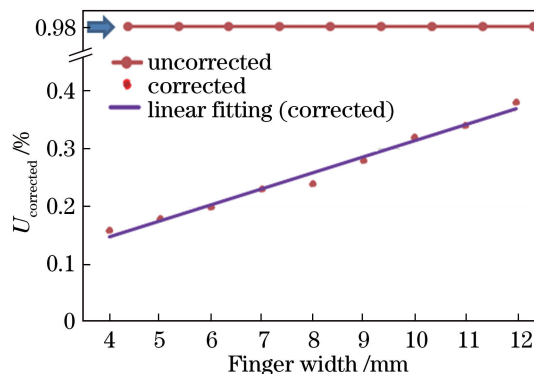


图 8 校正手指宽度与其对应的校正后照明积分均匀性的关系

Fig. 8 Relationship between correction finger width and corresponding integrated illumination uniformity after correction

图 9 所示为传统照明与环形照明小相干因子情况下, 校正手指  $y$  向移动得到的校正后的照明积分均匀性分布, 校正手指的离焦距为 25 mm, 校正后积分均匀性分别为 0.29% (传统照明小相干因子) 和 0.262% (环形照明小相干因子), 均小于 0.3%, 满足照明光场积分均匀性的要求。当照明光瞳中的部分相干因子增大, 校正手指宽度、校正手指伸入照明光场的距离及离焦距均保持不变时, 校正后照明积分的均匀性分布如图 10 所示,

校正手指的离焦量为 25 mm,校正后积分均匀性分别为 0.63%(传统照明小相干因子)和 0.54%(环形照明小相干因子),均大于 0.3%,不满足照明光场积分均匀性的要求。这是因为当相干因子增大后,校正面内光瞳区域增大,单位面积的光强减小,校正手指遮挡区域的能量减小,照明光场的积分均匀性降低。图 11 所示为通过调节校正手指的离焦量得到的校正后的照明积分均匀性分布,其中传统照明  $\sigma = 0.93$  情况下校正手指的离焦

量为 4.6 mm,校正后积分均匀性为 0.293%,满足照明光场积分均匀性的要求;环形照明  $\sigma_{in} = 0.76$ 、 $\sigma_{out} = 0.96$  情况下校正手指的离焦量为 13 mm,校正后积分均匀性为 0.27%,满足照明光场积分均匀性的要求。这样避免了标定不同部分相干因子情况下每个校正手指的校正函数,且不需调整校正手指伸入照明光场的距离,大大提高了校正效率,验证了该方法的高效性。多自由均匀性校正方法的仿真结果见表 1。

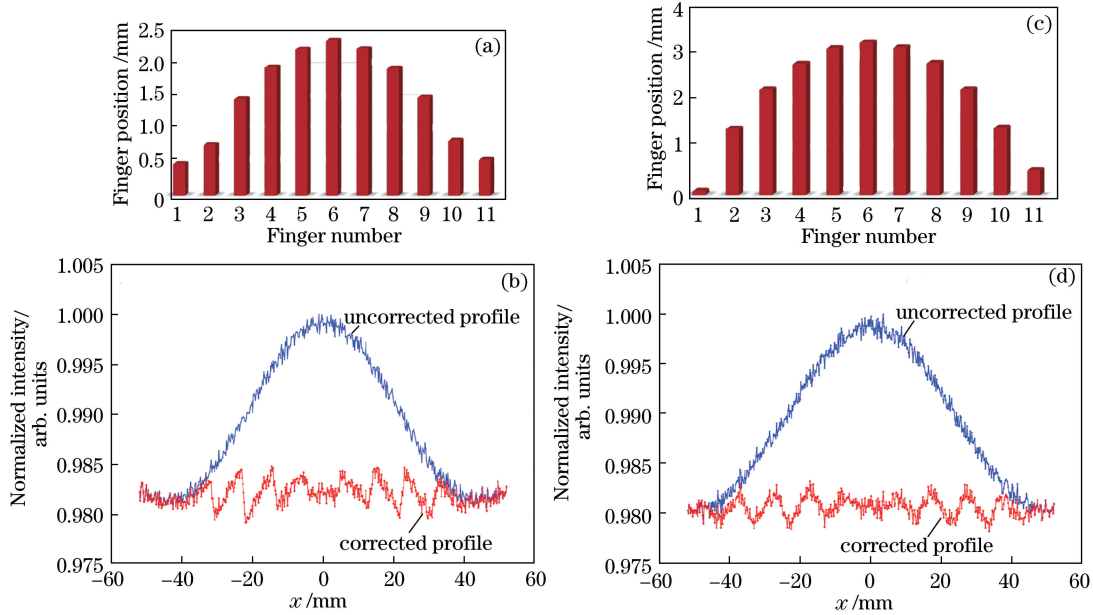


图 9 校正手指位置及其沿  $y$  方向移动得到的校正后的积分均匀性曲线。传统照明模式  $\sigma = 0.15$  情况下(a)校正手指的位置和(b)校正后的积分均匀性曲线;环形照明模式  $\sigma_{in} = 0.16$ 、 $\sigma_{out} = 0.36$  情况下(c)校正手指的位置和(d)校正后的积分均匀性曲线

Fig. 9 Correction finger positions and integrated uniformity curve obtained after correction by finger movement alone  $y$  direction. (a) Correction finger positions and (b) corrected integrated uniformity curves under conventional illumination mode with  $\sigma = 0.15$ ; (c) correction finger positions and (d) corrected integrated uniformity curves under annular illumination mode with  $\sigma_{in} = 0.16$  and  $\sigma_{out} = 0.36$

表 1 多自由均匀性校正方法的仿真结果

Table 1 Simulation results by multi-degree-of-freedom uniformity correction method

Condition	$\Delta z$ /mm	$U_{corrected}$	Satisfaction evaluation
Conventional illumination	$\sigma = 0.15$	25	0.29%
	$\sigma = 0.93$	25	0.63%
		4.6	0.293%
Annular illumination	$\sigma_{in} = 0.16$	25	0.262%
	$\sigma_{out} = 0.36$		
	$\sigma_{in} = 0.76$	25	0.54%
	$\sigma_{out} = 0.96$	13	0.27%

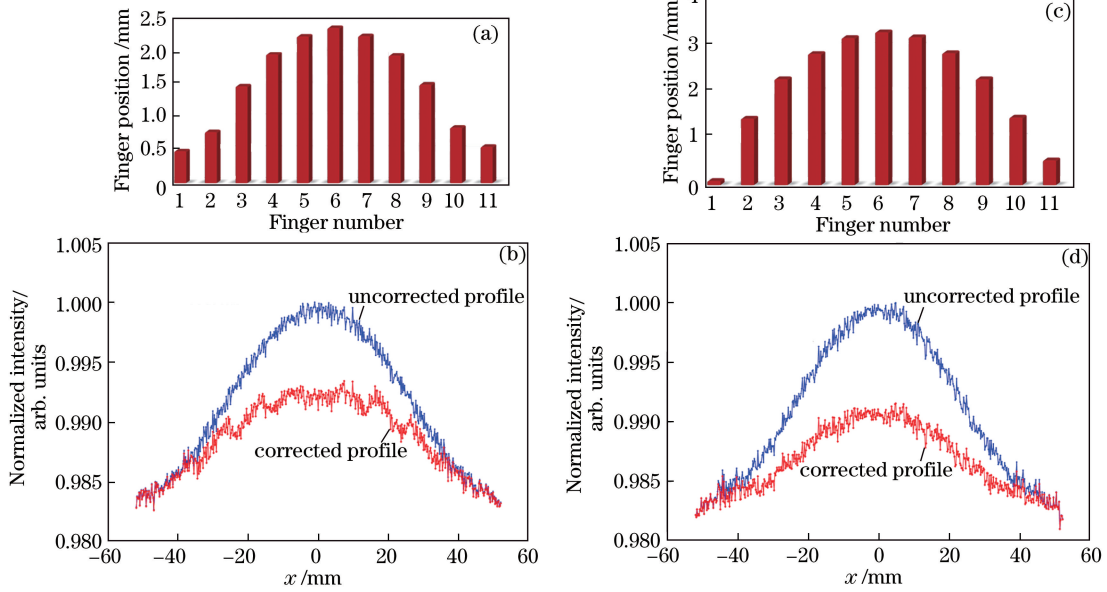


图 10 保持校正手指的宽度、伸入照明光场的距离及离焦量不变,照明参数为大部分相干因子时校正手指的位置及校正后的积分均匀性曲线。传统照明模式  $\sigma = 0.93$  情况下(a)校正手指的位置和(b)校正后的积分均匀性曲线;环形照明模式  $\sigma_{in} = 0.76, \sigma_{out} = 0.96$  情况下(c)校正手指的位置和(d)校正后的积分均匀性曲线

Fig. 10 Correction finger positions and integrated uniformity curves when illumination parameter is most of coherence factor, and correction finger width, distance from illumination light and defocusing distance are kept constant. (a) Correction finger positions and (b) corrected integrated uniformity curves under conventional illumination mode with  $\sigma = 0.93$ ; (c) correction finger positions and (d) corrected integrated uniformity curves under annular illumination mode with  $\sigma_{in} = 0.76$  and  $\sigma_{out} = 0.96$

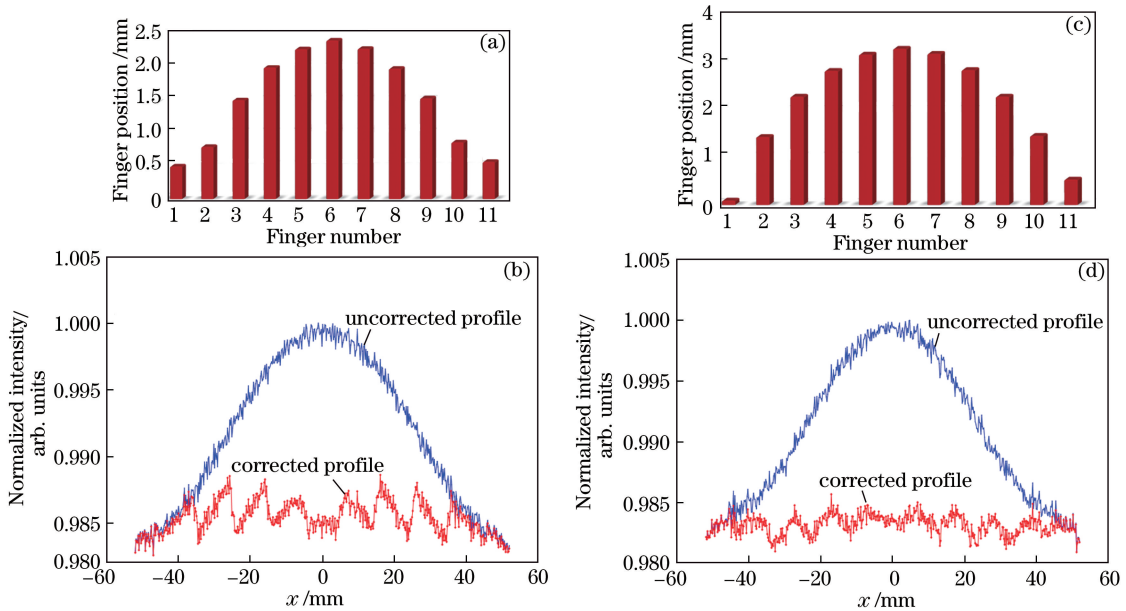


图 11 保持校正手指的宽度及伸入照明光场的距离不变,照明参数为大部分相干因子时校正手指的位置及调节校正手指离焦量得到的校正后积分均匀性曲线。传统照明模式  $\sigma = 0.93$  情况下(a)校正手指的位置和(b)校正后的积分均匀性曲线;环形照明模式  $\sigma_{in} = 0.76, \sigma_{out} = 0.96$  情况下(c)校正手指的位置和(d)校正后的积分均匀性曲线

Fig. 11 Correction finger positions when illumination parameter is most of coherence factor and integrated uniformity curves obtained after correction by adjusting correction finger defocusing distance, and correction finger width and distance from illumination light are kept constant. (a) Correction finger positions and (b) corrected integrated uniformity curves under conventional illumination mode with  $\sigma = 0.93$ ; (c) correction finger positions and (d) corrected integrated uniformity curves under annular illumination mode with  $\sigma_{in} = 0.76$  and  $\sigma_{out} = 0.96$

## 4 结 论

提出了一种光刻机照明系统的多自由度照明均匀性校正方法,分析了校正手指分别在  $x$ 、 $y$  及  $z$  方向变化时的校正机理。当部分相干因子变化时,通过调整校正手指在光轴方向的离焦量,使校正后照明积分的均匀性满足指标要求,这在一定程度上提高了校正效率。仿真验证了该方法的可行性和高效性。

## 参 考 文 献

- [1] Mack C A. Trends in optical lithography[J]. Optics and Photonics News, 1996, 7(4): 29-33.
- [2] Levinson H J. Principles of lithography[M]. Washington: SPIE Press, 2010: 162-200.
- [3] Jong R P, Soon H K, Yeo G S, *et al.* Improvement of shot uniformity on a wafer by controlling backside transmittance distribution of a photomask[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 553-560.
- [4] Jan P K, Frank D, Kinderen T D. Reticule contributions to CD uniformity for 0.25- $\mu\text{m}$  DUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3334: 620-628.
- [5] Kim H W, Lee H R, Kim K M, *et al.* Comprehensive analysis of sources of total CD variation in ArF resist perspective[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5376: 254-265.
- [6] Brandt R J, Calif P. Uniformity filter: US6076942 [P/OL]. 2000-06-20.
- [7] Hyun Y S, Kim D J, Koh C W, *et al.* Characterization and improvement of field CD uniformity for implementation of 0.15- $\mu\text{m}$  technology device using KrF stepper[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 941-947.
- [8] Stroeldraije, Dominicus J M. Lithography apparatus: EP0952491A3 [P/OL]. 2001-05-09.
- [9] Mulkens J, Streefkerk B, Hoogendorp M, *et al.* Immersion lithography exposure systems: Today's capabilities and tomorrow's expectations[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5754: 710-724.
- [10] Cheng W L, Zhang Y B, Zhu J, *et al.* Programmable uniformity correction by using plug-in finger arrays in advanced lithography system[J]. Optics Communications, 2017, 392: 77-85.
- [11] Guo L P, Huang H J, Wang X Z. Off-axis illumination for optical lithography[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23-25.  
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术 [J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 23-25.
- [12] Xing S S, Wu R M, Li H F, *et al.* Freeform-surface design of off-axis illumination in projection lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0322002.  
邢莎莎, 吴仍茂, 李海峰, 等. 应用于投影光刻离轴照明的自由曲面设计 [J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0322002.
- [13] Hu Z H, Yang B X, Zhu J, *et al.* Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0616001.  
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- [14] Hu Z H, Yang B X, Zhu J, *et al.* Pupil shaping techniques in high resolution projection exposure tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111101.  
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 高分辨投影光刻机光瞳整形技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111101.
- [15] Song Q, Zhu J, Wang J, *et al.* A mixed gradient algorithm for high performance DOE design in off-axis lithography illumination system in off-axis lithography illumination system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122005.  
宋强, 朱菁, 王健, 等. 基于混合梯度下降的高性能光刻机离轴照明衍射光学元件设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122005.