

## 光刻机照明光场强度分布校正技术研究

马晓喆<sup>1,2</sup>, 张方<sup>1\*</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>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 在 28 nm 及以下节点光刻机中, 平顶高斯照明光场是减小脉冲量化误差对曝光剂量影响的关键技术之一。为降低平顶高斯照明光场产生组件的设计、加工和装调难度, 提出一种光刻机照明光场强度分布校正技术。该技术通过较少次数的算法迭代可获得合适的光场校正板透过率分布, 并将扫描方向强度分布的尺寸公差需求作为边界条件来降低校正引起的能量损失。所得到的光场校正板可同时对照明光场的非扫描方向积分均匀性和扫描方向光场强度分布进行校正。仿真分析结果表明, 该技术获得的光场校正板可将照明光场的非扫描方向积分均匀性校正至 0.29% 以下, 也可将扫描方向强度分布校正至指标范围内, 校正引入的能量损失也可平均降低 4.09%。所提技术可在一定程度上提高光刻机的产率。

**关键字** 成像系统; 光场强度分布校正; 模拟退火算法; 透过率分布优化算法; 步进扫描光刻机

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2005001

### 1 引言

照明系统是光刻机的核心子系统之一, 主要作用之一是产生具有特定强度分布的照明光场。照明光场的性能对曝光剂量分布起到决定性的作用, 而曝光剂量分布不均匀会导致曝光线条线宽难以控制, 影响曝光效果<sup>[1-3]</sup>。随着集成电路特征尺寸的不断减小, 脉冲量化误差现象逐渐成为曝光剂量分布不均匀的主要因素<sup>[4]</sup>, 而平顶高斯照明光场技术成为减小脉冲量化误差对曝光线条影响的关键技术<sup>[4-6]</sup>。考虑到光刻机照明系统的匹配性和一致性, 以及硅片位移平台的移动范围, 照明系统对平顶高斯照明光场的各项参数有着较为严格要求和公差限制<sup>[7]</sup>, 但受现有微透镜阵列 (MLAs)、散射板和傅里叶变换透镜 (FTL) 的设计、加工和装调等技术的约束, 它们直接产生的平顶高斯照明光场较难满足需求。同时, 在光刻机的长时间使用过程中, 各光学元件的性能 (如膜层透过率等) 衰退也可能导致平顶高斯照明光场性能的下降<sup>[8]</sup>。

Chen 等<sup>[6]</sup>提出了一种平顶高斯照明光场的产生办法, 可产生相对稳定的照明光场, 但只对照明光场非扫描方向顶部区域均匀性、扫描方向顶部区域均匀性、半峰全宽尺寸进行了评估。Randolph<sup>[9]</sup>提出了静态灰度滤波光场均匀性校正技术, 该技术通过对校正板进行分区并分别设计透过率分布来获得均匀的照明光场。Stoeldraijer 等<sup>[10]</sup>提出动态灰度滤波光场均匀性校正技术, 该技术可通过控制两片透过率互补的校正板的位置实现对照明光场积分均匀性的校正。程伟林等<sup>[8]</sup>提出一种光刻机照明系统多自由度均匀性校正方法, 该方法通过控制手指阵列伸入光场的距离实现对照明光场积分均匀性的校正。这些研究方法主要针对照明光场均匀性校正的技术, 并未涉及对照明光场扫描方向强度分布的校正。

针对上述问题, 本文对光刻机照明光场强度分布校正技术进行了研究, 提出了一种光刻机照明光场强度分布的校正技术, 通过复用光刻机照明系统的均匀性校正板, 设计和优化透过率分布, 在实现均匀性校正的同时对扫描方向强度分布进行校正。此

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-03-09; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (6180031064)、上海市自然科学基金 (19ZR1464300)、上海扬帆计划 (18YF1426500)、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: \*zhangfang@siom.ac.cn; \*\*huanghuijie@siom.ac.cn

外,该方法设计和优化得到的光场校正板在满足校正需求的同时,将扫描方向强度分布的尺寸公差需求作为优化边界条件,减小了校正带来的能量损失,可在一定程度上提高光刻机的产率。

## 2 光刻机照明系统平顶高斯照明光场产生与校正原理

### 2.1 平顶高斯照明光场产生原理

光刻机的照明系统由扩束器、衍射光学元件、变焦准直和变倍镜组、光场产生组件(FGE)、FTL、扫描狭缝和中继镜组组成,如图 1 所示<sup>[11-16]</sup>。MLAs、散射板和 FTL 配合在 FTL 后焦面上,得到平顶高斯照明光场,如图 2 所示,且所产生的平顶高斯照明光场对入射到其上光束的强度分布不敏感<sup>[11-12]</sup>。照明光场均匀性校正板通常位于 FTL 最后一块透镜和扫描狭缝之间<sup>[8]</sup>。

平顶高斯照明光场的形成原理如图 3 所示。根据傅里叶变换的原理可知,若 MLAs 和散射板同时放置于 FTL 前,FTL 后焦面的光场  $I(x, y)$  为矩形光场  $\text{Rect}(x, y)$  和高斯光场  $\text{Gauss}(x, y)$  的卷积,表达式为

$$I(x, y) = \text{Rect}(x, y) \otimes \text{Gauss}(x, y), \quad (1)$$

$$\text{Rect}(x, y) = \begin{cases} u(x + \frac{D_{TX}}{2}) - u(x - \frac{D_{TX}}{2}) \\ u(y + \frac{D_{TY}}{2}) - u(y - \frac{D_{TY}}{2}) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\text{Gauss}(x, y) = \begin{cases} \delta(x) \\ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \end{cases}, \quad (3)$$

式中:  $D_{TX}$  和  $D_{TY}$  分别为 MLAs 所形成矩形光场沿 X 方向和 Y 方向的尺寸;  $\sigma$  描述高斯光场的角度分布;  $\delta(x)$  为脉冲函数。

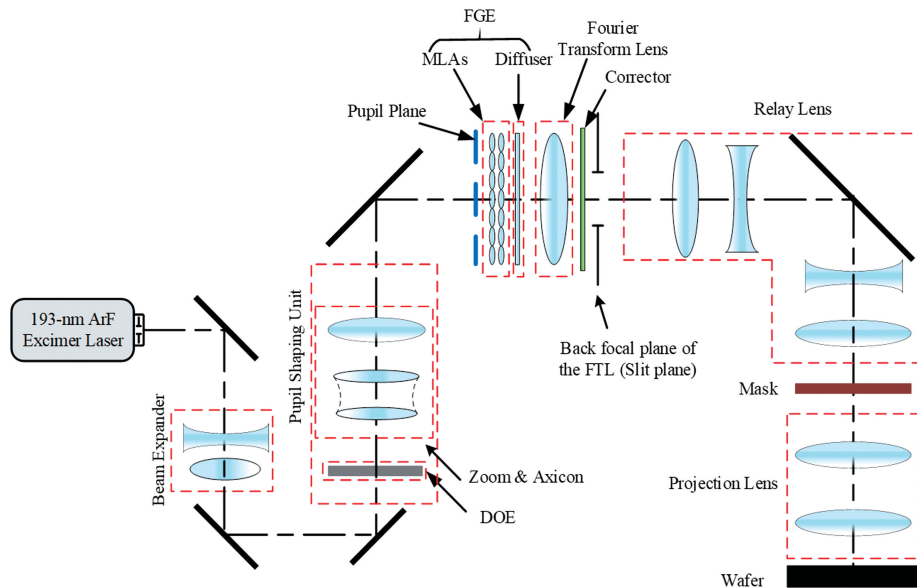


图 1 步进扫描光刻机的光学系统结构<sup>[11-16]</sup>

Fig. 1 Optical system structure of step-and-scan lithography<sup>[11-16]</sup>

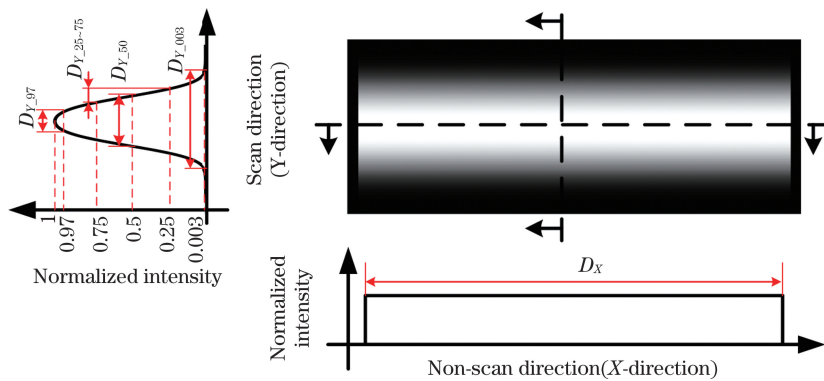


图 2 平顶高斯照明光场空间分布情况

Fig. 2 Spatial distribution of top-Gaussian illumination field

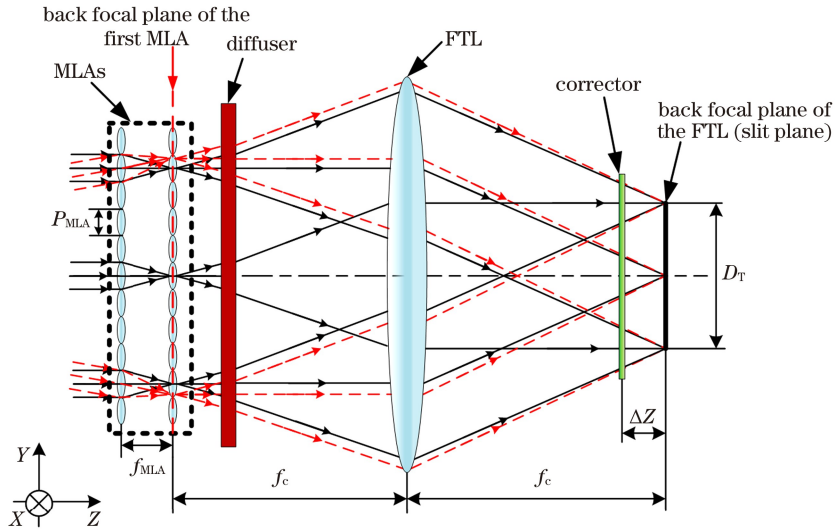


图 3 平顶高斯照明光场产生原理

Fig. 3 Generation principle of top-Gaussian illumination field

平顶高斯照明光场的各项需求定义如图 2 中双箭头线条标识所示。照明光场非扫描方向的积分强度分布计算方法为

$$I(x) = \int I(x, y) dy. \quad (4)$$

顶部区域的积分强度分布为  $I_{top}(x)$ ，顶部区域的尺寸和积分均匀性分别为  $D_x$  和  $D_{uni}$ 。 $D_{uni}$  的计算公式为

$$D_{uni} = \frac{\max [I_{top}(x)] - \min [I_{top}(x)]}{\max [I_{top}(x)] + \min [I_{top}(x)]} \times 100\%. \quad (5)$$

照明光场扫描方向的积分强度分布  $I(y)$  为平顶高斯分布，计算方法为

$$I(y) = \int I(x, y) dx. \quad (6)$$

尺寸由 4 个参数进行约束，依次为 97% 宽度  $D_{Y_{97}}$ 、50% 宽度  $D_{Y_{50}}$ 、0.3% 宽度  $D_{Y_{0.03}}$  和 25%~75% 宽度  $D_{Y_{25\sim75}}$ 。平顶高斯照明光场非扫描方向顶部积分均匀性  $D_{uni}$  由矩形光场的积分均匀性决定，平顶高斯照明光场扫描方向的各项尺寸由矩形光场尺寸  $D_{TY}$  和高斯光场散射角  $\sigma$  决定<sup>[17]</sup>，同时 MLAs 和散射板的相对安装公差对平顶高斯照明光场的尺寸也有影响。

## 2.2 平顶高斯照明光场校正原理

为了降低加工公差和装调需求的实现难度，进一步适当放宽 MLAs、散射板和 FTL 的设计约束，可采用对照明光场进行校正的方法使其符合照明系统需求。因为光场校正板与 FTL 后焦面不重合，在对照明光场进行校正时，FTL 后焦面上某一视场点的光场强度会受到光场校正板上对应区域的透过率

分布影响。因此需要将 FTL 后焦面上的光场转换到光场校正板所在的平面上进行光场校正板透过率分布的设计和优化。针对传统照明模式，FTL 后焦面上任意视场点在光场校正板处形成的光斑强度分布如图 4 所示，其中  $\Delta Z$  为光场校正板与 FTL 后焦面之间的距离。光斑直径  $d_{pupil}$  与离焦量  $\Delta Z$  的关系为

$$d_{pupil} = 2 \times \tan U_{slit} \times \Delta Z, \quad (7)$$

式中： $U_{slit}$  是 FTL 后焦面光束的孔径半角，与相干

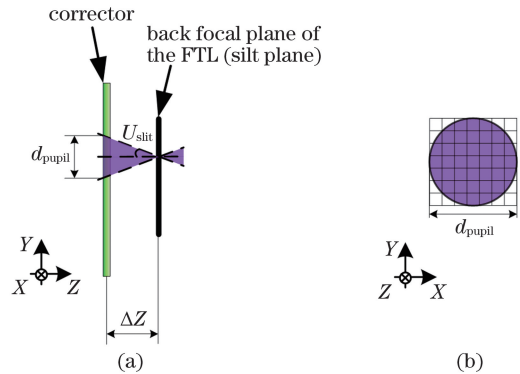


图 4 传统照明模式下照明光场某视场点在光场校正板上形成的光斑强度分布。(a) 光场校正板上形成的离焦光斑的大小；(b) 光场校正板上离焦光斑的强度分布

Fig. 4 In traditional illumination mode, the spot intensity distribution formed by a field point of the illumination light field on the light field correction plate. (a) Size of defocusing spot formation on the field correction plate; (b) intensity distribution of the defocusing spot on the field correction plate

因子  $\sigma$  相关。

$$U_{\text{slit}} = \arcsin(NA \times M_{\text{PO}}) \times M_{\text{Relay}} \times \sigma', \quad (8)$$

式中:  $NA$  为投影物镜的像方数值孔径;  $M_{\text{PO}}$  为投影物镜的放大倍率;  $M_{\text{Relay}}$  为中继镜组的放大倍率;  $\sigma'$  为传统照明模式的相干因子。

设 FTL 后焦面上视场点  $(x, y)$  的光强值为  $I(x, y)$ , 其在光场校正板处形成的光斑为

$$I_{\text{pupil}} = \frac{I(x, y) \times 4}{\pi \times d_{\text{pupil}}^2} = \frac{I(x, y) \times 4}{\pi \times (2 \times \tan U_{\text{slit}} \times \Delta Z)^2} \quad (9)$$

设  $I_{\text{pupil}}$  在光场校正板上对应区域的透过率分布为  $T$ , 则经过光场校正板校正后, FTL 后焦面  $(x, y)$  位置视场点的光强为

$$I'(x, y) = \int_S T \times I_{\text{pupil}} ds = \frac{1}{\pi \times \tan^2 U_{\text{slit}}} \int_S \frac{T \times I(x, y)}{\Delta Z^2} ds, \quad (10)$$

式中:  $S$  为校正板离焦后, 光束在校正板产生的光斑区域。校正后的平顶高斯照明光场  $X$  方向顶部尺寸和积分均匀性与  $Y$  方向尺寸可按照(4)~(6)式进行计算和评估。

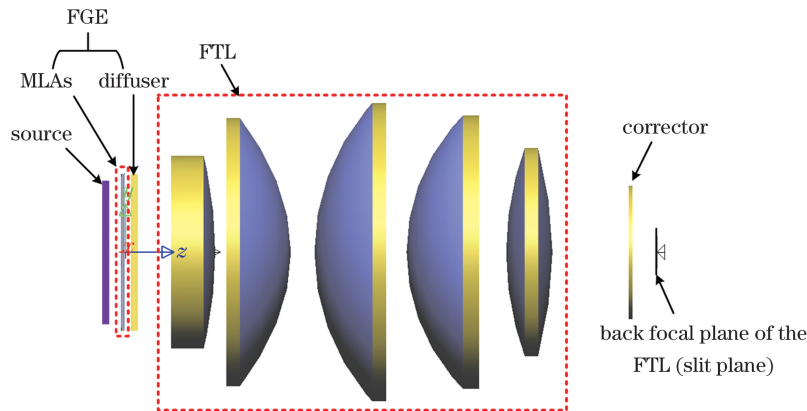


图 5 产生平顶高斯照明光场的光学系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of optical system for generating the top-Gaussian illumination field

表 1 平顶高斯照明光场需求表

Table 1 Requirements of the top-Gaussian illumination field

Non-scan direction		Scan direction			
$D_X$ /mm	$D_{\text{uni}}$ /%	$D_{Y_{.97}}$ /mm	$D_{Y_{.50}}$ /mm	$D_{Y_{.003}}$ /mm	$D_{Y_{.25-75}}$ /mm
$\geq 104$	$\leq 0.30$	$4.2 \pm 0.5$	$13.2 \pm 0.4$	$22 \pm 1.5$	$> 2.9$

针对上述模型和系统需求, 设计了 MLAs 和散射板<sup>[17]</sup>, 具体设计结果如表 2 所示。为验证所提校正技术对不同平顶高斯照明光场强度分布的校正效果, 对 MLAs 分别设置 3 种不同的口径分布来模拟口径加工公差, 从而获得不同的平顶高斯照明光场

照明光场校正后的能量损失  $E_{\text{lost}}$  为

$$E_{\text{lost}} = \frac{\sum I(x, y) - \sum I'(x, y)}{\sum I(x, y)} \times 100\% \quad (11)$$

在光场校正板透过率分布的设计优化过程中, 扫描方向强度分布的校正与  $D_{\text{uni}}$  的校正存在一定程度的耦合。因此, 在进行光场校正板设计优化时, 需要反复迭代优化才能得到合适的透过率分布, 且应先优化  $D_{\text{uni}}$ , 再优化扫描方向的光场强度分布, 以减少迭代次数。在光场校正板的优化过程中, 可将照明光场强度分布的尺寸公差范围纳入优化范畴, 尽可能地降低  $E_{\text{lost}}$ 。

### 3 光场校正板设计优化与仿真验证

照明系统中的光场产生组件和 FTL 的仿真模型如图 5 所示, 其中 FTL 的焦距为 186 mm, 光源  $NA=1.35$ 、相干因子为 0.93。平顶高斯照明光场需求如表 1 所示, 包括  $D_X$ 、 $D_{\text{uni}}$  以及扫描方向各尺寸的标称值与公差要求。

分布, 它们的口径分布如表 3 所示。散射板由 10 种不同口径微柱面镜随机分布组成, 拟合后的等效高斯散射角  $\sigma$  为  $0.78^\circ$ 。3 种不同口径分布的 MLAs 分别与散射板和 FTL 形成 3 种传统照明模式照明光场(照明光场 1、照明光场 2 和照明光场 3), 如

图 6 所示。 $D_x$ 、 $D_{uni}$  及扫描方向光场强度分布的参数如表 4 所示。其中,照明光场 1 的  $D_{Y_{003}}$  和  $D_{uni}$  不满足要求;照明光场 2 和照明光场 3 的  $D_{Y_{50}}$ 、 $D_{Y_{003}}$  和  $D_{uni}$  均不满足要求。

表 2 MLAs 与散射板中微透镜的设计结果

Table 2 Design results of the microlenses of MLAs and diffuser

Element	Surface No.	Surface type	Radius /mm	Conic	Thickness /mm	Material	Comment
MLAs	1st MLA	1	1.60		2.00	Fused silica	Y MLA
		2	-2.25				X MLA
	2nd MLA	3	0.50	-0.39	0.75	Fused silica	X MLA
		4	-1.48				Y MLA
Diffuser	1	Sphere	inf		2.00	Fused silica	
	2	Aspheric	-0.70	-2.78			Y MLA

表 3 MLAs 与散射板中微透镜的口径分布

Table 3 Pitch distributions of the microlenses of MLAs and diffuser

No.	Micro lens' pitch in non-scan direction /mm	Micro lens' pitch in scan direction /mm				
MLAs 1	0.52	0.19				
MLAs 2	0.52	0.1914	0.1915	0.1916	0.1917	0.1918
		0.1926	0.1934	0.1941	0.1949	0.1957
MLAs 3	0.52	0.1959	0.1965	0.1968	0.1971	0.1975
		0.1982	0.1990	0.1998	0.2006	0.2014
Diffuser		0.0090	0.0190	0.0255	0.0320	0.0370
		0.0437	0.0500	0.0575	0.0678	0.8195

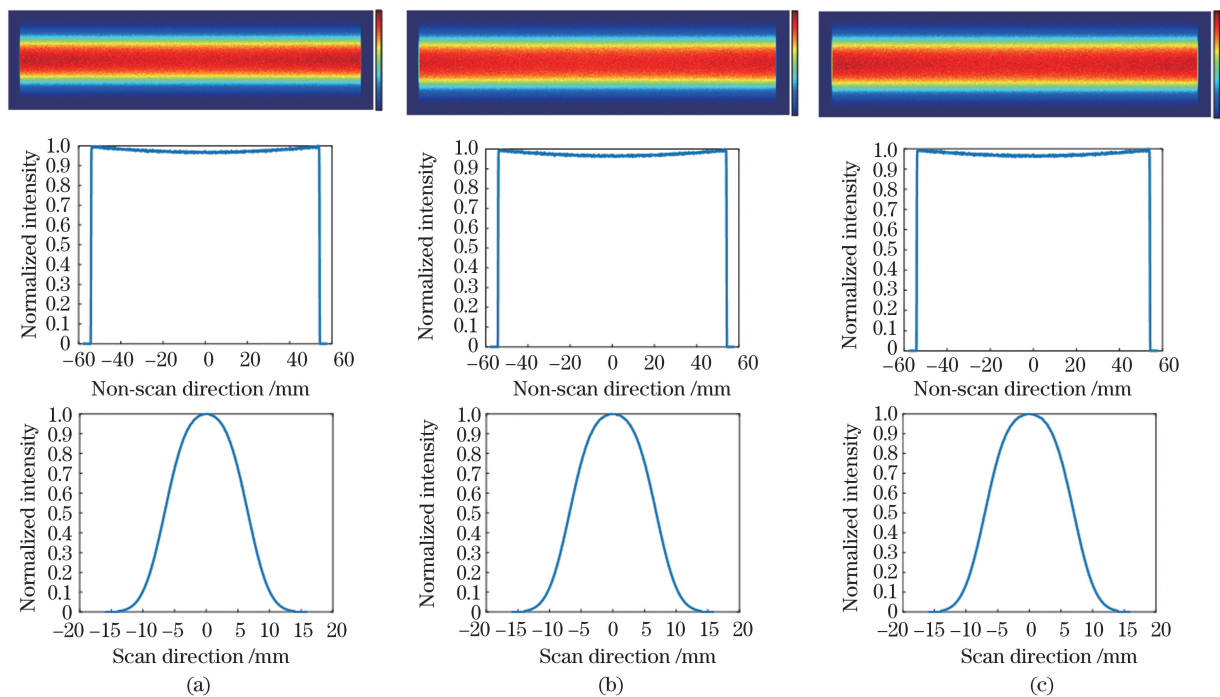


图 6 3 种传统照明模式照明光场。(a)照明光场 1;(b)照明光场 2;(c)照明光场 3

Fig. 6 Illumination light field of three traditional lighting modes. (a) Illumination field 1; (b) illumination field 2; (c) illumination field 3

表 4 3 种传统照明模式照明光场的参数

Table 4 Parameters of illumination light field of three traditional lighting modes

No.	Non-scan direction		Scan direction			
	$D_X/\text{mm}$	$D_{\text{uni}}/\%$	$D_{Y_{97}}/\text{mm}$	$D_{Y_{50}}/\text{mm}$	$D_{Y_{003}}/\text{mm}$	$D_{Y_{25\sim75}}/\text{mm}$
Illumination field 1	107.60	1.44	3.79	13.18	27.86	3.69
Illumination field 2	107.55	1.44	4.14	13.68	27.96	3.69
Illumination field 3	107.55	1.44	4.39	14.08	27.96	3.72

### 3.1 基于模拟退火算法的光场校正板透过率分布设计与优化

常用的全局优化算法有模拟退火 (SA) 算法<sup>[18]</sup>、粒子群算法<sup>[19]</sup>和遗传算法<sup>[20]</sup>,可解决较困难的大规模组合优化问题。其中,模拟退火算法源于对固体退火过程的模拟,具有描述简单、使用灵活和

优化效率高等优点,并采用 Metropolis 准则控制算法进程,可在较短时间内求得全局最优近似解<sup>[21-22]</sup>,因此采用模拟退火算法对光场校正板的透过率分布进行设计和优化。

基于模拟退火的光场校正板的透过率分布优化流程如图 7 所示,算法中的评价函数为  $E_{\text{lost}}$ ,限定条

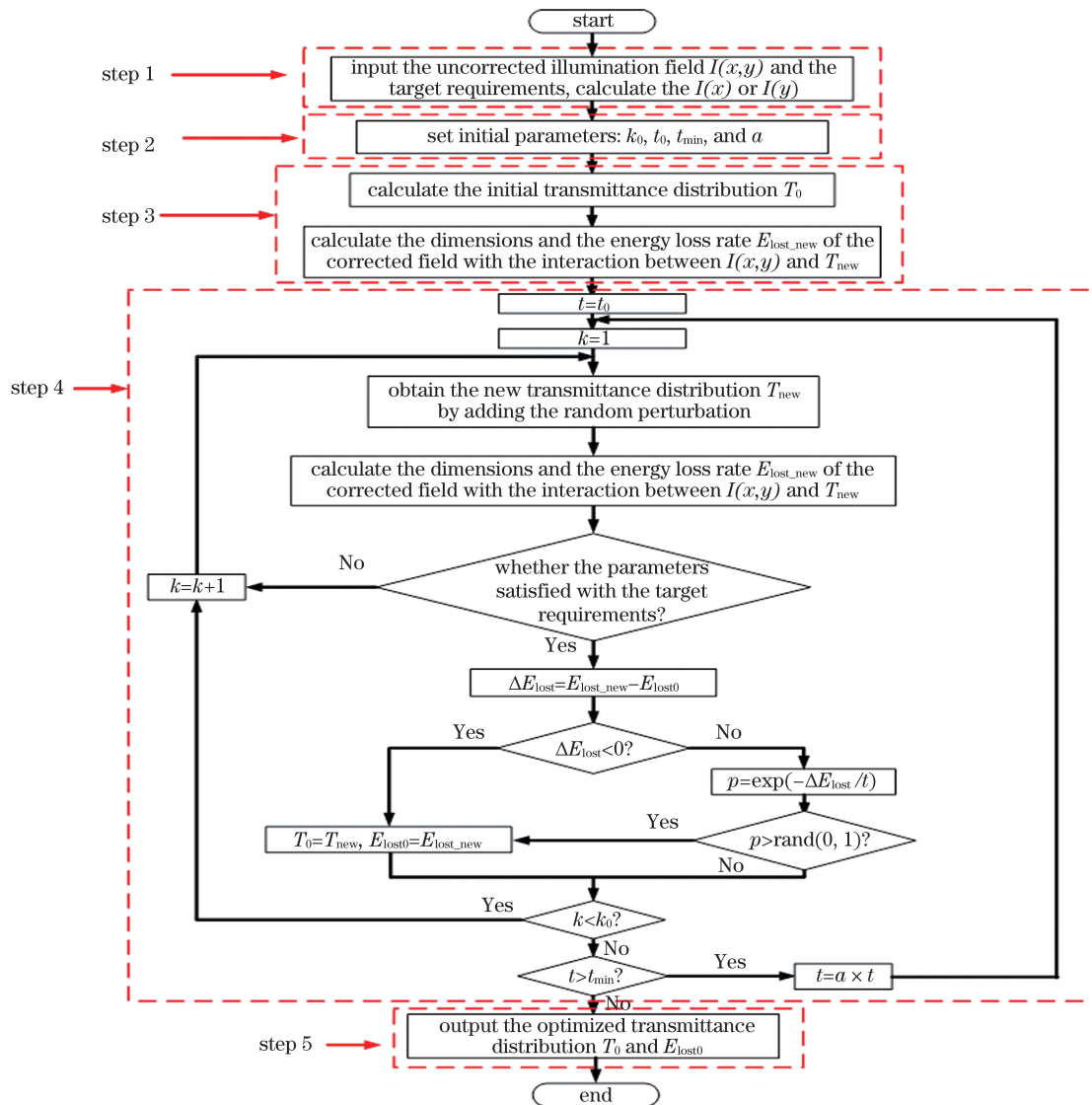


图 7 基于模拟退火的光场校正板透过率分布优化算法流程图

Fig. 7 Flow chart of transmittance distribution optimization algorithm of light field correction plate based on simulated annealing

件为  $D_{uni}$ 、 $D_X$  以及扫描方向的尺寸标称值,优化边界条件为扫描方向尺寸的公差范围。基于 Metropolis 准则的接受概率  $p$  的表达式为

$$p(\Delta E_{lost}) = \exp(-\Delta E_{lost}/t)。 \quad (12)$$

经过模拟退火算法的设计和优化,光场校正板的透过率分布可在满足照明系统需求的基础上,使照明光场的能量损失率  $E_{lost}$  达到最小。

当离焦量  $\Delta Z=5$  mm 时,针对图 6 和表 4 中所述的 3 种照明光场,使用所提出的透过率分布优化算法对光场校正板的透过率分布进行设计和优化,

表 5 3 种校正后的照明光场各项参数和能量损失(非扫描方向校正结果)

Table 5 Parameters and energy loss of the three corrected illumination fields (correction results in non-scan direction)

No.	$E_{lost}/\%$	Non-scan direction		Scan direction				Time-consuming of optimization /s
		$D_X/\text{mm}$	$D_{uni}/\%$	$D_{Y_{97}}/\text{mm}$	$D_{Y_{50}}/\text{mm}$	$D_{Y_{003}}/\text{mm}$	$D_{Y_{25\sim75}}/\text{mm}$	
Illumination field 1	1.87	104.06	0.24	3.79	13.18	27.86	3.64	7.68
Illumination field 2	1.92	104.01	0.15	4.14	13.68	27.96	3.64	7.34
Illumination field 3	1.88	104.06	0.17	4.39	14.08	27.96	3.67	7.61

若对上述 3 种照明光场按照符合照明系统要求的标称值进行校正,不考虑公差范围, $E_{lost}$  分别为 8.86%、10.22% 和 12.30%。因此,对初步得到的光场校正板透过率分布进行进一步优化时,将照明光场强度分布的尺寸公差范围设置为优化边界条件,在满足照明系统要求的情况下尽可能地降低  $E_{lost}$ 。优化算法中变量的初始设置与上一步优化相同。

随着优化的推进, $E_{lost}$  快速下降并收敛到一个稳定值,如图 8 所示。优化结束后,光场校正板的透过率分布情况如图 9 所示。校正前后照明光场非扫描和扫描方向的积分强度分布如图 10 所示。校正后的各项参数、 $E_{lost}$  以及优化总耗时如表 6 所示。从校正结果可知,3 种校正后的照明光场均满足

所使用电脑的主要配置为 CPU, Intel Core i7-10750H, 内存为 16 GB。

首先设计和优化光场校正板的透过率分布,对  $D_{uni}$  进行校正。在优化算法中,设置温度初始值  $t_0=100$  °C,冷却温度终点值  $t_{min}=0.01$  °C,温度下降比  $\alpha=0.9$ ,每个温度下的最大循环次数  $k_0=20$ 。优化结束后,将得到的透过率分布与照明光场相互作用,得到 3 种初步校正后的照明光场,各项参数、 $E_{lost}$  及优化所需的时间如表 5 所示。

需求。

### 3.2 仿真结果

为验证光场校正板透过率分布设计与优化算法的准确性,将 3 种优化后得到的光场校正板代入图 5 所示的模型中进行仿真分析,仿真所用电脑性能与优化算法所用电脑一致。为保证仿真结果可行,仿真光线数目为 5 亿。

仿真结果如图 11 所示,各项参数和能量损失结果如表 7 所示。对比 3 种照明光场的仿真结果和算法评估结果可知, $E_{lost}$  最大差异为 0.11%, $D_X$  相同, $D_{uni}$  最大差异为 0.03%, $D_{Y_{97}}$ 、 $D_{Y_{50}}$ 、 $D_{Y_{003}}$  和  $D_{Y_{25\sim75}}$  最大差异分别为 0 mm、0 mm、0.1 mm 和 0.1 mm。

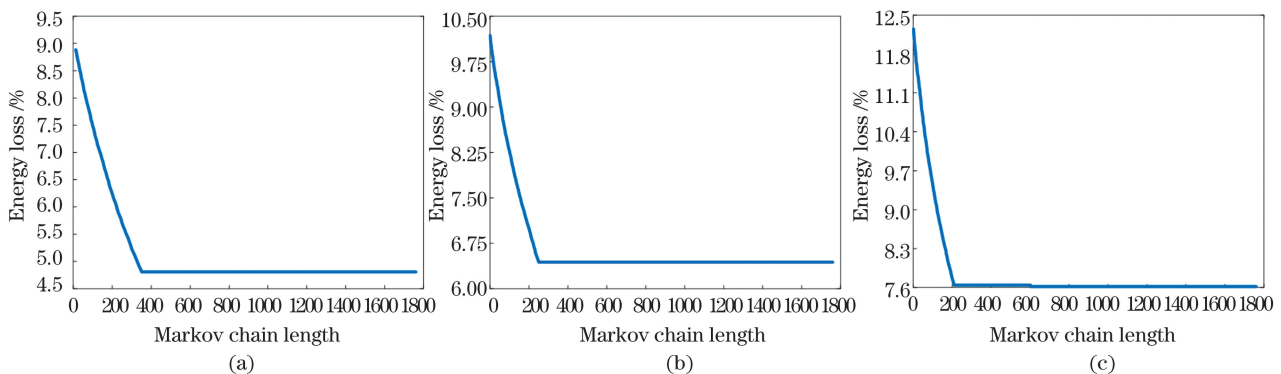


图 8 优化过程中 3 种照明光场  $E_{lost}$  的变化趋势。(a)照明光场 1;(b)照明光场 2;(c)照明光场 3

Fig. 8 Tendency of  $E_{lost}$  for three illumination fields during optimization. (a) Illumination field 1; (b) illumination field 2; (c) illumination field 3

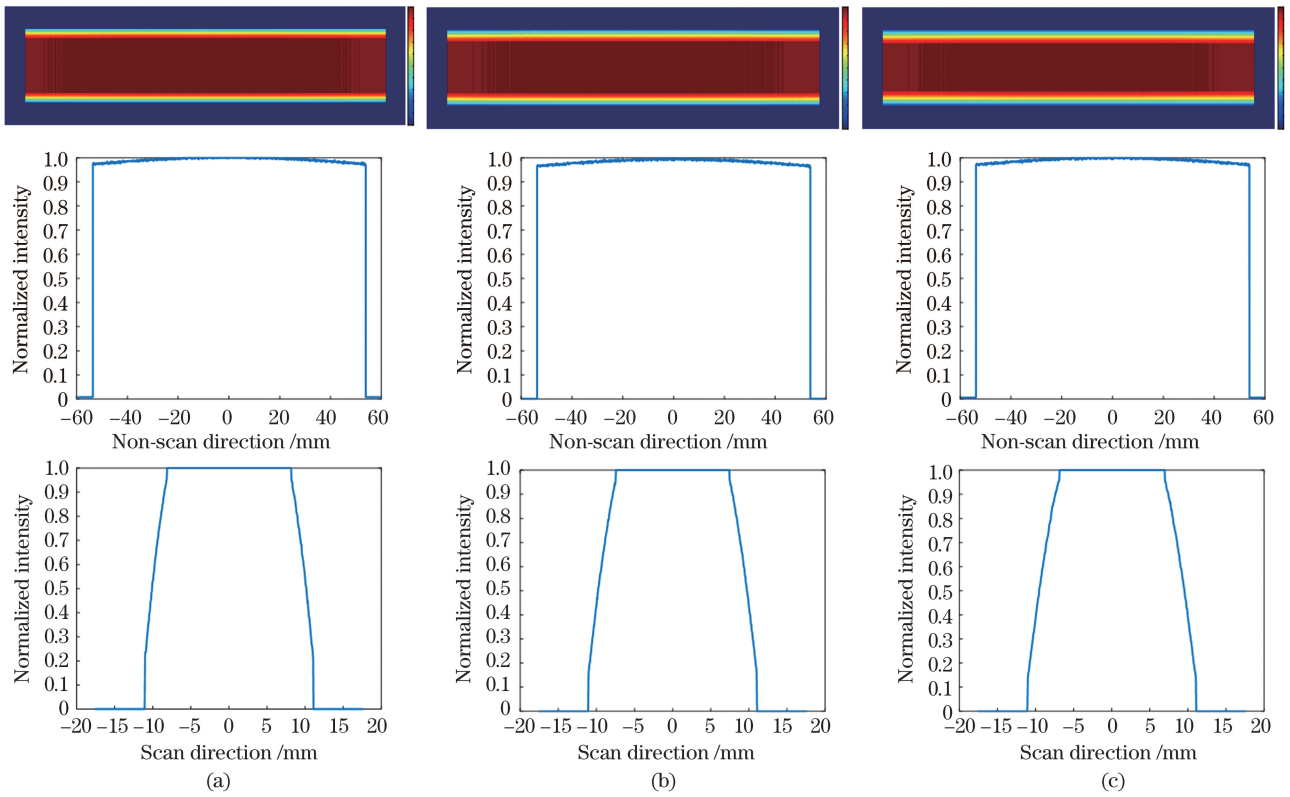


图 9 3 种优化后的光场校正板透过率分布情况。(a)光场校正板 1;(b)光场校正板 2;(c)光场校正板 3

Fig. 9 Transmittance distributions of three optimized correctors. (a) Corrector 1; (b) corrector 2; (c) corrector 3

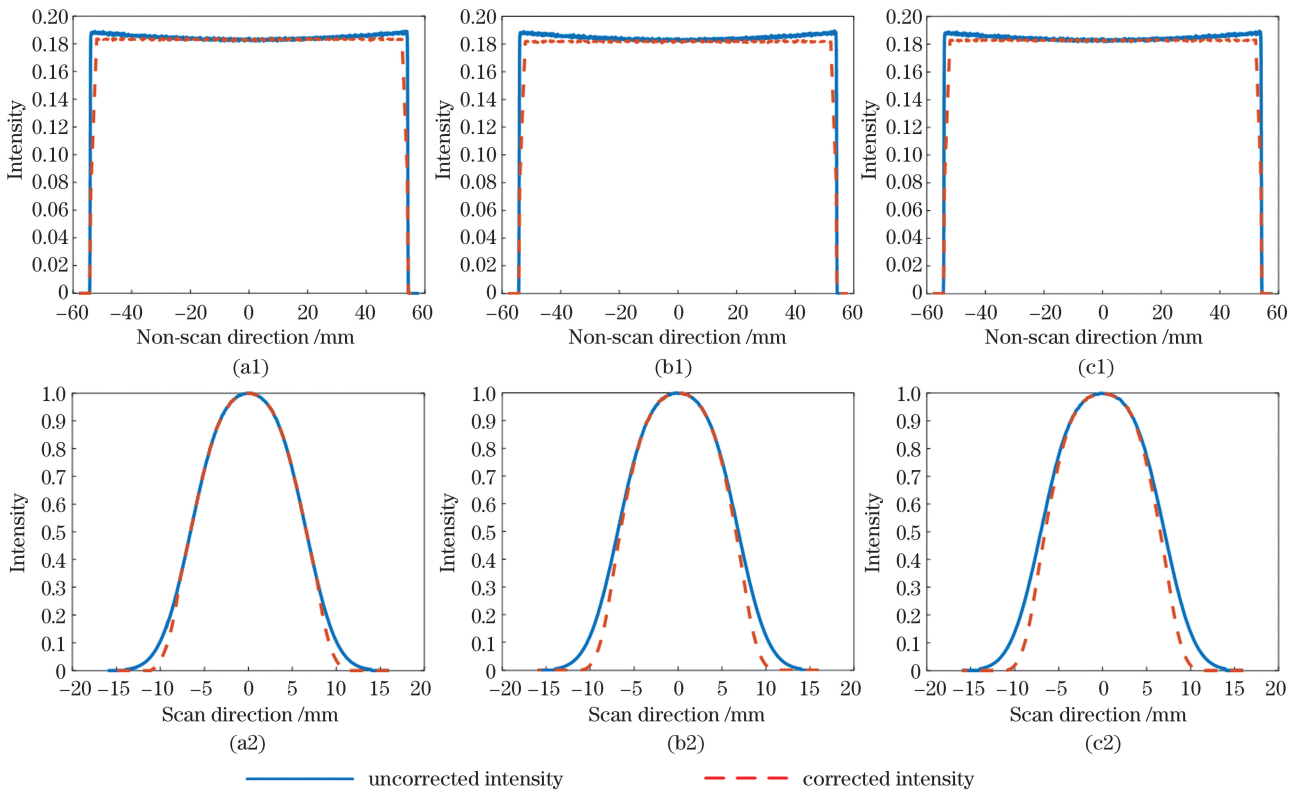


图 10 校正前后 3 种照明光场非扫描方向和扫描方向光场强度分布对比。(a)照明光场 1;(b)照明光场 2;(c)照明光场 3

Fig. 10 Comparison of the three illumination field intensity in non-scan and scan directions before and after correction.

(a) Illumination field 1; (b) illumination field 2; (c) illumination field 3



表 6 3 种照明光场校正后的各项参数和能量损失(最终的校正结果)

Table 6 Parameters and energy loss of the three corrected illumination fields (final corrected results)

No.	$E_{lost}/\%$	Non-scan direction		Scan direction				Total time-consuming of optimization /s
		$D_X/\text{mm}$	$D_{uni}/\%$	$D_{Y_{97}}/\text{mm}$	$D_{Y_{50}}/\text{mm}$	$D_{Y_{003}}/\text{mm}$	$D_{Y_{25\sim75}}/\text{mm}$	
Illumination field 1	4.88	104.06	0.26	3.79	13.18	23.46	3.37	9.15
Illumination field 2	6.45	104.01	0.19	4.14	13.48	23.46	3.15	8.87
Illumination field 3	7.78	104.06	0.22	4.39	13.58	23.46	3.00	9.09

表 7 3 种照明光场校正后的参数和能量损失表(仿真结果)

Table 7 Parameters and energy loss of the three corrected lighting fields (simulation results)

No.	$E_{lost}/\%$	Non-scan direction		Scan direction				Time-consuming of simulation /h
		$D_X/\text{mm}$	$D_{uni}/\%$	$D_{Y_{97}}/\text{mm}$	$D_{Y_{50}}/\text{mm}$	$D_{Y_{003}}/\text{mm}$	$D_{Y_{25\sim75}}/\text{mm}$	
Illumination field 1	4.76	104.06	0.29	3.79	13.18	23.36	3.44	4
Illumination field 2	6.34	104.01	0.22	4.14	13.48	23.36	3.24	4
Illumination field 3	7.67	104.06	0.25	4.39	13.58	23.36	3.05	4

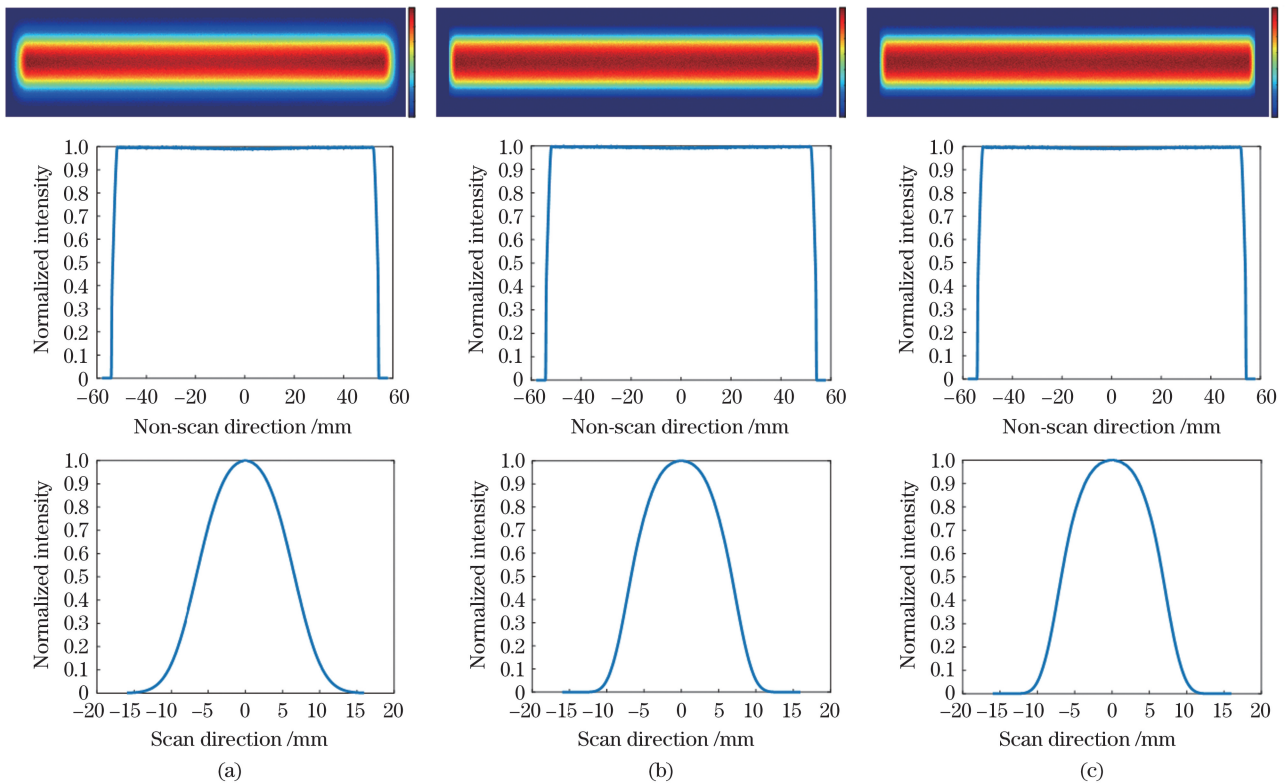


图 11 3 种不同照明光场经校正后的仿真结果。(a) 照明光场 1;(b) 照明光场 2;(c) 照明光场 3

Fig. 11 Simulation results of three corrected illumination fields. (a) Illumination field 1; (b) illumination field 2; (c) illumination field 3

## 4 结 论

提出了一种光刻机照明光场强度分布的校正技术。该技术通过先优化照明光场非扫描方向积分均匀性再优化扫描方向光场强度分布的方式来降低迭代次数,并将扫描方向强度分布的尺寸公差需求作

为边界条件来降低照明光场能量损失。该技术可根据给定的平顶高斯照明光场,在较短时间内设计和优化出光场校正板,该校正板在实现照明光场非扫描方向均匀性校正的同时,可对照明光场扫描方向的强度分布进行校正。

为验证所提技术的可行性,基于模拟退火算法

分别对 3 种不同强度分布的照明光场进行设计和优化。优化结果表明,所设计的光场校正板可以使照明光场非扫描方向均匀性校正值得在 0.29% 以下,扫描方向强度分布尺寸  $D_{Y_{.97}}$ 、 $D_{Y_{.50}}$ 、 $D_{Y_{.003}}$  和  $D_{Y_{.25\sim 75}}$  分别校正到 [3.79 mm, 4.39 mm]、[13.18 mm, 13.58 mm]、[23.3 mm, 23.4 mm] 和 [3.05 mm, 3.44 mm] 范围内,校正后的非扫描方向均匀性和扫描方向强度分布尺度均满足需求,并且光场校正板引起的能量损失分别从 8.86%、10.22% 和 12.30% 降到了 4.88%、6.45% 和 7.78%, 平均降低了 4.09%。将设计优化得到的 3 种不同光场校正板分别代入到 LightTools 软件中进行仿真验证,验证结果与算法评估结果基本一致。

所提技术设计的光场校正板可通过复用光刻机照明系统中的均匀性校正板来实现,该技术对降低 MLAs 和散射板的设计、加工和装调难度有重要的意义,可在一定程度上缩短照明系统的研发周期,降低研发成本,并在一定程度上提高光刻机的产率。

### 参 考 文 献

- [1] Herkommer A M. Evolution of illumination systems in microlithography a retrospective[C]//International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing, June 13-17, 2010, Jackson Hole, Wyoming. Washington, D.C.: OSA, 2010: ITuC1.
- [2] Rothschild M, Bloomstein T M, Fedynshyn T H, et al. Recent trends in optical lithography [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2003, 14(2):221-236.
- [3] Harry J L. Principles of lithography[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2005.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Mao Y J, Li S K, Wang X Z, et al. Lithographic tool-matching method based on differential evolution algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222002.  
茅言杰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于差分进化算法的光刻机匹配方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222002.
- [8] 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.
- [9] Randolph J B. Uniformity filter: US6076942 (A) [P]. 2000-06-20.
- [10] Stoeldraijer J M D, Ten C J W R, Fey F H A, et al. Lithography apparatus: EP0952491A2 [P]. 1999-10-27.
- [11] 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.
- [12] Caley A J, Thomson M J, Liu J S, et al. Diffractive optical elements for high gain lasers with arbitrary output beam profiles [J]. Optics Express, 2007, 15(17): 10699-10704.
- [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] Gong S, Yang B X, Huang H J. Effects of mid-spatial frequency surface errors on the illumination field uniformity of off-axis illumination [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1204003.  
龚爽, 杨宝喜, 黄惠杰. 中频面形误差对离轴照明系统光场性能的影响 [J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1204003.
- [15] Li Y Q, Wei L D. Method for optimizing design of generating arbitrary lithography lighting source by micro-mirror array: CN103941549B [P]. 2014-07-23.  
李艳秋, 魏立冬. 一种优化设计微反射镜阵列产生任意光刻照明光源的方法: CN103941549B [P]. 2014-07-23.
- [16] Liu Z F, Chen M, Bu Y, et al. Blade edge's penumbra measurement for scanning slit of lithographic tools [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004005.  
刘志帆, 陈明, 步扬, 等. 光刻机扫描狭缝刀口半影宽度测量技术 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004005.
- [17] Ma X Z, Zhang F, Niu Z Y, et al. Design and optimization of top-Gaussian illumination field in photolithography [J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 025106.

- [18] Li X C, Huang G L, Zhu J Q, et al. Design of unequal width cylindrical lens array by using simulated annealing method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(7): 616-620.  
李学春, 黄关龙, 朱健强, 等. 利用模拟退火法实现不等宽单元柱面透镜阵列(CLA)的理论设计[J]. 中国激光, 2000, 27(7): 616-620.
- [19] Zhang Y Z, Liu Y, Hou H Y, et al. Intrinsic tissue fluorescence spectrum recovery based on particle swarm optimization algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0504001.  
张元志, 刘勇, 侯华毅, 等. 基于粒子群优化算法的生物组织固有荧光光谱复原方法[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0504001.
- [20] 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.  
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.
- [21] Zhang H J, Zhou S L, Wu R, et al. Optimization design of lens array based on simulated annealing algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(12): 1216001.  
张琥杰, 周申蕾, 邬融, 等. 基于模拟退火算法的透镜阵列优化设计[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1216001.
- [22] Dong M J, Lin B J, Liu Y C, et al. Topology dynamic optimization for inter-satellite laser links of navigation satellite based on multi-objective simulated annealing method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0706004.  
董明杰, 林宝军, 刘迎春, 等. 基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0706004.

## Correction Technology for Illumination Field Intensity Profile in Photolithography Machine

Ma Xiaozhe<sup>1,2</sup>, Zhang Fang<sup>1\*</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>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** The step-and-scan photolithography machine is the main equipment for manufacturing integrated circuits used in the key layer preparation. The exposure system of the photolithography machine consists of the illumination system and projection objective. The illumination system is the core of the subsystems, therefore, it is used for several purposes, and it generates an illumination field with a specific intensity profile. The critical dimension uniformity is determined using the uniformity of the dose energy in the scanned exposure field. In and below 28 nm node, the top-Gaussian illumination is an important technology for reducing the influence of the pulse quantization error on dose energy. Considering the matching and consistency of the photolithography machine and the moving range of the wafer platform, the requirements and tolerances of the top-Gaussian illumination field are relatively strict. However, owing to limitations in design, manufacturing, and installation for the microlens arrays, diffuser, and Fourier transform lens (FTL), the dimensions of the top-Gaussian illumination field in scan direction are relatively difficult to meet the requirements directly. The performance of optical elements, such as coating transmittance, may degrade the performance of the top-Gaussian illumination field after long-term use. The general correction methods are focused on the uniformity correction of the illumination field. Therefore, in this study, a correction technology for the intensity profile of the illumination field is proposed. A corrector designed and optimized by this technology can correct the intensity profile and integral uniformity of the illumination field simultaneously. The energy loss can be decreased by considering the dimension tolerances of the intensity profile in the scan direction as boundary conditions during the optimization.

**Methods** The design process of the corrector includes the intensity profile and integral uniformity corrections. The corrector is located at the front of the rear focal plane of FTL with a defocus distance. The illumination field on the

rear focal plane of FTL should be transferred to the defocus plane during the design and optimization process. For the conventional illumination mode, the intensity distribution of a field point on the rear focal plane of FTL at the corrector plane is shown in Fig. 5. The intensity profile correction in the scan direction is coupled with the integral uniformity correction in the nonscan direction. Conducting a few iterations of the optimization during the design of the corrector is necessary. To reduce the number of iterations, the integral uniformity of the illumination field in the nonscan direction is corrected. Then, the intensity profile of the illumination field in the scan direction is corrected. Additionally, the dimension tolerances of the intensity profile in the scan direction should be included in optimizing the corrector to reduce the energy loss of the correction of the illumination field.

**Results and Discussions** To verify the feasibility of this technology, correctors are designed for three unsatisfied top-Gaussian illumination fields. Moreover, the transmittance distributions of the correctors are optimized through the simulated annealing algorithm. Fig. 10 shows the transmittance distributions of the designed and optimized correctors. The correctors' abilities are tested through simulations in LightTools software. The integral uniformities of the three top-Gaussian illumination fields in the nonscan direction are less than 0.29% after correction (Table 6 and Table 7). The dimensions  $D_{Y_{97}}$ ,  $D_{Y_{50}}$ ,  $D_{Y_{003}}$ , and  $D_{Y_{25-75}}$  of the three illumination fields in the scan direction are [3.79 mm, 4.39 mm], [13.18 mm, 13.58 mm], [23.3 mm, 23.4 mm], and [3.05 mm, 3.44 mm] after corrections, respectively. The correction results show that the integral uniformities and intensity profiles are meet the requirements. The energy loss introduced by the correction is reduced by an average of 4.09%. Furthermore, the time taken by algorithm is less than 10 s (CPU: Intel Core i7-10750H, SDRAM: 16 GB). The consistency of the algorithm and simulation results shows the feasibility and veracity of the proposed technology.

**Conclusions** In this study, a correction technology for the intensity profile of the illumination field in a photolithography machine is proposed. To reduce the number of iterations, the integral uniformity in the nonscan direction of the illumination field should be corrected. Then, the intensity distribution of the illumination field in the scan direction is corrected by the proposed technology. The tolerances of the dimensions of the intensity distribution in the scan direction are taken as the boundary conditions during the optimization to reduce the energy loss of the illumination field. According to three unsatisfied top-Gaussian illumination fields, the correctors are designed and optimized in a relatively short time. The integral uniformities in the nonscan direction and the dimensions of the intensity profiles in the scan direction are satisfied with the requirements after correction.

**Key words** imaging systems; intensity profile correction; simulated annealing algorithm; transmittance distribution optimization algorithm; step-and-scan photolithography machine

**OCIS codes** 110.5220; 120.4820; 220.3740; 350.4600