

# 光刻机照明光场均匀性高精度校正方法研究

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** 提出了应用于光刻机照明系统照明光场均匀性的高精度校正方法,该方法通过优化手指阵列式均匀性校正器中校正手指前端的形状及其排布方式来提高校正能力和精度。仿真结果表明:当校正手指错开排布时,手指阵列式均匀性校正器的校正精度优于 0.2%;当校正手指的前端有倒斜角且双层错开排布时,手指阵列式均匀性校正器的校正精度优于 0.16%,比常规手指阵列式均匀性校正器的校正精度提高约一倍。

**关键词** 光数据存储; 光刻机; 照明系统; 均匀性校正

中图分类号 O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0722001

## High Precision Correction Method of Illumination Field Uniformity for Photolithography Illumination System

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 Optoelectronic 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 high precision correction method of illumination field uniformity for photolithography illumination system is proposed. The correction ability and accuracy are improved by the optimization of the fingers' fore-end shape and arrangement of the finger array uniformity corrector. The simulation results show that the correction accuracy of the finger array uniformity corrector is better than 0.2%, when fingers are staggered arrangement. In addition, the correction accuracy of the finger array uniformity corrector is better than 0.16%, when fingers are chamfered, staggered and double layouts arrangement, which is about twice as high as general finger array uniformity corrector.

**Key words** optical data storage; photolithography; illumination system; uniformity correction

**OCIS codes** 220.3740; 220.1230; 200.4880

## 1 引 言

随着科技的飞速发展,对高精度、高集成度芯片的需求越来越多。光刻机是超大规模集成电路加工的关键设备,它利用光化学反应原理将掩模板图形转移到硅片上。光刻机照明系统位于激光器与投影

物镜之间,为掩模板提供特定强度分布的照明光场,从而保证掩模图形通过投影物镜高保真地成像至硅片表面上<sup>[1]</sup>。在衡量步进扫描投影式光刻机照明系统的性能时,照明光场积分均匀性是一项关键指标,因为硅片面内任一视场点的曝光剂量是照明光场在扫描方向上的能量积分,照明积分均匀性直接影响

收稿日期: 2018-01-08; 收到修改稿日期: 2018-02-27

基金项目: 上海市科技人才计划(14YF1406300)、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(16520710500)、中国科学院青年创新促进会资助项目、上海市科技人才计划(17YF1429500)

作者简介: 程伟林(1986—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光学光刻技术方面的研究。

E-mail: chengweilin@siom.ac.cn

导师简介: 黄惠杰(1966—),男,博士,研究员,主要从事光散射测量技术、光学生物传感技术、光学检测技术和光学光刻技术方面的研究。E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人)

光刻机的特征尺寸均匀性(CDU)<sup>[2-4]</sup>。随着光刻分辨率的不断提高,对照明光场积分均匀性的要求也越来越高,如在 90 nm 节点光刻机照明系统中要求照明光场积分均匀性为 0.6%,在 65 nm 及 45 nm 节点光刻机照明系统中照明光场积分均匀性要求达到 0.30%。光刻机中的照明均匀化单元<sup>[5-10]</sup>很难直接生成满足要求的照明光场,照明系统中透镜及薄膜的透过率会随着长时间辐照而恶化,严重影响照明光场积分的均匀性。因此,照明系统中需要包含均匀性校正器,用来确保照明光场能够满足曝光需求。

现有的照明光场积分均匀性校正方法有三种:静态灰度滤波法<sup>[11]</sup>、动态灰度滤波法<sup>[12-13]</sup>和手指阵列校正法<sup>[14]</sup>。静态灰度滤波法是在光路中插入一块透过率特定分布的校正板,该方法只能针对特定强度分布的照明光场进行校正,需要根据照明光场的强度变化定期更换校正板。动态灰度滤波法是在光路中插入两块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,该方法在一定程度上提高了校正能力。手指阵列校正法是在光路中插入多个矩形平板结构的不透光校正手指,每个校正手指均可独立地伸入与抽出照明光场。理论上,校正手指宽度越窄,数量越多,通过校正能达到的照明积分均匀性的最小值越小,即校正精度越高,但驱动校正手指运动的执行机构

的排布难度越大。因此,本文提出了一种高精度手指阵列校正方法,该方法在保证校正手指宽度不变的情况下,通过优化校正手指前端的形状及其排布方式来提高校正能力和精度。

## 2 手指阵列式均匀性校正原理

图 1(a)所示为光刻机照明系统的工作原理示意图。准分子激光器发出的激光束经扩束后进入光瞳整形单元,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,光瞳整形单元用于产生不同的照明模式,如环形照明、二极照明和四极照明等<sup>[15-20]</sup>。照明均匀化单元位于光瞳整形单元之后,由照明光场产生组件和聚光镜组组成,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)上的强度为平顶高斯分布,在非扫描方向( $x$  方向)上为均匀的强度分布。可变狭缝刀口面与聚光镜组后焦面重合,可变狭缝刀口面与掩模面分别与照明镜组的物像共轭面重合,照明镜组实现了照明系统与投影物镜的有效衔接。手指阵列式均匀性校正器位于聚光镜组最后一面与可变狭缝之间,相对聚光镜组后焦面的离焦量为  $\Delta z$ ,如图 1(b)所示。在均匀性校正器中,校正手指被分成两组,分别排布于照明光场  $y$  方向的两侧,并均可独立地沿  $y$  方向运动,校正手指通过遮挡照明光场边缘的部分光强达到校正积分均匀性的目的。

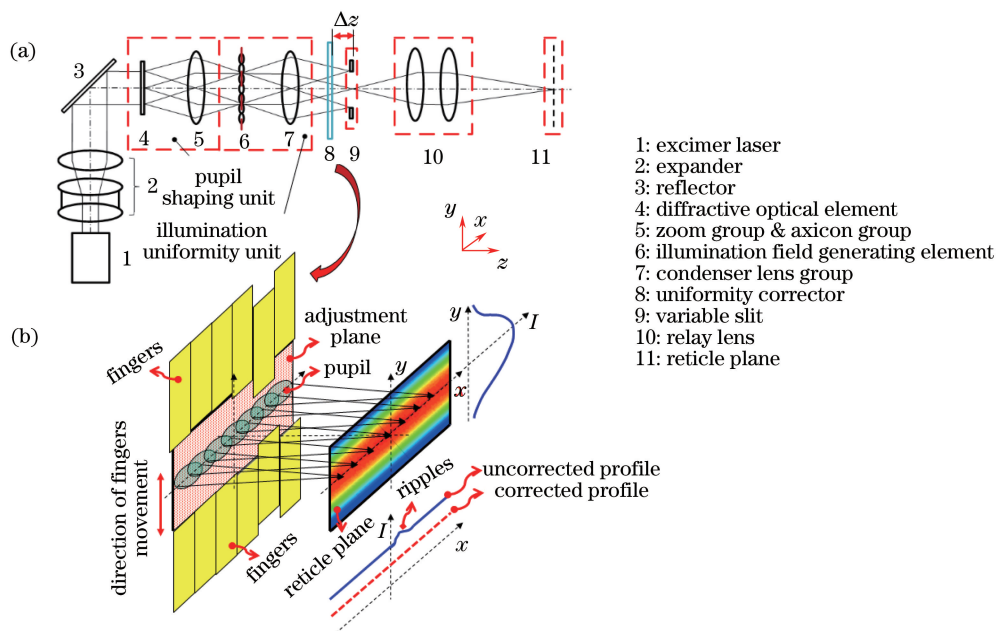


图 1 包含手指阵列式均匀性校正器的照明系统示意图。(a)光刻机照明系统示意图;(b)照明光场积分均匀性校正器示意图

Fig. 1 Schematics of illumination system including finger array uniformity corrector. (a) Schematic of photolithography illumination system; (b) schematic of integral uniformity corrector for illumination system

聚光镜组后焦面照明光场上的任一视场点在校正面对应光瞳形状的区域,如图 2(a)所示,其尺寸  $P_{out}$  的表达式为

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

$$U_{out} = \sin^{-1}(NA_{po}\sigma/M_o), \quad (2)$$

式中:  $M_o$  为照明镜组的放大倍数;  $NA_{po}$  为投影物镜的物方数值孔径;  $\sigma$  为照明模式的部分相干因子。

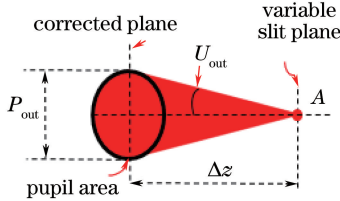


图 2 聚光镜组后焦面照明光场中任一视场点光强在校正面对应光瞳形状区域(以传统照明模式为例)的示意图

Fig. 2 Schematic of illumination field point at the focal plane of condenser lens group and its corresponding spread area at the adjustment plane (e.g. conventional illumination mode)

设聚光镜组后焦面照明光场任一视场点  $(x, y)$  的强度值为  $I_{x,y}$ , 当照明模式为强度均匀分布的传统照明时,校正面对应光瞳形状区域内任一点的光强为

$$I_p = I_{x,y}/(\pi P_{out}^2/4). \quad (3)$$

当校正手指伸入到照明光场时,如图 3 所示,校正手指通过遮挡光瞳形状区域来减小照明光场对应视场点的光强值。设第  $i$  个校正手指遮挡的光瞳形状区域为  $A_i$ , 第  $i+1$  个校正手指遮挡的光瞳形状区域为  $A_{i+1}$ ,  $A_L$  为未被遮挡的光瞳形状区域。根据(3)式可知,第  $i$  个和第  $i+1$  个校正手指遮挡的光强分别为

$$I_{x,y}^{c,i} = \iint_{A_i} I_{x,y}/(\pi P_{out}^2/4) dS = I_{x,y} S_i / (\pi P_{out}^2/4), \quad (4)$$

$$I_{x,y}^{c,i+1} = \iint_{A_{i+1}} I_{x,y}/(\pi P_{out}^2/4) dS = I_{x,y} S_{i+1} / (\pi P_{out}^2/4), \quad (5)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  个校正手指遮挡区域  $A_i$  的面积;  $S_{i+1}$  为第  $i+1$  个校正手指遮挡区域  $A_{i+1}$  的面积。因此,聚光镜组后焦面照明光场任一视场点校正后的光强为

$$I_{x,y}^c = I_{x,y} - \sum_{i=1}^N I_{x,y}^{c,i} = I_{x,y} - \sum_{i=1}^N I_{x,y}/(\pi P_{out}^2/4) S_i, \quad (6)$$

式中:  $N$  为校正手指的个数。校正后沿扫描方向的

积分光强分布  $I_c$  为

$$I_c = \int_1^Y I_{x,y}^c dy =$$

$$\int_1^Y [I_{x,y} - \sum_{i=1}^N I_{x,y} S_i / (\pi P_{out}^2/4)] dy =$$

$$\int_1^Y I_{x,y} dy - \int_1^Y [\sum_{i=1}^N I_{x,y} S_i / (\pi P_{out}^2/4)] dy =$$

$$I_u - \int_1^Y [\sum_{i=1}^N I_{x,y} S_i / (\pi P_{out}^2/4)] dy, \quad (7)$$

式中:  $I_u$  为未校正照明光场沿扫描方向积分后的光强分布;  $Y$  为照明光场的扫描方向的宽度。校正前后照明光场积分均匀性为

$$U_{uncorrected} = \frac{I_{u,max} - I_{u,min}}{I_{u,max} + I_{u,min}}, \quad (8)$$

$$U_{corrected} = \frac{I_{c,max} - I_{c,min}}{I_{c,max} + I_{c,min}}, \quad (9)$$

式中:  $U_{uncorrected}$  为未校正照明光场的积分均匀性;  $U_{corrected}$  为校正后照明光场的积分均匀性;  $I_{u,max}$ 、 $I_{u,min}$  分别为未校正的照明光场积分光强的最大值和最小值;  $I_{c,max}$ 、 $I_{c,min}$  分别为校正后照明光场积分光强的最大值和最小值。

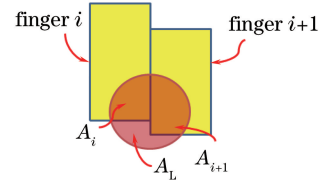


图 3 校正面内校正手指与光瞳形状区域作用关系的示意图

Fig. 3 Schematic of relationship between fingers and pupil shape area in the correction plane

在常规手指阵列校正方法中,校正手指的结构为矩形,上下两组校正手指相对于  $x$  轴对称排布,如图 4 所示。在进行均匀性校正时,照明光场被校

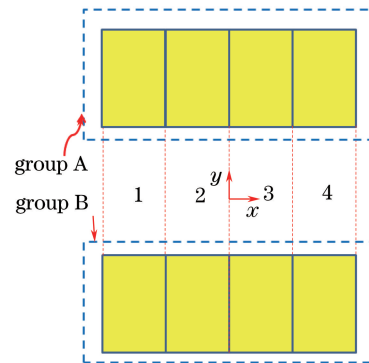


图 4 常规手指阵列校正法中手指的形状以及排布结构示意图

Fig. 4 Schematic of shape and layout of fingers in general finger array correction method

正手指划分为与其个数相同的区域,每个区域的宽度与校正手指的宽度一致,如图 5 所示。校正后每个区域对应的积分光强分布分别为  $I_c^1, I_c^2, \dots, I_c^i$ , 每个区域校正后的残余积分均匀性  $U_{residual}^i$  为

$$U_{residual}^i = \frac{\max(I_c^i) - \min(I_c^i)}{\max(I_c^i) + \min(I_c^i)}, i = 1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

由于每个校正手指只能整体改变对应区域内的光强值,因此常规手指阵列校正方法所能达到的最小积分均匀性(即校正精度)为所有区域残余积分均匀性的最大值,即

$$U_{min}^{tradition} = \max(U_{residual}^i), i = 1, 2, 3, 4. \quad (11)$$

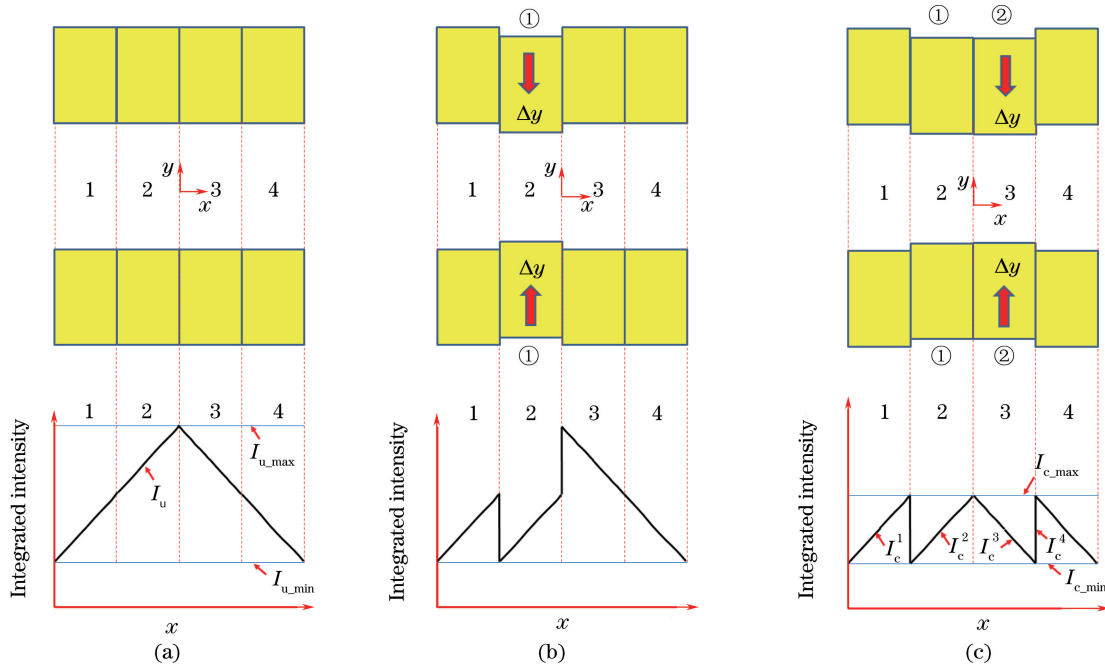


图 5 常规手指阵列校正法校正过程示意图。(a)未校正的照明光场;(b)使用一对手指进行校正;(c)使用两对手指进行校正  
Fig. 5 Schematics of adjustment process for general finger array correction methods. (a) Uncorrected illumination filed; (b) corrected by one pair of fingers; (c) corrected by two pairs of fingers

### 3 手指阵列高精度校正方法设计与优化方法研究

为了提高校正精度,将常规方法中的两组校正手指错开排布,错开量为  $\Delta p$ ,其结构如图 6 所示。上下两排校正手指阵列划分照明光场区域的个数为  $N-1$ ,当对应校正手指错开量  $\Delta p$  为校正手指宽度的  $1/2$  时,每个区域的宽度均为校正手指宽度的  $1/2$ 。图 6(a)中黑实线为未校正的积分光强分布,图 6(g)中的黑实线为校正后的积分光强分布。对比图 5 与图 6 可知,对于相同的未校正积分光强分布,当矩形校正手指错开排布时,其校正精度比常规方法提高了一倍。

另一种提高校正精度的方法为优化校正手指前端的形状,图 7 所示为两种常见的结构形式。从图 7 中不难看出,随着倒斜角与倒圆角不断增大,校正手指前端的结构分别演变为三角形及半圆形。图 8

所示为倒斜角校正手指与倒圆角校正手指的校正效果示意图,根据校正手指前端的形状,可将其划分为 3 部分,其中第 1 部分和第 3 部分为梯形,并对称分布,第 2 部分为矩形。当校正手指从照明光场的边缘伸入  $\Delta y$  时,校正手指第 2 部分遮挡光强的区域为矩形(面积为  $S_2$ ),校正手指在  $x$  方向等量遮挡能量,校正后积分光强分布与未校正的积分光强分布只相差一个固定值。校正手指第 1 部分和第 3 部分遮挡的区域均为三角形(面积分别为  $S_1$  和  $S_3$ ),校正手指在  $x$  方向非等量遮挡能量。由图 8 可见:随着  $x$  坐标值增大,校正手指第 1 部分遮挡的能量增大,校正手指会减小  $I_u^1$  分布的斜率;校正手指第 3 部分的校正过程与第 1 部分类似,但校正手指第 3 部分会增大  $I_c^3$  曲线的斜率,即  $I_c^3$  比  $I_u^3$  更陡。当校正手指边缘点  $a$  和  $d$  位于照明光场的边缘时,校正手指再伸入照明光场  $\Delta y$ ,其 3 个部分遮挡能量区域的面积分别为  $S_4, S_5, S_6$ 。从图 8 中不难看出,  $S_4, S_5, S_6$  三个区域的面积相等,即校正手指在  $x$  方向

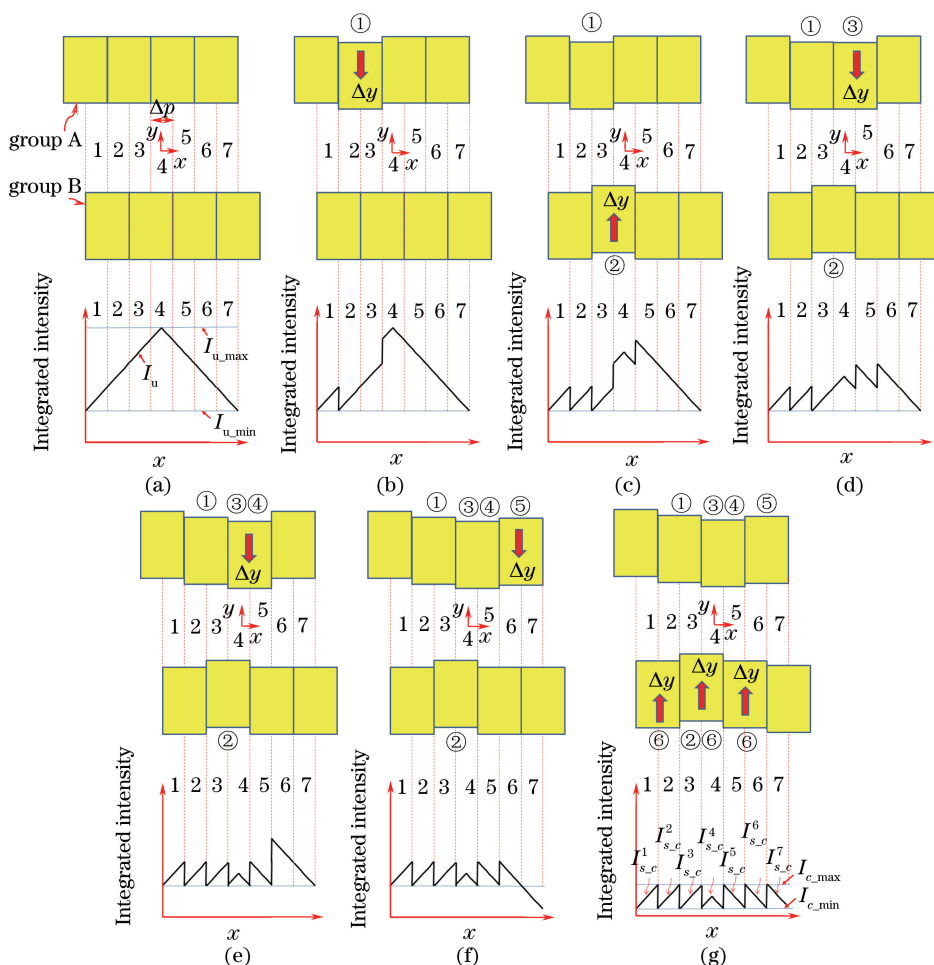


图 6 校正手指错开排布校正过程示意图。(a)未校正的照明光场;(b)~(g)单步校正过程  
 Fig. 6 Schematics of adjustment process for uniformity correction method with staggered fingers.  
 (a) Uncorrected illumination filed; (b)-(g) single corrected process

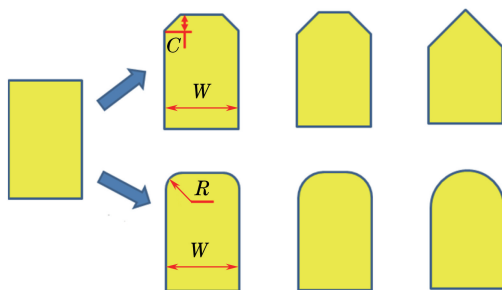


图 7 校正手指前端结构示意图  
 Fig. 7 Schematics of structure of finger fore-end

等量遮挡能量,因此校正后的曲线与之前的曲线相互平行,整体相差一个固定值。校正手指前端为圆弧倒角的校正过程如图 8(b)所示,与校正手指前端为倒斜角的校正过程类似,这里不再赘述。

将倒斜角校正手指错开排布,如图 9 所示。对比图 6 与图 9 可知,校正手指倒斜角后,照明光场被分割成的区域多了一倍。但是校正后的积分均匀性

并没有提高,这是因为并不是每个斜角边均降低了其对应校正区域积分光强分布的斜率。

为了进一步提高手指阵列式校正法的校正精度,使每个校正手指的斜角边均能减小其校正区域的残余积分均匀性,设计了如图 10 所示的校正手指排布形式。每组校正手指分为两层,不同层的校正手指相互独立,上下两组校正手指错开排布,校正手

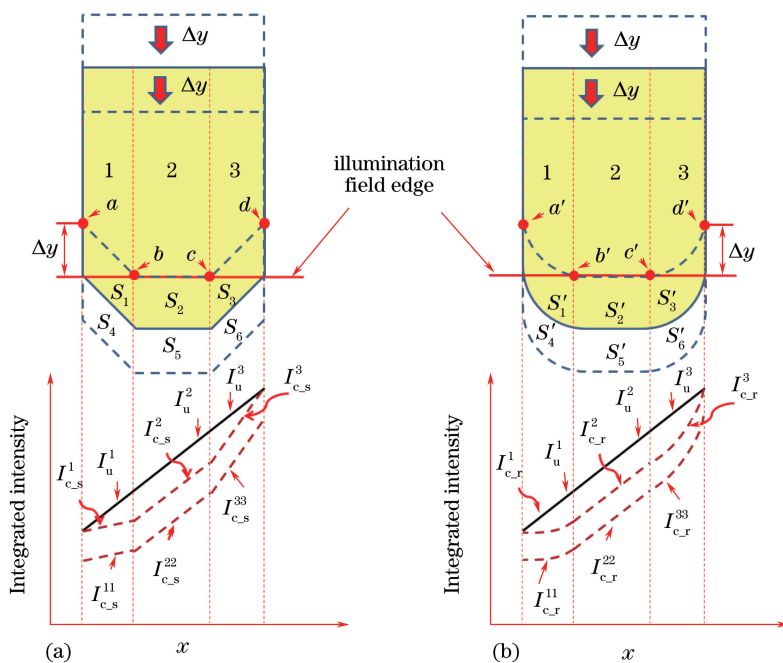


图 8 不同校正手指前端结构的校正效果示意图。(a)倒斜角矩形;(b)倒圆角矩形

Fig. 8 Schematics of correction effect of different structures of finger fore-end. (a) Chamfered rectangle; (b) circle rectangle

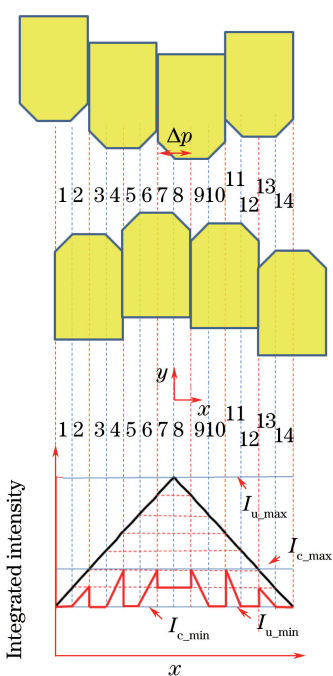


图 9 倒斜角矩形校正手指错开排布的校正示意图

Fig. 9 Schematic of adjustment for uniformity correction method with staggered and chamfered fingers

指的前端宽度为原来的两倍,后端宽度与之前保持一致,校正手指前端均倒斜角。校正手指划分照明光场区域的宽度为校正手指后端宽度的 1/4,每个校正区域同时被斜率相反的两个校正手指覆盖,确保校正手指斜边只减小校正区域的残余积分均匀

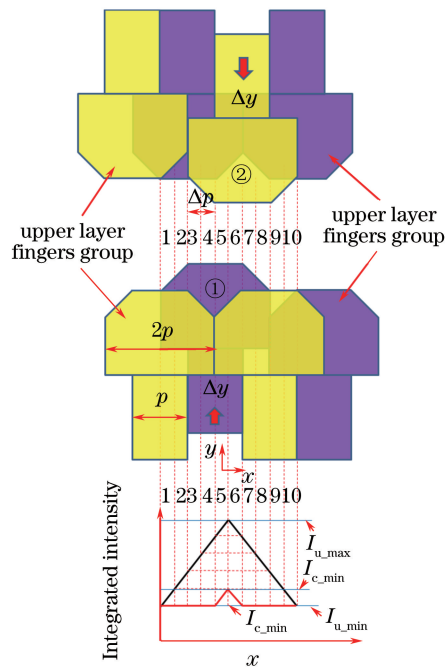


图 10 双层倒斜角矩形校正手指错开排布的校正示意图

Fig. 10 Schematic of adjustment for uniformity correction method with staggered, chamfered and double layout fingers

性,提高了校正精度。  
综上所述,与常规手指阵列校正方法相比,校正手指错开排布校正方法的校正精度提高了一倍,而倒斜角矩形校正手指错开排布校正方法的校正精度并没有改善,双层倒斜角矩形校正手指错开排布校

正后的积分均匀性最小,校正后的积分均匀性分布更平滑,校正精度也最高。

#### 4 照明光场手指阵列高精度校正方法仿真分析

为了验证上述高精度均匀性校正方法的有效性,将该方法应用于 65 nm 节点光刻机照明系统,该系统在 LightTools<sup>®</sup>软件中的系统模型如图 11 所示。照明模式为传统照明和环形照明,传统照明模式的相干

因子要求为  $0.15 \leq \sigma \leq 0.93$ , 环形照明模式中内外相干因子要求为  $0.36 \leq \sigma_{out} \leq 0.96$ 、 $\min(\sigma_{out} - \sigma_{in}) \leq 0.2$ 。准分子激光器发射脉冲光束的波长为 193.368 nm,硅片面照明光场尺寸为 26 mm×5.5 mm,投影物镜的像方数值孔径为 0.93,放大倍数为 -0.25 倍,因此掩模面照明光场尺寸为 104 mm×22 mm,照明镜组的放大倍数为 -1 倍,照明光场的积分均匀性要求为 0.3%。均匀性校正器相对于聚光镜组后焦面的离焦量  $\Delta z = 10$  mm,校正手指的宽度为 10 mm。

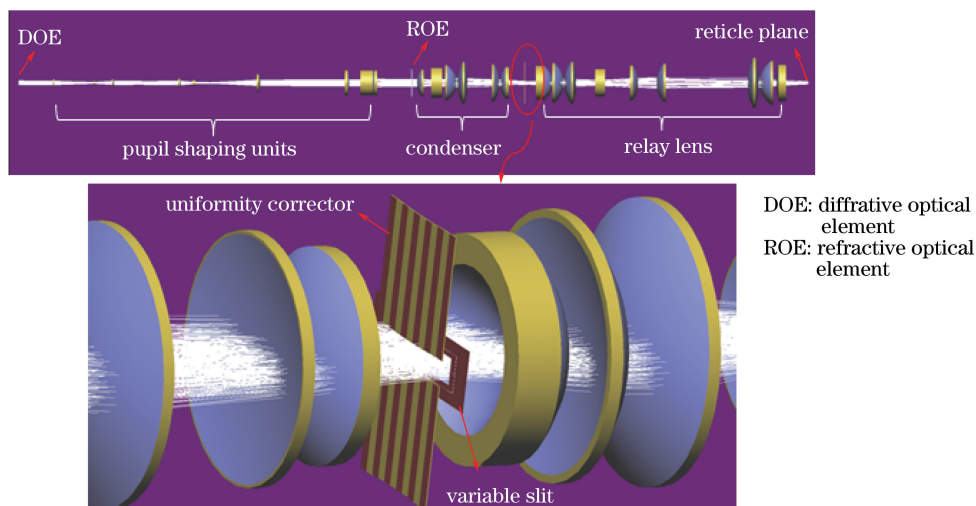


图 11 65 nm 节点光刻机照明系统仿真模型

Fig. 11 Simulation model of 65 nm node lithography illumination system

图 12 所示为常规手指阵列校正法中校正手指的排布结构,其中校正手指的宽度为 10 mm,单排校正手指个数为 11 个,共 22 个,上排校正手指与下排校正手指错开的距离为 5 mm。图 13 所示为倒斜角校正手指错开排布结构图,倒角尺寸为  $0.3 \times 45^\circ$ 。图 14 为三种校正手指排布方法的校正结果,

蓝色曲线表示未校正的积分均匀性分布,红色曲线表示常规手指排布校正后的积分均匀性分布,黑色曲线表示校正手指错开排布校正后的积分均匀性分布,紫色曲线表示倒斜角校正手指错开排布校正后的积分均匀性分布。图 15 所示为双层倒斜角校正手指错开排布结构图,倒角尺寸为  $0.3 \times 45^\circ$ ,并且两

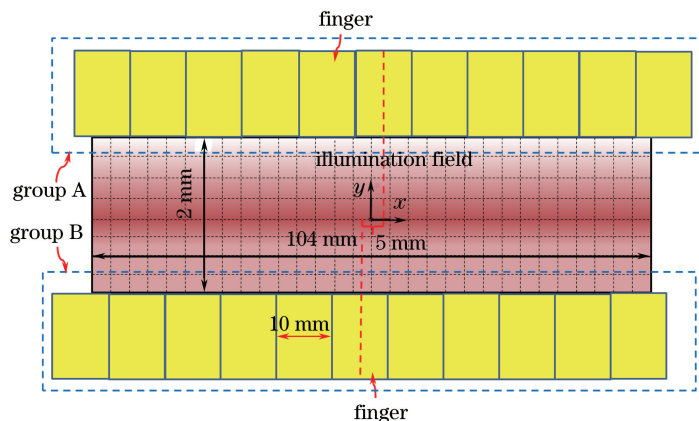


图 12 校正手指错开排布的结构

Fig. 12 Layoutstructure of staggered fingers

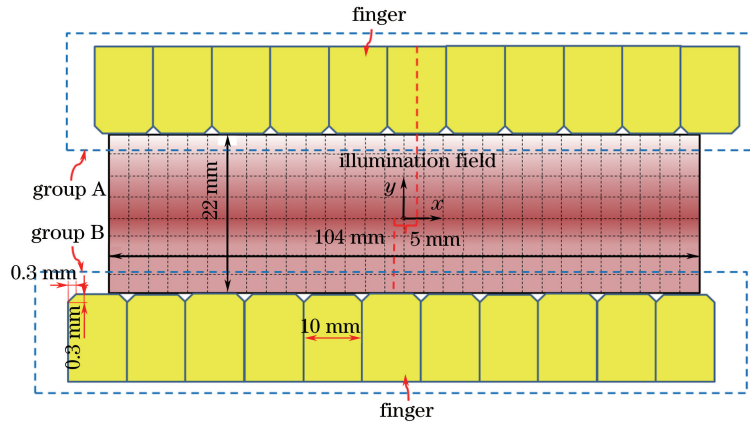


图 13 倒斜角校正手指错开排布的结构

Fig. 13 Layout structure of staggered and chamfered fingers

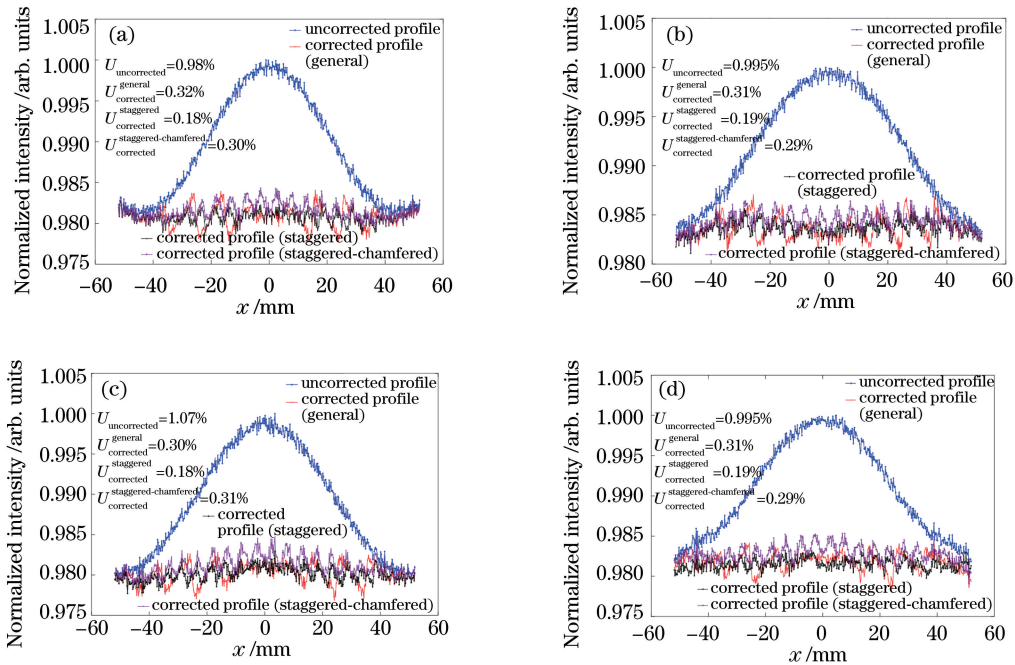


图 14 不同校正手指排布形式校正后的积分均匀性分布。(a)传统照明模式  $\sigma=0.15$ ;(b)传统照明模式  $\sigma=0.93$ ;

(c)环形照明模式  $\sigma_{in}=0.16, \sigma_{out}=0.36$ ;(d)环形照明模式  $\sigma_{in}=0.76, \sigma_{out}=0.96$

Fig. 14 Integral uniformity distributions adjusted by different fingers arrangements. (a) Conventional illumination mode

with  $\sigma=0.15$ ; (b) conventional illumination mode with  $\sigma=0.93$ ; (c) annular illumination mode with

$\sigma_{in}=0.16$  and  $\sigma_{out}=0.36$ ; (d) annular illumination mode with  $\sigma_{in}=0.76$  and  $\sigma_{out}=0.96$

层校正手指阵列离焦量相差 1 mm。图 16 为其校正结果图。表 1 汇总了不同校正手指结构以及排布校正后的照明积分均匀性。

从表 1 中不难看出,常规校正手指排布校正后的积分均匀性为 0.3%左右,校正手指错开排布校正后的积分均匀性均优于 0.2%,但是由于积分均匀性分布中存在高频分量,使得校正手指错开排布校正的精度并没有如理论分析那样提高一倍。根据前面的理论分析可知,与矩形校正手指错开排布相比,尽管倒斜角校正手指错开排布分割照明光场的数量增

加了一倍,但校正手指并不能独立校正每个分割区域的光强,并且在有些校正手指的校正区域内,其校正后积分均匀性分布的斜率变大了,残余积分均匀性反而增大了。因此,与矩形校正手指错开排布相比,倒斜角校正手指错开排布并没有提高校正精度,与常规手指排布的校正精度相当,这与理论分析的结果相吻合。双层倒斜角校正手指错开排布的校正精度优于 0.16%,比矩形校正手指错开排布的校正精度有所提高,并且双层倒斜角校正手指错开排布校正后的积分均匀性分布更加平滑,这对曝光剂量



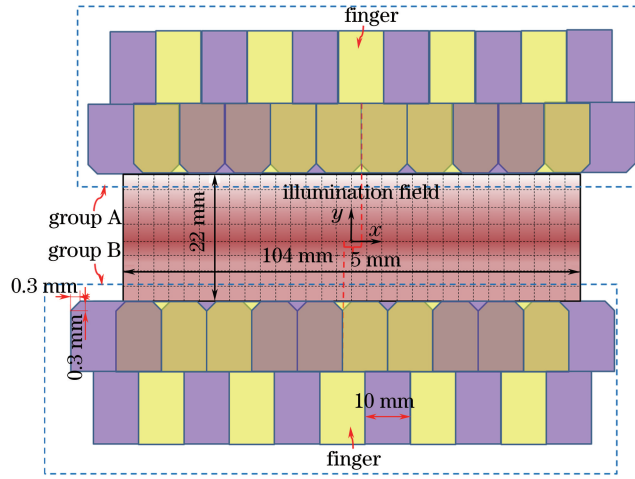


图 15 倒斜角校正手指错开排布的结构

Fig. 15 Layoutstructure of staggered, chamfered and double layout fingers

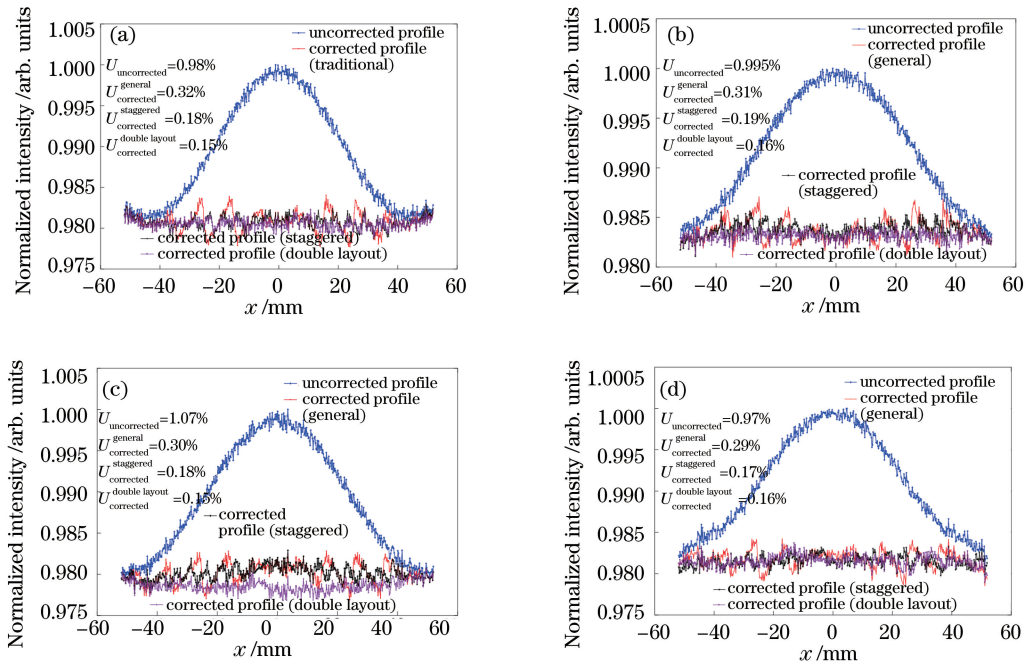


图 16 双层倒斜角校正手指错开排布校正后的积分均匀性分布。(a)传统照明模式  $\sigma=0.15$ ;

(b)传统照明模式  $\sigma=0.93$ ;(c)环形照明模式  $\sigma_{in}=0.16, \sigma_{out}=0.36$ ;(d)环形照明模式  $\sigma_{in}=0.76, \sigma_{out}=0.96$

Fig. 16 Integral uniformity distributions adjusted by staggered, chamfered and double layout fingers arrangement.

(a) Conventional illumination mode with  $\sigma=0.15$ ; (b) conventional illumination mode with  $\sigma=0.93$ ;

(c) annular illumination mode with  $\sigma_{in}=0.16$  and  $\sigma_{out}=0.36$ ; (d) annular illumination mode with  $\sigma_{in}=0.76$  and  $\sigma_{out}=0.96$

表 1 校正后照明积分均匀性结果汇总

Table 1 Summary of results of corrected illumination integrated uniformity

Illumination parameter		Corrected illumination integrated uniformity / %			
		General fingers	Staggered fingers	Staggered and chamfered fingers	Staggered, chamfered and double layout fingers
Conventional illumination mode	$\sigma=0.15$	0.32	0.18	0.30	0.15
	$\sigma=0.93$	0.31	0.19	0.29	0.16
Annular illumination mode	$\sigma_{in}=0.16, \sigma_{out}=0.36$	0.30	0.18	0.31	0.15
	$\sigma_{in}=0.76, \sigma_{out}=0.96$	0.29	0.17	0.32	0.16

控制非常有利。

## 5 结 论

针对常规手指阵列式校正方法校正精度的不足,通过优化校正手指排布方式以及校正手指前端的形状,提出了应用于光刻机照明系统照明光场的高精度照明均匀性校正方法。详细阐述了不同手指前端方状以及不同排布方式对照明均匀性的校正机理,并通过仿真研究验证了该方法的有效性。仿真结果表明,较之常规手指阵列式校正方法,矩形校正手指阵列错开排布的校正精度优于0.2%,双层倒斜角校正手指错开排布的校正精度优于0.16%,并且双层倒斜角校正手指错开排布校正后的积分光强分布更加平滑,更有利于曝光剂量的控制。

## 参 考 文 献

- [1] Levinson H J. Principles of lithography [M]. Washington: SPIE Press, 2010: 162-200.
- [2] Mack C A. Analytical expression for impact of linewidth roughness on critical dimension uniformity [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(2): 020501.
- [3] Avizemer D, Sharoni O, Oshemkov S, *et al.* Critical dimension control using ultra short laser for improving wafer critical dimension uniformity [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2015, 14(3): 033510.
- [4] Guo L P, Wang X Z, Huang H J. Analysis of illumination pupil filling ellipticity for critical dimensions control in photolithography [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(4): 237-239.
- [5] Guo L P, Huang H J, Wang X Z. Study of integrator rod in step and scan lithography [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(7): 981-985.  
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用 [J]. 光子学报, 2006, 35(7): 981-985.
- [6] Dimas C F, Read S, Kuta J J. Integrating rod homogeneity as a function of cross-sectional shape [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4768: 82-92.
- [7] Arai J, Kawai H, Okano F. Microlens arrays for integral imaging system [J]. Applied Optics, 2006, 45(36): 9066-9078.
- [8] Zimmermann M, Lindlein N, Voelkel R, *et al.* Microlens laser beam homogenizer: from theory to application [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6663: 666302.
- [9] Feng Z, Huang L, Jin G, *et al.* Designing double freeform optical surfaces for controlling both irradiance and wavefront [J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28693-28701.
- [10] Jin Y, Hassan A, Jiang Y J. Freeform microlens array homogenizer for excimer laser [J]. Optics Express, 2016, 24(22): 24846-24858.
- [11] Brandt R J, Calif P. Uniformity filter: US6076942 [P/OL]. (2000-06-20) [2018-02-27]. <https://www.bing.com/search?q=US6076942>.
- [12] Stroeldraijer J M D, Ten C J W R, Fey F H A, *et al.* Lithography apparatus: EP0952491A3 [P/OL]. (2001-05-09) [2018-02-27]. <https://www.bing.com/search?q=EP0952491A3>.
- [13] Cao S W. A illumination uniformity compensation device and lithography machine with the device: CN201010124083.7 [P]. 2010-08-18.  
曹昇炜. 一种照明均匀性补偿装置及具有该装置的光刻机: CN201010124083.7 [P]. 2010-08-18.
- [14] 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.
- [15] Zhang W, Gong Y. Vector analysis of diffractive optical elements for off-axis illumination of projection lithography system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1005002.  
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明衍射光学元件的矢量分析 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1005002.
- [16] Tounai K, Tanabe H, Nozue H, *et al.* Resolution improvement with annular illumination [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1927: 137-157.
- [17] Wu R M, Li H F, Zheng Z R, *et al.* Freeform lens arrays for off-axis illumination in an optical lithography system [J]. Applied Optics, 2011, 50(5): 725-732.
- [18] Lü Y F, Dong Y, Li S T, *et al.* Modified algorithm for designing of diffractive optical element to decrease the phase singular spots [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0505001.  
吕彦飞, 董渊, 李述涛, 等. 一种用于减少相位突变点的衍射光学元件改进设计方法 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0505001.
- [19] 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.
- [20] Hu Z H, Yang B X, Zhu J, *et al.* Far-field multi-parameter measurement of diffractive optical element for pupil shaping in lithography system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0908001.  
胡中华, 杨宝喜, 朱菁, 等. 光刻机光瞳整形衍射光学元件远场多参数检测方法 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908001.