

光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法

甘雨^{1,2}, 张方^{1,2}, 朱思羽^{1,2}, 龚爽^{1,2}, 黄惠杰^{1,2}, 杨宝喜^{1,2*}

¹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;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对光刻机照明系统的实际应用需求, 提出了一种光瞳特性参数的评估算法。该算法通过对光瞳强度分布进行转换, 可以在不同照明模式下同时计算光瞳椭圆度、X 方向光瞳极平衡性、Y 方向光瞳极平衡性和四象限光瞳极平衡性等多种光瞳特性参数。以一种 28 nm 节点扫描光刻机照明系统的中继镜组为实例, 对其在传统照明模式下进行光瞳特性参数计算分析。仿真结果显示, 全视场光瞳椭圆度最大值为 0.95%, X 方向和 Y 方向光瞳极平衡性最大值分别为 0.18% 和 0.19%, 四象限光瞳极平衡性最大值为 0.66%, 均满足 28 nm 节点扫描光刻机实际指标需求。所提算法在光学设计阶段能快速评估光瞳性能。

关键词 测量; 光刻; 光学设计; 中继镜组; 光瞳特性参数

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0304007

Evaluation Algorithm of Pupil Characteristic Parameters in Lithography Illumination System

Gan Yu^{1,2}, Zhang Fang^{1,2}, Zhu Siyu^{1,2}, Gong Shuang^{1,2}, Huang Huijie^{1,2}, Yang Baoxi^{1,2*}

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An evaluation algorithm of the pupil characteristic parameters is proposed, aiming at the practical application requirements of lithography illumination system. By changing the intensity distribution of pupil, this algorithm can be used to simultaneously calculate the pupil ellipticity, non-balance_X, non-balance_Y, non-balance_quad, and other pupil characteristic parameters in different illumination modes. The relay lens set of the 28 nm node scanning lithography illumination system is used as an example and the pupil characteristic parameters under the traditional illumination mode are analyzed. The simulation results show that the maximum value of pupil ellipticity in the full field of view is 0.95%, and the maximum values of non-balance_X and non-balance_Y are 0.18% and 0.19%, respectively. In addition, the maximum value of non-balance_quad is 0.66%. These data satisfy the actual index requirements of the 28 nm node scanning lithography. The proposed algorithm can help to evaluate the pupil performances quickly at the optical design stage.

Key words measurement; lithography; optical design; relay lens; pupil characteristic parameters

OCIS codes 120.4640; 110.5220; 220.2945

1 引言

随着超大规模集成电路特征尺寸要求的不断缩小, 光刻技术得到了快速发展。投影式光刻机以其高效率、无损伤的工作特点成为当今主流光刻技术

最为密集、精度要求最高的一种大规模集成电路制造装备, 而照明系统是投影光刻机的核心部件之一^[1-4]。光源发出的光束经照明系统后照明掩模面, 再由投影物镜系统将掩模面上的图形复制到硅片表面^[5]。照明系统必须与投影系统协调工作才能实现

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2018-12-13; 录用日期: 2018-12-18

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(16520710500)、上海市科技人才计划(17YF1429500)

* E-mail: yangbx@siom.ac.cn

对纳米级线宽线条图形的精确复制。照明系统的优劣直接影响光刻系统的成像质量^[6]。除了输出光的波长、照明均匀性、光能量大小等,照明光瞳性能也是评判照明系统好坏的标准之一。为提高光刻分辨率和成像对比度并改善焦深,根据不同的掩模图形调整照明模式^[7-10]。光刻机照明系统通常采用衍射光学元件实现二极照明、环形照明、四极照明以及其他一些定制参数式的照明模式。然而,衍射光学元件的引入会使得照明光瞳的对称性变差,照明光瞳非对称性包括光瞳椭圆度和光瞳极平衡性^[11]。不同照明模式下的光瞳特性会影响光刻机套刻精度与临界尺寸均匀性,具体表现为:光瞳椭圆度会影响水平和垂直方向上的图形成像质量差异,光瞳极平衡性会影响图像位置偏移^[11-12],并且该影响会随着光刻分辨率的不断提高而逐渐突出。因此,在照明系统设计过程中,对光瞳特性的评估是很有必要的。目前常用的利用光学仿真或实验检测光瞳特性的方法需要花费大量的时间,本文提出一种能够快速评估光瞳椭圆度、X 方向光瞳极平衡性、Y 方向光瞳极平衡性和四

象限光瞳极平衡性等特性参数的算法,并以现有的一种中继镜组结构为例进行评估分析。

2 基本原理

2.1 光瞳特性参数定义

投影式光刻机照明系统结构如图 1 所示。光源经过一系列单元后照明掩模面,其中光束扩束与传输单元可对光源进行扩束,并可改变光束方向,光瞳整形单元的作用是通过调整衍射光学元件、变焦准直镜组和锥形镜组实现各种照明模式,照明均匀化单元用来实现特定分布的照明光场。扫描狭缝协助照明均匀化单元实现在掩模面上能量积分的均匀分布,与掩模台和硅片台同步运动^[1]。中继镜组负责将扫描狭缝上的照明光场成像到掩模面上,实现照明系统与投影物镜的衔接。通过计算照明系统光学元件组光瞳面的特性参数来评估照明系统的光瞳特性。不同照明模式下的光瞳特性主要包含内外相干因子、光瞳椭圆度、光瞳极平衡性、极方位角和极张角等参数^[13]。

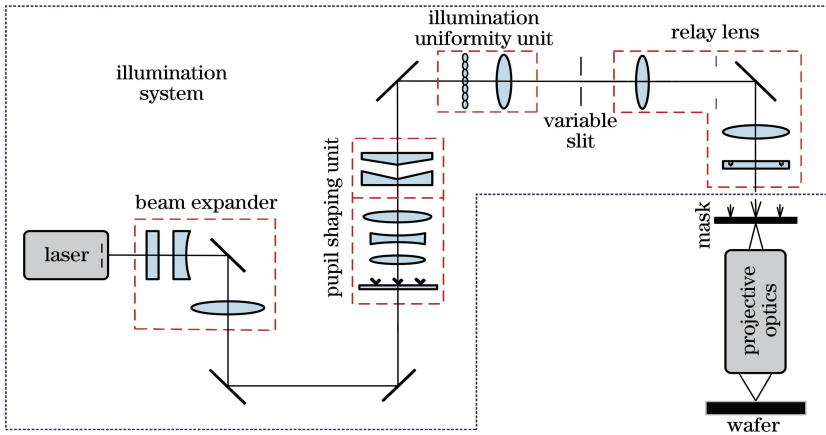


图 1 投影式光刻机的光学原理示意图

Fig. 1 Optical principle diagram of projection lithography machine

光瞳椭圆度分为 Horizontal-Vertical(HV)光瞳椭圆度和 Sagittal-Tangential(ST)光瞳椭圆度。HV 光瞳椭圆度定义为光瞳面上 X 方向(Horizontal)和 Y 方向(Vertical)之间的能量差异。ST 光瞳椭圆度定义为光瞳面上 S 方向(Sagittal)和 T 方向(Tangential)之间的能量差异。光瞳椭圆度用 $P_{\text{ellipticity}_{\text{HV}}}$ 和 $P_{\text{ellipticity}_{\text{ST}}}$ 表示:

$$\begin{cases} P_{\text{ellipticity}_{\text{HV}}} = \left| \frac{\sum E_{(Y)}}{\sum E_{(X)}} - 1 \right| \times 100\% \\ P_{\text{ellipticity}_{\text{ST}}} = \left| \frac{\sum E_{(S)}}{\sum E_{(T)}} - 1 \right| \times 100\% \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\sum E_{(X)}$ 、 $\sum E_{(Y)}$ 、 $\sum E_{(S)}$ 、 $\sum E_{(T)}$ 分别为图 2 所示的 X、Y、S、T 区域的积分总能量。

X 方向光瞳极平衡性用 $N_{\text{balance}_{\text{X}}}$ 表示:

$$N_{\text{balance}_{\text{X}}} = \frac{|E_{(X+)} - E_{(X-)}|}{E_{(X+)} + E_{(X-)}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: $E_{(X+)}$ 、 $E_{(X-)}$ 分别表示图 3(a) 所示的 X 正方向和 X 负方向区域的积分总能量。

Y 方向光瞳极平衡性用 $N_{\text{balance}_{\text{Y}}}$ 表示:

$$N_{\text{balance}_{\text{Y}}} = \frac{|E_{(Y+)} - E_{(Y-)}|}{E_{(Y+)} + E_{(Y-)}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $E_{(Y+)}$ 、 $E_{(Y-)}$ 分别表示图 3(b) 所示的 Y 正方向和 Y 负方向区域的积分总能量。

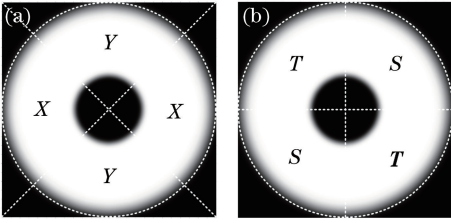


图 2 光瞳椭圆度示意图。(a) HV 光瞳椭圆度；
(b) ST 光瞳椭圆度

Fig. 2 Schematics of pupil ellipticity.

(a) HV pupil ellipticity; (b) ST pupil ellipticity

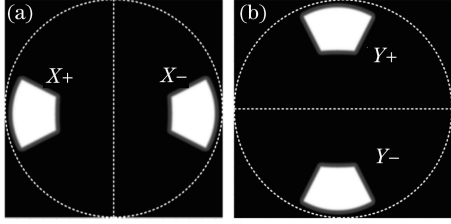


图 3 光瞳极平衡性示意图。(a) X 方向光瞳极平衡性；
(b) Y 方向光瞳极平衡性

Fig. 3 Schematics of pupil non-balance.

(a) Non-balance_X; (b) non-balance_Y

四象限光瞳极平衡性分为 0° 四象限光瞳极平衡性和 45° 四象限光瞳极平衡性。四象限光瞳极平衡性用 $N_{\text{balance_quad}}$ 表示：

$$N_{\text{balance_quad}} = \frac{\max[E_{(1)} \cdots E_{(4)}] - \min[E_{(1)} \cdots E_{(4)}]}{\max[E_{(1)} \cdots E_{(4)}] + \min[E_{(1)} \cdots E_{(4)}]} \times 100\%, \quad (4)$$

式中： $E_{(1)}$ 、 $E_{(2)}$ 、 $E_{(3)}$ 、 $E_{(4)}$ 分别表示图 4(a)、(b) 所示的 1, 2, 3, 4 区域的积分总能量。

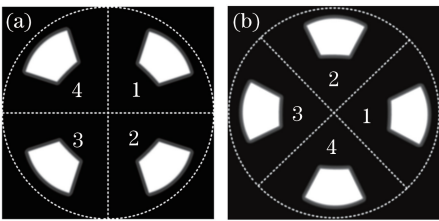


图 4 四象限光瞳极平衡性示意图。(a) 0° 四象限光瞳极平衡性；(b) 45° 四象限光瞳极平衡性

Fig. 4 Schematics of non-balance_quad.

(a) Non-balance_quad0; (b) non-balance_quad45

2.2 光瞳特性参数评估算法模型

结合光瞳特性参数定义，将光瞳在笛卡尔坐标系中等分为 $E_{(1)} \sim E_{(8)}$ 8 个区域，如图 5 所示。由 Code V 光学设计软件导出采样点光瞳强度数据，在笛卡尔坐标系中直接进行参数计算是最准确的。但由于传统照明、环形照明、二极照明和四极照明模式

都具备在极坐标系中的对称关系，所以选择将坐标系转换到极坐标系中计算各个照明模式的光瞳特性参数。直角坐标系 (x, y) 与极坐标系 (ρ, θ) 的对应转换关系为

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

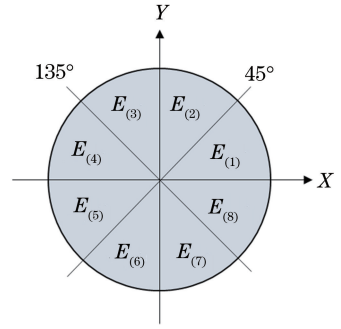


图 5 光瞳数据分区示意图

Fig. 5 Schematic of pupil data partition

在进行坐标转换时，极坐标系中的等间隔采样点无法与笛卡尔坐标系中采样点的位置一一对应，为了使两个坐标系下的计算结果更贴近，保证采样数据的准确性，需要引入最邻近插值法，即

$$P(\rho, \theta) = \text{nearest}[P(X, Y)], \quad (6)$$

式中： $P(\rho, \theta)$ 为极坐标系中的采样点强度； $P(X, Y)$ 为笛卡尔坐标系中的采样点强度；nearest(\cdot) 表示从笛卡尔坐标系 (X, Y) 中取最接近 (ρ, θ) 对应极坐标系中位置的强度值，如图 6 所示，星点代表极坐标系中的采样点在笛卡尔坐标系中的对应位置。

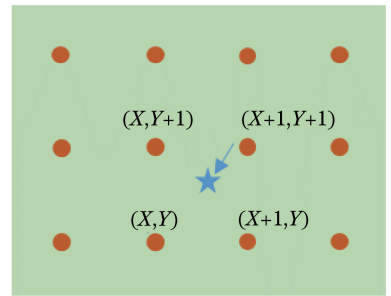


图 6 最邻近插值法示意图

Fig. 6 Schematic of nearest interpolation method

利用 Matlab 软件基于上述分区方法在极坐标系中计算光瞳椭圆度、X 方向光瞳极平衡性、Y 方向光瞳极平衡性和四象限光瞳极平衡性。评估流程如图 7 所示。

HV 光瞳椭圆度可表示为

$$P_{\text{ellipticity_HV}} = \text{abs} \left(\frac{E_{(1)} + E_{(8)} + E_{(4)} + E_{(5)}}{E_{(2)} + E_{(3)} + E_{(6)} + E_{(7)}} - 1 \right) \times 100\%, \quad (7)$$

式中 $\text{abs}(\cdot)$ 代表取绝对值。

ST 光瞳椭圆度可表示为

$$P_{\text{ellipticity_ST}} = \text{abs}\left(\frac{E_{(1)} + E_{(2)} + E_{(5)} + E_{(6)}}{E_{(3)} + E_{(4)} + E_{(7)} + E_{(8)}} - 1\right) \times 100\%。 \quad (8)$$

X 方向光瞳极平衡性可表示为

$$N_{\text{balance_X}} = \text{abs}\left(\frac{E_{(1)} + E_{(2)} + E_{(7)} + E_{(8)} - E_{(3)} - E_{(4)} - E_{(5)} - E_{(6)}}{E_{(1)} + E_{(2)} + E_{(3)} + E_{(4)} + E_{(5)} + E_{(6)} + E_{(7)} + E_{(8)}}\right) \times 100\%。 \quad (9)$$

Y 方向光瞳极平衡性可表示为

$$N_{\text{balance_Y}} = \text{abs}\left(\frac{E_{(1)} + E_{(2)} + E_{(3)} + E_{(4)} - E_{(5)} - E_{(6)} - E_{(7)} - E_{(8)}}{E_{(1)} + E_{(2)} + E_{(3)} + E_{(4)} + E_{(5)} + E_{(6)} + E_{(7)} + E_{(8)}}\right) \times 100\%。 \quad (10)$$

0° 光瞳四象限极平衡性可表示为

$$\begin{cases} N_{\text{balance_quad}0} = \frac{\max(A, B) - \min(A, B)}{\max(A, B) + \min(A, B)} \times 100\% \\ A = \max(E_{(1)} + E_{(2)}, E_{(3)} + E_{(4)}), \quad B = \max(E_{(5)} + E_{(6)}, E_{(7)} + E_{(8)}) \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $\max(\cdot)$ 代表取最大值; $\min(\cdot)$ 代表取最小值。

45° 光瞳四象限极平衡性可表示为

$$\begin{cases} N_{\text{balance_quad}45} = \frac{\max(C, D) - \min(C, D)}{\max(C, D) + \min(C, D)} \times 100\% \\ C = \max(E_{(2)} + E_{(3)}, E_{(4)} + E_{(5)}), \quad D = \max(E_{(6)} + E_{(7)}, E_{(8)} + E_{(1)}) \end{cases}。 \quad (12)$$

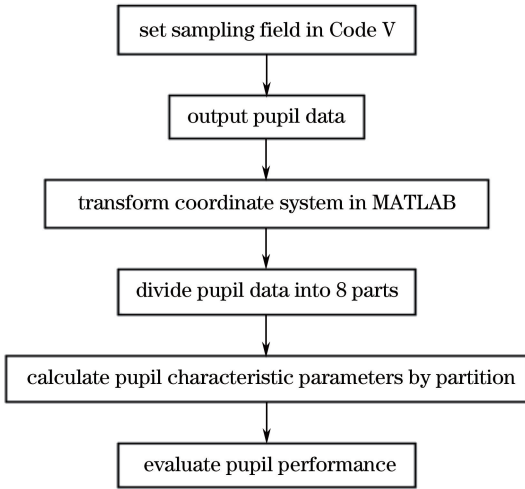


图 7 评估算法流程图

Fig. 7 Flow chart of evaluation algorithm

2.3 照明系统中继镜组原理

照明系统对光瞳性能要求很高, 满足设计指标需求的中继镜组是整体设计的前提。在步进扫描投影式光刻机中, 中继镜组的主要功能是在掩模面上形成严格的光束强度均匀的照明区域并将中间的平面精确成像在掩模板平面上。因此, 在设计过程中常需要评价掩模面的光瞳性能。中继镜组一般位于扫描狭缝与掩模台之间, 具有比较复杂的结构, 分为前组、后组和反射镜, 通常包含 7~12 个透镜。图 8 所示的 28 nm 节点扫描光刻机照明系统中继镜组

是双远心光路, 在像面能够产生规定尺寸的均匀照明区域, 并能适应不同孔径大小和形状的光束。中继镜组工作波长为 193.4 nm, 照明区域为 104 mm×22 mm, 中间的反射镜可将光路转折 90°。在子午面上, 同一视场点的上边缘光线与下边缘光线入射到反射镜上的角度并不相同, 光学薄膜对不同角度入射光的反射率不同, 因此, 镀有光学薄膜的反射镜对同一视场点的上边缘光线与下边缘光线的反射率也不同。

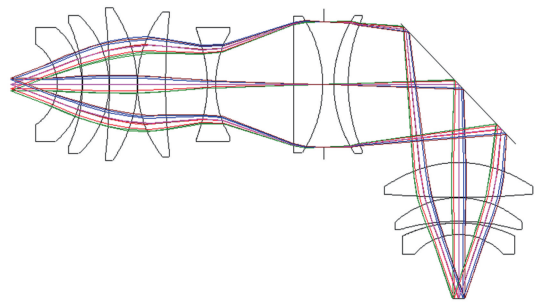


图 8 28 nm 节点扫描光刻机照明系统中继镜组结构图
Fig. 8 Structural diagram of relay lens set in illumination system for 28 nm node scanning lithography machine

根据不同镜面上入射角的大小, 设计了对应 $0^\circ \sim 20^\circ, 0^\circ \sim 30^\circ, 0^\circ \sim 50^\circ$ 入射角度范围的三种增透膜和 $35^\circ \sim 55^\circ$ 入射角度范围的反射膜来提高系统效率和均匀性, 光谱曲线如图 9 所示。

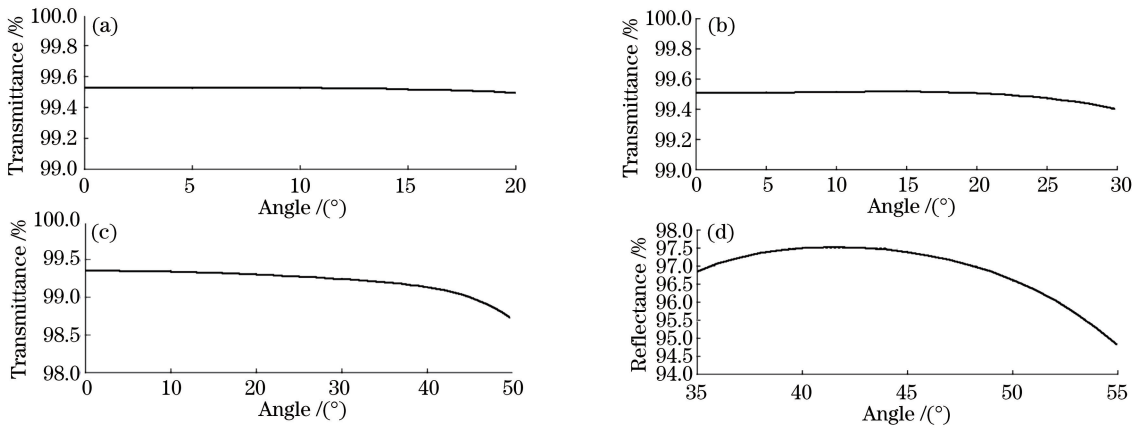


图 9 不同入射角下的多层膜系光谱曲线图。(a) 0°~20°, 增透膜; (b) 0°~30°, 增透膜; (c) 0°~50°, 增透膜; (d) 35°~55°, 反射膜

Fig. 9 Spectra of multilayer film under different incident angles. (a) 0°- 20°, anti-reflection film; (b) 0°-30°, anti-reflection film; (c) 0°-50°, anti-reflection film; (d) 35°-55°, reflection film

3 评估分析

以第 2 节所述 28 nm 节点扫描光刻机中继镜组结构为实例, 在传统照明模式下对掩模面的光瞳特性进行评估分析。为了全面评价中继镜组的光学性能, 在光学设计软件中按照如图 10 所示设置采样

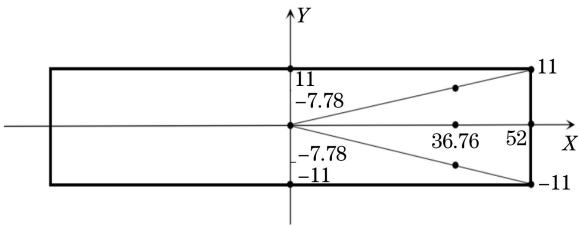


图 10 照明区域的采样视场点分布示意图

Fig. 10 Distribution schematic of sampling field of view points in lighting area

视场, 表示为 $F_1 \sim F_9$ 。归一化光瞳采样点数设置为 1024×1024 。

中继镜组中心视场和边缘视场的相对照度分别为 99.09 和 99.95, 该结果由光学设计软件综合考虑材料吸收、表面镀膜、不同视场光线的光程和系统像差等影响因素计算而得。可见照明均匀性已经得到较好的优化。评估得到不同视场下的光瞳图和光瞳特性参数值, 如图 11 和表 1 所示。中心视场点与轴上视场点光瞳强度呈对称分布, 所有视场点光瞳强度分布差异较小。28 nm 节点扫描光刻机照明系统的照明光瞳实际需求为: $P_{\text{ellipticity}} \leq 1\%$, $N_{\text{balance}_X} < 2\%$, $N_{\text{balance}_Y} \leq 2\%$, $N_{\text{balance_quad}} \leq 3\%$, 本结构所有视场的光瞳特性参数均在需求范围之内。除了 $F_7(52, 11)$ 、 $F_9(52, -11)$ 两个边缘视场的光瞳椭圆度较大外, 其余各视场的光瞳特性均较理想。

表 1 所设视场点光瞳特性参数值

Table 1 Pupil characteristic parameters of designed view points

| Parameter | F_1 | F_2 | F_3 | F_4 | F_5 | F_6 | F_7 | F_8 | F_9 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{\text{ellipticity_HV}} / \%$ | 0 | 0.018 | 0.018 | 0.007 | 0.330 | 0.028 | 0.645 | 0.004 | 0.906 |
| $P_{\text{ellipticity_ST}} / \%$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.014 | 0.945 | 0.014 | 0.694 |
| $N_{\text{balance}_X} / \%$ | 0 | 0 | 0 | 0.180 | 0.027 | 0.151 | 0.105 | 0.151 | 0.024 |
| $N_{\text{balance}_Y} / \%$ | 0 | 0.053 | 0.053 | 0 | 0 | 0.145 | 0.193 | 0.145 | 0.076 |
| $N_{\text{balance_quad0}} / \%$ | 0 | 0.054 | 0.054 | 0.181 | 0.026 | 0.296 | 0.664 | 0.296 | 0.424 |
| $N_{\text{balance_quad15}} / \%$ | 0 | 0.099 | 0.099 | 0.324 | 0.215 | 0.199 | 0.384 | 0.100 | 0.539 |

利用 LightTools 光学仿真软件评价光瞳特性, 将仿真结果与表 1 数据进行对比。仿真时在结构物面处添加 $104 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ 的矩形光源, 角度分布设置为均匀分布。在像面相应视场点位置处添加接收器, 接收器半径为 0.4 mm, 分辨率为 0.1° , 共追迹 21 亿根光线。Code V 光学设计软件运用的是真实

光线追迹的计算方法, LightTools 光学仿真软件运用的是蒙特卡罗模拟方法, 仿真用时长。仿真得到的掩模面光瞳特性参数值如表 2 所示。与表 1 数据相比, 光瞳椭圆度绝对误差小于 0.03%, X 方向光瞳极平衡性绝对误差小于 0.02%, Y 方向光瞳极平衡性绝对误差小于 0.05%, 四象限光瞳极平衡性绝

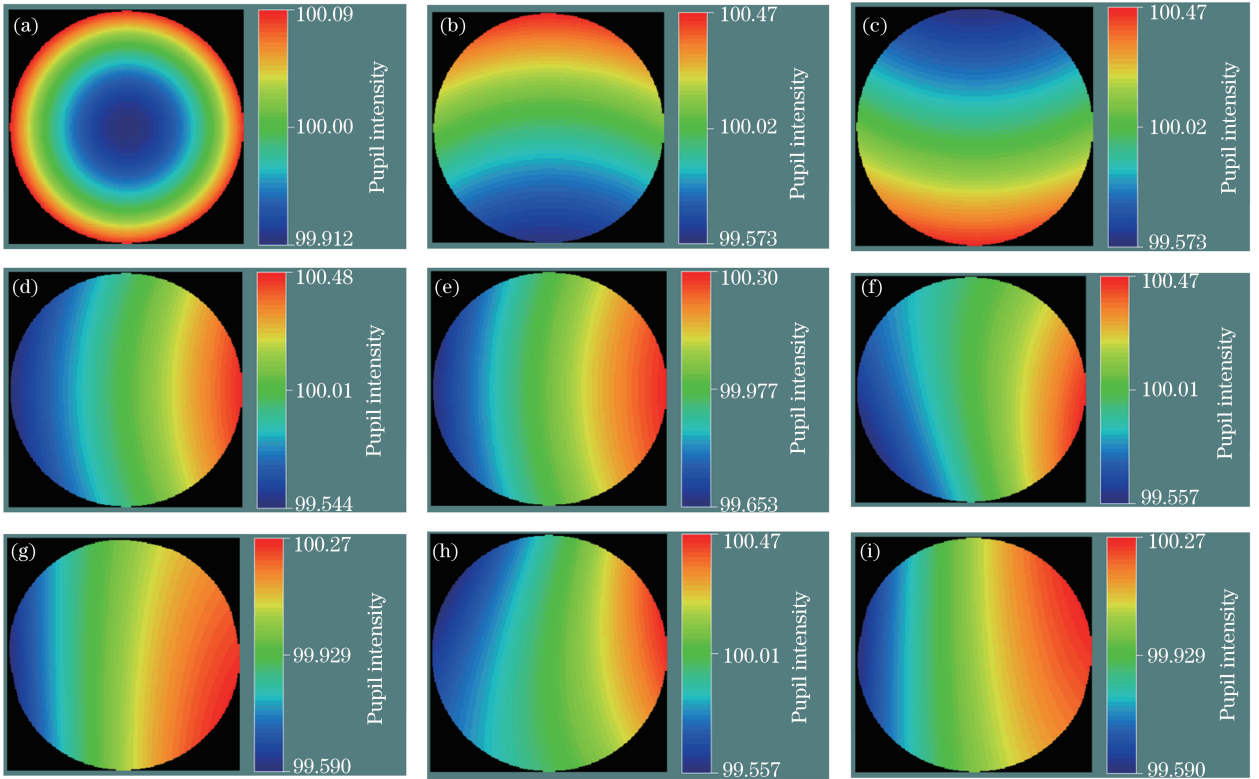


图 11 视场点光瞳图。(a) F_1 ; (b) F_2 ; (c) F_3 ; (d) F_4 ; (e) F_5 ; (f) F_6 ; (g) F_7 ; (h) F_8 ; (i) F_9

Fig. 11 Pupil maps of view points. (a) F_1 ; (b) F_2 ; (c) F_3 ; (d) F_4 ; (e) F_5 ; (f) F_6 ; (g) F_7 ; (h) F_8 ; (i) F_9

表 2 所设视场点光瞳特性参数的仿真值

Table 2 Simulation values of pupil characteristic parameters of designed view points

| Parameter | F_1 | F_2 | F_3 | F_4 | F_5 | F_6 | F_7 | F_8 | F_9 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P_{\text{ellipticity_HV}} / \%$ | 0.019 | 0.021 | 0.020 | 0.032 | 0.368 | 0.130 | 0.638 | 0.023 | 0.944 |
| $P_{\text{ellipticity_ST}} / \%$ | 0.022 | 0.022 | 0.041 | 0.011 | 0.022 | 0.031 | 0.957 | 0.035 | 0.725 |
| $N_{\text{balance_X}} / \%$ | 0.001 | 0.004 | 0.009 | 0.147 | 0.067 | 0.179 | 0.148 | 0.180 | 0.069 |
| $N_{\text{balance_Y}} / \%$ | 0.001 | 0.068 | 0.061 | 0.006 | 0.004 | 0.291 | 0.256 | 0.281 | 0.168 |
| $N_{\text{balance_quad0}} / \%$ | 0.013 | 0.047 | 0.049 | 0.257 | 0.098 | 0.370 | 0.704 | 0.361 | 0.436 |
| $N_{\text{balance_quad45}} / \%$ | 0.012 | 0.124 | 0.119 | 0.439 | 0.226 | 0.154 | 0.432 | 0.162 | 0.655 |

对误差小于 0.04%，均在可接受范围内。证明了评估算法运用在光学设计中的准确性。

此外在 X 方向设置 10 个视场点($X_1 \sim X_{10}$)进

行评估,可清楚地观察到该方向光瞳特性参数的变化,如图 12 所示。中心视场光瞳性能最好,边缘视场光瞳性能最差。其中 X 方向光瞳极平衡性和四

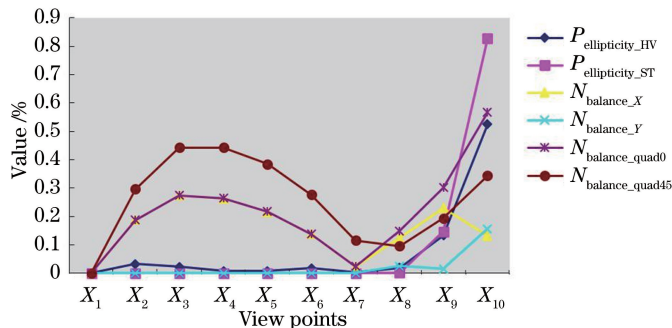


图 12 X 方向视场点光瞳特性参数曲线图

Fig. 12 Curves of pupil characteristic parameters of view points at X direction

象限光瞳极平衡性出现了从中心视场到边缘视场先变差再变好又逐渐变差的明显趋势,该变化趋势可能是由系统光阑球差导致的。

4 结 论

提出了一种光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法,该算法通过合理划分光瞳区域,利用最邻近插值法将由光学设计软件导出的采样数据转换至极坐标系下,可同时计算光瞳椭圆度、X 方向光瞳极平衡性、Y 方向光瞳极平衡性和四象限光瞳极平衡性。所提算法适用于不同的照明模式。针对一种 28 nm 节点扫描光刻机中继镜组结构,利用算法对其掩模面光瞳特性进行评估,计算结果基本满足光刻机实际指标需求。通过合理设置视场点还可观测特定方向上光瞳特性参数的变化趋势,为推断系统像差提供参考。该评估算法与常用的光学仿真和实验检测相比,在光学设计阶段能快速、准确地评估光瞳特性,减少了工作量,对光刻机照明系统的初步设计和后续实验调试工作具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] Yao H M, Hu S, Xing T W, *et al.* Optical projection exposure nanofabrication technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006: 45-61.
姚汉民, 胡松, 邢廷文, 等. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 45-61.
- [2] 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. 高分辨率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.
- [3] Matsuyama T, Ohmura Y, Williamson D M. The lithographic lens: its history and evolution[J]. SPIE, 2006, 6154: 614503.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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. 光刻机光瞳整形衍射光学元件远场多参数检测方法[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0416001.
- [7] 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.
- [8] Childers J E, Baker T, Emig T, *et al.* Advanced testing requirements of diffractive optical elements for off-axis illumination in photolithography[J]. SPIE, 2009, 7430: 74300S.
- [9] Kamon K, Miyamoto T, Myoi Y, *et al.* Photolithography system using annular illumination[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(11B): 3021-3029.
- [10] Hu Z H, Zhu J, Yang B X, *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, 朱菁, 杨宝喜, 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.
- [11] Guo L P, Wang X Z, Huang H J. Impact of illumination pupil filling unbalance on imaging performance of lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 885-890.
郭立萍, 王向朝, 黄惠杰. 照明光瞳非对称性对光刻成像质量的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 885-890.
- [12] Chen A, Lin W M, Jiang H B. Impact of non-ideal illumination pupil on imaging performance of lithography[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(2): 87-92.
陈安, 林妩媚, 江海波. 非理想照明光瞳对光刻成像质量的影响[J]. 光电工程, 2013, 40(2): 87-92.
- [13] Rui D W, Shi Z G, Yuan W Q, *et al.* Pupil non-balance calibration for lithographic lens[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0916002.
芮大为, 史振广, 袁文全, 等. 光刻物镜光瞳极平衡性标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0916002.