

深紫外光刻照明系统的微反射镜阵列公差分析

尹超, 李艳秋*, 闫旭, 刘克, 刘丽辉

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 为满足 45 nm 及其以下节点光刻技术对照明系统的需求, 将深紫外光刻照明系统的光束整形单元所采用的微反射镜阵列(MMA)作为关键器件, 以实现满足光源-掩模联合优化(SMO)技术需求的任意照明光源。根据 MMA 结构参数和加工制造调整特性, 分析 MMA 角度误差类型。在此基础上, 利用蒙特卡罗公差分析法模拟实际加工制造调整的过程, 通过分析微反射镜角度误差对曝光结果的影响, 制定了满足曝光要求的角度公差。结果显示, 当 MMA 在正交方向上的角度调整公差和加工角度公差分别在 $(\pm 0.04^\circ, \pm 0.06^\circ)$ 、 $(\pm 0.04^\circ, \pm 0.04^\circ)$ 范围内时, 系统曝光得到的特征尺寸误差(CDE)在 98.1%的置信概率下小于 0.33 nm。

关键词 光学设计; 公差分析; 微反射镜阵列; 深紫外光刻

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0722001

Tolerance Analysis of Micromirror Array in Deep Ultraviolet Lithography Illumination System

Yin Chao, Li Yanqiu*, Yan Xu, Liu Ke, Liu Lihui

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract To meet the illumination system requirements of 45 nm and below node lithography technology, the micromirror array (MMA) used in the beam shaping unit of deep ultraviolet lithography illumination system is used as the key device to produce the freeform source required by the source-mask optimization(SMO) technology. Based on the structural parameters of MMA as well as the manufacture and adjustment characteristics, the angle error types of MMA are analyzed. On this basis, the Monte-Carlo tolerance analysis method is used to simulate the actual manufacture and adjustment processes. After the influence of the micromirror angle error on the exposure results is investigated, the angle tolerance that meets the exposure requirements is established. The results show that when the angle adjustment tolerance and the process angle tolerance of MMA in the orthogonal direction are within the scope of $(\pm 0.04^\circ, \pm 0.06^\circ)$ and $(\pm 0.04^\circ, \pm 0.04^\circ)$, respectively, the critical dimension error (CDE) obtained by exposure is less than 0.33 nm at a confidence probability of 98.1%.

Key words optical design; tolerance analysis; micromirror array; deep ultraviolet lithography

OCIS codes 220.2945; 220.4830; 140.7240

1 引 言

光刻系统中需采用分辨率增强技术(RET)提高光刻分辨率。面对 45 nm 及其以下的节点需求, 照明系统采用的 RET 主要为光源-掩模联合优化(SMO)技术^[1], 将其结合多重曝光可实现 14~7 nm 节点^[2]。照明系统的光束整形单元的主要作用是在光瞳平面处得到 SMO 技术所需要的光源模式, 然而采用衍射光学元件(DOE)实现的 SMO 光

源类型有限^[3], 且实现不同的光源模式需更换不同的 DOE, 其衍射效率也会造成光能损失。2009 年, Mulder 等^[4]设计了基于微反射镜阵列(MMA)的光束整形单元, 该系统可以在不更换光学元件的情况下切换光源模式, 提高了能量利用率。2014 年, Wei 等^[5]采用混合设计方法优化了微反射镜阵列(MMA)在正交方向上的角度, 该方法能够更加快速、精确地获得光斑的最优位置。

然而光学元件在加工制造中存在误差, 导致系

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-11-13; 录用日期: 2019-12-26

基金项目: 自然科学基金(61675026)、国家科技重大专项(2017ZX02101006-001)

* E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn

统实现的光源模式与设计的光源模式存在差异,当特征尺寸(CD)降低至 45 nm 以下时,光学系统误差对曝光效果的影响越来越显著。2007 年,Gao 等^[6]采用椭圆度和极平衡度等指标评价光源模式,通过模拟仿真曝光判断不同误差类型下光源模式对 CD 的影响。2008 年,Flagello 等^[7]提出采用方均根(RMS)值对误差光源模式进行度量的方法,进而对不同光源模式进行曝光仿真以分析 RMS 值与 CD 误差(CDE)的关系。但是这些研究并未结合光学元件的结构参数,只是预测实际光源模式可能出现的误差。2008 年,Smirnov 等^[8]提出了一种多参数概率方法对光刻照明系统进行公差分析。2015 年,Wang 等^[9]分析了照明系统中光学元件制造的误差。然而这些研究主要针对的是以 DOE 为关键器件的照明系统。目前基于 MMA 的光束整形单元公差分析研究鲜有报道。

本文以基于 MMA 的光束整形单元为研究对象,结合 MMA 加工调整特性分析 MMA 存在的角度误差类型。通过研究存在角度误差时在光瞳平面处形成的光源模式曝光的 CD 结果,确定 MMA 所能接受的角度误差,并对实际 MMA 的加工制造调整提出建议。采用蒙特卡罗法模拟 MMA 实际加工调整中出现的角度误差对光源模式的影响,利用 Matlab 软件计算存在角度误差时的照明光源,并将误差光源模式导入 Prolith 进行曝光仿真,通过得到

的 CD 误差来判断角度误差是否被接受。在确定角度公差后,通过对 LightTools 仿真得到的光源模式进行曝光,验证所制定的角度公差的合理性。

2 深紫外光刻照明系统的光束整形单元

课题组设计的深紫外(DUV)光刻照明系统的光束整形单元结构如图 1 所示。微透镜阵列将入射平行光分割为数千个子光束;调整微反射镜在正交方向上的角度,子光束被反射至转向聚光镜,并平行出射至光瞳平面;在光瞳平面处对子光束进行叠加,得到满足设计需求的光源模式。微反射镜角度直接决定了子光束在光瞳平面上的位置,相比其他结构参数,角度对子光束位置的影响起主导作用,通过调整微反射镜角度可以得到不同类型的照明模式。MMA 的主要设计指标如表 1 所示。

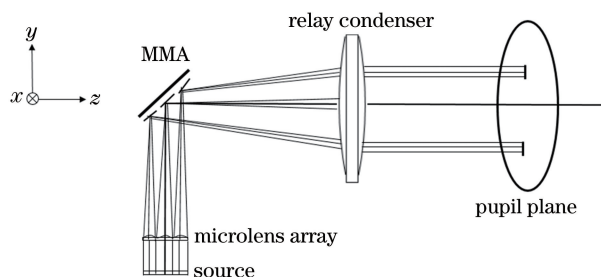


图 1 光束整形单元结构图

Fig. 1 Layout of beam shaping unit

表 1 MMA 的主要设计指标

Table 1 Main design specifications of MMA

Parameter	Number	Size	Gap	Radius
Value	71×71	0.500 mm×0.707 mm	0.0500 mm×0.0707 mm	+∞

为了装调简单,便于研究重力产生的透镜应力双折射,光学系统的光轴一般设置为水平和垂直方向。使用 MMA 折转光路时,其基底理想倾角为 45°。子光束经过微透镜阵列聚焦后入射至 MMA,为了保证镜面能够完整地接收聚焦后的子光束,微反射镜在正交方向的尺寸保持 $\sqrt{2}$ 倍的关系。微反射镜均共用一个基底,其旋转角度特性如图 2 所示,其中 α 为绕 x 轴的旋转角, β 为绕微反射镜中轴的旋转角,微反射镜平行纸面方向的尺寸为 0.707 mm,垂直于纸面方向的尺寸为 0.5 mm。

设入射光线方向向量为 \mathbf{A} ,微反射镜的平面法向量为 \mathbf{N} ,根据矢量形式折反射定律,反射光线方向向量 \mathbf{A}'' 的表达式为

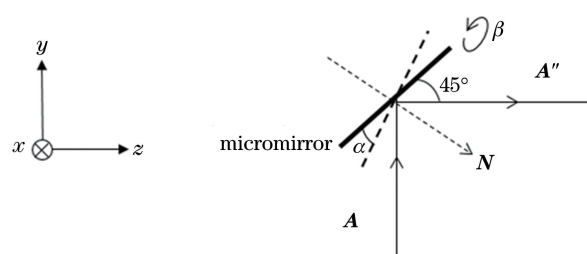


图 2 微反射镜旋转角度特性及折转光路示意图

Fig. 2 Schematic of rotation angle characteristic and reflective light path of micromirror

$$\mathbf{A}'' = \mathbf{A} - 2\mathbf{N}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{A}) \quad (1)$$

当微反射镜旋转角度为 (α, β) 时,根据(1)式和近轴公式,计算可得反射光线的偏转角为 $(2\alpha, \sqrt{2}\beta)$ 。

其他元件的主要设计指标如表 2 所示。

表 2 其他元件的主要设计指标

Table 2 Main design specification of other elements

Parameter	Focus of microlens / mm	Focus of relay condenser / mm	Diameter of pupil plane / mm
Value	164.7	1000	150

几何光学中的像高与转向聚光镜焦距 f' 的关系为

$$\begin{cases} y = f' \times \tan 2\alpha \\ x = f' \times \tan \sqrt{2}\beta^\circ \end{cases} \quad (2)$$

结合设计指标,当像高为 75 mm,转向聚光镜焦距为 1000 mm 时,计算可得 α 为 2.14° , β 为 3.03° 。微透镜子孔径与转向聚光镜构成望远系统,根据子孔径和焦距大小,可得到光瞳平面处子光束边长为 3.04 mm 的方形光斑。在 LightTools

表 3 微反射镜角度仿真结果

Table 3 Simulation results of angle of micromirror

Rotation angle (α, β) / ($^\circ$)	(0, 0)	(2.12, 0)	(-2.12, 0)	(0, 3)	(0, -3)
Center coordinate (x, y) / mm	(0, 0)	(0, -74.23)	(0, 74.23)	(-74.23, 2.25)	(74.23, 2.25)

3 MMA 的角度公差分析

3.1 MMA 角度误差类型

为了满足照明系统可实现任意光源模式的设计需求,需在正交方向上独立调整微反射镜,即需要实现倾斜翻转(TT)模式;另外,需在一定角度范围内调整微反射镜,因此应采用模拟信号驱动;同时在光刻机恒温环境条件下,MMA 需采用静电驱动器的形式^[10]。这种类型的 MMA 主要存在加工角度误差和角度调整误差。加工角度误差是指 MMA 镜面经过加工封装后,其实际角度值与理想设计角度值之间的偏差^[11]。角度调整误差是指对 MMA 施加电压后,微反射镜单元会产生一定程度的倾斜,其实际倾斜角度值与理想预设值之间的偏差。在相同的加工工艺下,微反射镜所需旋转的角度越大,其可能存在的角度调整误差比旋转角度较小的单元更大^[12]。

3.2 光刻照明光源模式的评价函数

光刻照明光源评价函数主要包括椭圆度、极平衡度及 RMS。椭圆度和极平衡度是将整个照明光瞳分割为四个区域,以不同区域光强之和的比值作为光源模式的评价函数,适用于离轴照明(OAI)这种在光瞳平面具有规律性分布的光源模式。RMS 描述的是点对点的光强变化,对光源模式误差更加

中对单个微反射镜在正交方向上的角度数据进行仿真,采用中心坐标表示子光束在光瞳平面处的位置,其结果如表 3 所示。根据仿真结果,结合子光束光斑大小,微反射镜角度调整范围可定为 $\alpha \in (-2.12^\circ, 2.12^\circ)$, $\beta \in (-3^\circ, 3^\circ)$ 。根据(2)式,当微反射镜偏转 0.01° 时,光瞳平面处子光束最大偏移距离为 0.3491 mm,微反射镜在此角度范围内以 0.01° 为步长调整倾角,既能保证子光束入射至光瞳平面处任意位置,又满足光斑移动位置敏感度的要求,同时便于测量 MMA 的角度特性。然而 MMA 在实际加工、调整过程中存在角度误差,这些误差随机分布于 5041 个微反射镜,改变子光束入射至光瞳平面的位置,会使得在光瞳平面上得到的光源模式产生误差,进而影响最终的光刻曝光结果。

敏感,适用于光强自由分布的 SMO 光源模式。RMS 的表达式为

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N |\Delta I(k)|^2}{N}}, \quad (3)$$

式中: $\Delta I(k)$ 为实际光源与目标光源在第 k 个网格点的光强差; N 为光瞳平面处划分的网格点数目。

光瞳平面处得到的光源模式是 5041 个子光束叠加的结果,设第 n 个子光束在光瞳平面的空间光强分布为 $I_s(x_n, y_n)$, 则光瞳平面上的光源模式光强分布 $I_d(x, y)$ 的表达式为

$$I_d(x, y) = \sum_{n=1}^{5041} I_s(x_n, y_n), \quad (4)$$

式中: (x_n, y_n) 为第 n 个子光束在光瞳平面的中心坐标。MMA 存在角度误差时,会引起光瞳平面处对应子光束空间位置的变化,设此时子光束为 $I_s(x'_n, y'_n)$, 其中 (x'_n, y'_n) 表示由于角度误差,子光束位置改变后的中心坐标,可根据近轴几何光学得到:

$$\begin{cases} x'_n = x_n + f' \times \tan(\sqrt{2}\Delta\beta_n) \\ y'_n = y_n + f' \times \tan(2\Delta\alpha_n) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\alpha_n, \Delta\beta_n$ 分别为第 n 个微反射镜 α 和 β 的误差角度。此时光瞳平面处的光强分布为

$$I'_d(x, y) = \sum_{n=1}^{5041} I_s(x'_n, y'_n). \quad (6)$$

照明系统的误差光源模式 RMS 为

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{201} \sum_{j=1}^{201} [I_i(x_i, y_j) - I'_d(x_i, y_j)]^2}{201 \times 201}}, \quad (7)$$

式中: $I_i(x_i, y_j)$ 为目标光源模式在光瞳平面网格点处 (x_i, y_j) 的光强; $I'_d(x_i, y_j)$ 为误差光源模式在光瞳平面网格点处 (x_i, y_j) 的光强。结合子光束在光瞳平面处的光斑大小和微反射镜角度对子光束位置的影响, 将光瞳平面划分为 201×201 个网格。

尽管 RMS 可以表征光源模式误差的大小, 然而并不能通过 RMS 的具体数值来判断光源模式的误差大小是否能够被接受。在不考虑物镜像差时, RMS 与 CDE 呈正线性相关^[7], 因此可将 RMS 作为中间参考值, 之后利用曝光仿真得到 CD 性能, 通过 CDE 判断这些误差光源模式是否被接受。

3.3 MMA 公差分析方法

蒙特卡罗法根据光学系统各元件加工尺寸的实际分布指定一个公差范围, 并在该范围内产生一个随机数以模拟实际生产中可能存在的公差, 计算该公差下评价函数的变化。对系统进行多次抽样模

拟, 将模拟结果进行统计得到评价函数的概率分布。蒙特卡罗法需要在理想角度数据基础上引入随机误差角度, 以模拟实际加工调整的情况。通过研究不同角度误差大小情况下的 CD 性能, 得到误差角度对 CD 的敏感度。加工角度误差和角度调整误差随机存在于 MMA 上的 5041 个微反射镜中, 分析这两种误差时需要确定其概率密度函数(PDF)。

对于加工角度误差, 其 PDF 是高斯分布形式^[13]。假定 MMA 最大加工角度误差为 γ , 此时单个微反射镜加工角度误差的 PDF 为

$$f(\Delta\theta) = A_p \frac{3}{\gamma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{3\Delta\theta}{\gamma}\right)^2/2\right], \quad -\gamma \leq \Delta\theta \leq \gamma, \quad (8)$$

式中: A_p 为归一化系数; $\Delta\theta$ 为加工角度误差。

微反射镜旋转角度越大, 角度调整误差更大^[12]。根据 MMA 的角度调整特性, 提出了以对称式双高斯分布作为角度调整公差的 PDF。假定微反射镜的最大调整角度为 θ_{\max} , 微反射镜理想调整角度为 θ , 则单个微反射镜角度调整误差的 PDF 为

$$f(\Delta\theta) = \begin{cases} A \frac{3}{\gamma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\left[\frac{3(\Delta\theta - \gamma\theta/\theta_{\max})}{\gamma}\right]^2/2\right\}, & 0 \leq \Delta\theta \leq \gamma \\ A \frac{3}{\gamma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\left[\frac{3(\Delta\theta + \gamma\theta/\theta_{\max})}{\gamma}\right]^2/2\right\}, & -\gamma \leq \Delta\theta < 0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中: A 为归一化系数。

由于同种误差类型下的误差光源模式 RMS 越大, 其曝光的 CDE 越大。对 MMA 角度误差进行模拟时, 取 1000 次模拟分析中 RMS 最大时的误差光源模式进行曝光仿真, 得到 CD 性能, 并将其作为该误差角度情况下系统的曝光结果。通过多次仿真得到系统在不同角度误差情况下的曝光性能, 根据 CD 结果制定合适的角度公差数据。具体流程图如图 3 所示。

4 光刻仿真结果与分析

采用本课题组优化的 SMO 光源^[14-15]进行模拟仿真分析, 选取三种不同的 SMO 光源模式, 通过上述方法得到误差光源模式后, 进一步进行曝光仿真, 得到曝光的 CD 结果。三种光源模式(QI、DI、Zernike)的光强分布如图 4 所示。

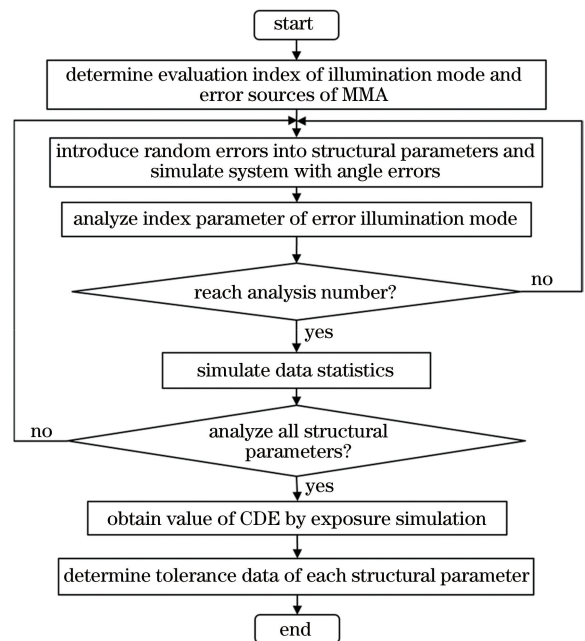


图 3 MMA 公差分析流程图

Fig. 3 Flow chart of tolerance analysis of MMA

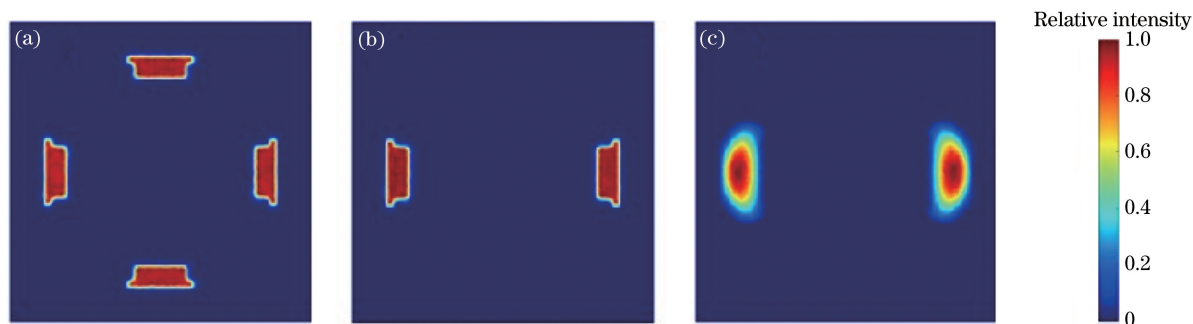


图 4 照明模式的光强分布。(a) QI;(b) DI;(c) Zernike

Fig. 4 Intensity distributions of illumination modes. (a) QI; (b) DI; (c) Zernike

4.1 理想角度下的曝光仿真结果

在无角度误差情况下,三种光源在一维掩模 14 nm节点(CD为 28 nm,pitch 值为 110 nm)、数值孔径(NA)为 1.35 的浸没式物镜条件下的仿真曝光结果如表 4 所示。

4.2 角度误差下的曝光仿真结果

在三种不同光源模式下,分别对 MMA 存在不同种类、不同角度误差大小时得到的照明模式进行曝光仿真分析。由于每个子单元需要在正交方向上旋转且相互独立,需要对 α 、 β 存在不同角度误差时

的情况进行分析。当 MMA 存在角度调整误差和加工角度误差时,不同误差角度和曝光的 CDE 结果分别如图 5、6 所示。

表 4 理想照明模式的曝光结果

Table 4 Exposure results of ideal illumination mode

Illumination mode	CDE / %	$\Delta d_{CD}/nm$
QI	0.96	0.269
DI	1.06	0.297
Zernike	0.20	0.056

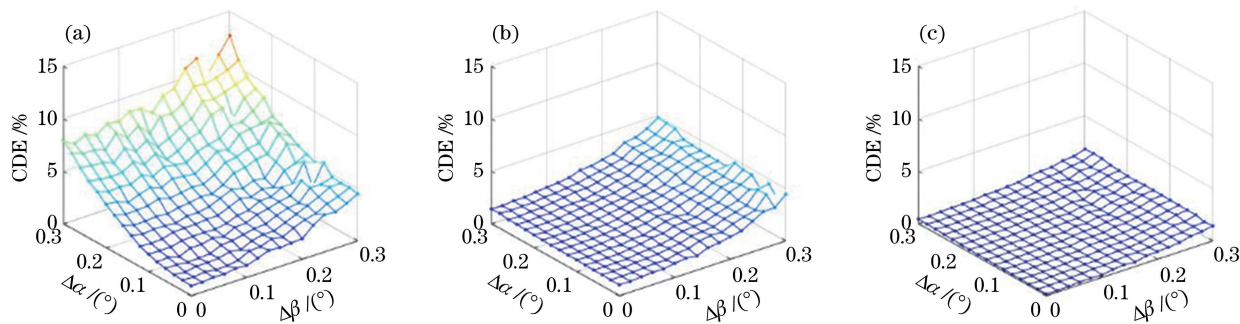


图 5 三种光源模式下角度调整误差的曝光结果。(a) QI;(b) DI;(c) Zernike

Fig. 5 Exposure results of angle adjustment error for three kinds of illumination modes. (a) QI; (b) DI; (c) Zernike

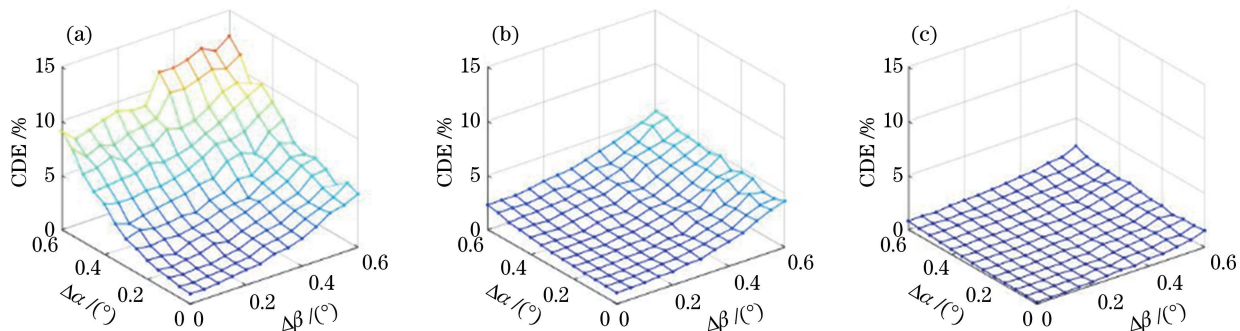


图 6 三种光源模式下加工角度误差的曝光结果。(a) QI;(b) DI;(c) Zernike

Fig. 6 Exposure results of process angle error for three kinds of illumination modes. (a) QI; (b) DI; (c) Zernike

不同照明模式对角度误差的敏感度不同,对比同一种角度误差的仿真结果可知,CDE 对三种照明

模式的敏感度由大到小排列为 QI、DI、Zernike。对比相同照明模式下不同角度误差类型可知,CDE 对

角度调整误差更加敏感。在不同照明模式下,尽管误差角度大小不同,其曝光的 CD 结果差异较大,但在角度误差较小时,不同照明模式、不同角度误差曝光的结果相差较小。根据曝光结果,单独考虑不同角度误差类型时,在 2% 以内的 CDE ($\Delta d_{CD} \leq 0.56 \text{ nm}$) 对应的角度误差值 ($\Delta\alpha, \Delta\beta$) 的范围分别为:角度调整公差 ($\pm 0.1^\circ, \pm 0.1^\circ$),加工角度公差

($\pm 0.15^\circ, \pm 0.15^\circ$)。

考虑到 MMA 需要在正交方向上进行调整,其 CDE 对 α 和 β 的灵敏度并不相同,因此需要制定不同的公差范围。在 QI 光源模式情况下,分析单独存在 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 时的曝光结果,其结果如图 7 所示。对于不同的角度误差类型,CDE 对 $\Delta\alpha$ 更加敏感,这意味着需要对 α 制定更加严格的公差。

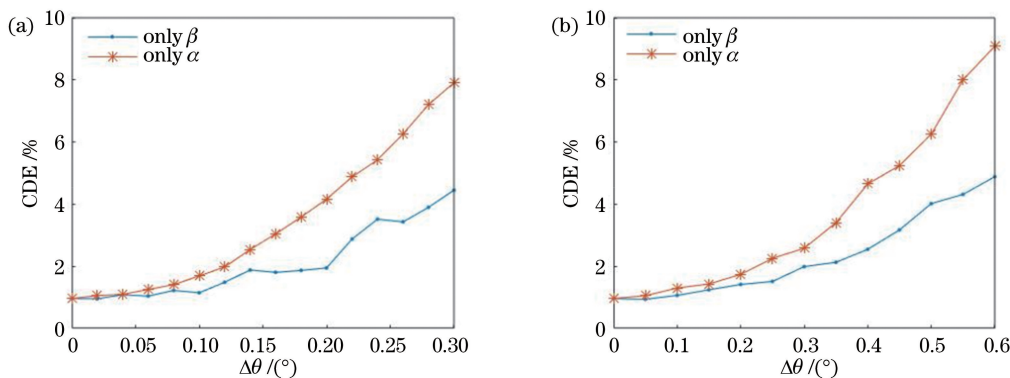


图 7 不同 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 条件下的曝光结果。(a)角度调整误差;(b)加工角度误差

Fig. 7 Exposure results for different $\Delta\alpha$ and $\Delta\beta$. (a) Angle adjustment error; (b) process angle error

在实际曝光过程中,这两种角度误差应该是共同作用的,结合实际 MMA 加工制造能力,微反射镜加工角度公差可降至 0.04° ^[16]。综合以上因素,制定 (α, β) 的角度公差分别为:角度调整公差 ($\pm 0.04^\circ, \pm 0.06^\circ$),加工角度公差 ($\pm 0.04^\circ, \pm 0.04^\circ$)。此时对三种照明模式进行模拟仿真分析,并将在 Matlab 和 LightTools 中得到的误差光源模式导入 Prolith 进行曝光仿真,得到 CD 曝光的最差结果,如表 5、6 所示。

表 5 Matlab 仿真误差照明模式的曝光结果

Table 5 Exposure results of error illumination mode simulated by Matlab

Illumination mode	CDE / %	$\Delta d_{CD} / \text{nm}$
QI	1.20	0.336
DI	1.21	0.339
Zernike	0.28	0.078

表 6 LightTools 仿真误差照明模式的曝光结果

Table 6 Exposure results of error illumination mode simulated by LightTools

Illumination mode	CDE / %	$\Delta d_{CD} / \text{nm}$
QI	1.35	0.378
DI	1.23	0.344
Zernike	0.28	0.078

在该公差下照明系统 Δd_{CD} 的累计概率分布如

图 8 所示。各种照明模式的 Δd_{CD} 在 98.1% 的置信概率下小于 0.33 nm,能够保证在 14 nm 节点条件下的曝光需求。

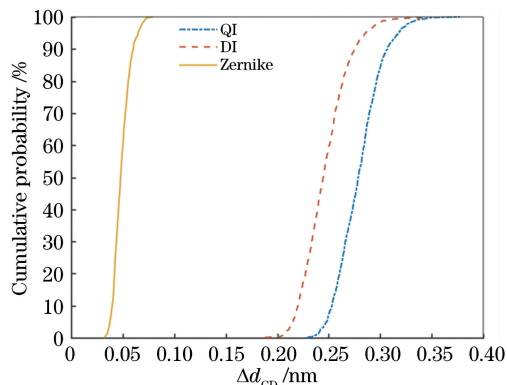


图 8 公差容限下的 Δd_{CD} 累计概率分布

Fig. 8 Cumulative probability distribution of Δd_{CD} under tolerance

5 结 论

针对实验室设计的与数值孔径为 1.35 的物镜匹配的 DUV 照明系统,分析了光刻照明系统的光束整形单元中 MMA 存在的角度误差。根据系统中存在的角度误差特性,采用蒙特卡罗法进行公差分析。同时,结合当前 MMA 加工制造的调整能力,制定了合理的角度公差。结果表明,MMA 角度误差在公差范围内,系统曝光得到的 Δd_{CD} 在 98.1% 的置信概率下小于 0.33 nm。在 LightTools 和

Prolith 中的仿真结果表明,在该公差范围内,曝光效果满足要求,MMA 实际可制造,为14 nm及其以下节点 DUV 光刻照明系统的工程应用提供了重要的技术支持。

参 考 文 献

- [1] Socha R, Shi X L, Lehoty D. Simultaneous source mask optimization (SMO)[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5853: 180-193.
- [2] de Graaf R, Weichselbaum S, Droste R, et al. NXT: 1980Di immersion scanner for 7 nm and 5 nm production nodes [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9780: 978011.
- [3] Carriere J, Stack J, Childers J, et al. Advances in DOE modeling and optical performance for SMO applications[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 764025.
- [4] Mulder M, Engelen A, Noordman O, et al. Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7520: 75200Y.
- [5] Wei L D, Li Y Q. Hybrid approach for the design of mirror array to produce freeform illumination sources in immersion lithography[J]. Optik, 2014, 125(20): 6166-6171.
- [6] Gao W M, de Winter L. Sensitivity of hyper-NA immersion lithography to illuminator imperfections [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652039.
- [7] Flagello D G, Geh B, Socha R, et al. Understanding illumination effects for control of optical proximity effects (OPE) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6924: 69241U.
- [8] Smirnov S, Catey E. Probabilistic method for multiparameter tolerancing in illuminator design[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7068: 706802.
- [9] Wang J, Zhang F, Song Q, et al. Fabrication error analysis for diffractive optical elements used in a lithography illumination system [J]. Optical Engineering, 2015, 54(4): 045102.
- [10] Song Y P, Panas R M, Hopkins J B. A review of micromirror arrays[J]. Precision Engineering, 2018, 51: 729-761.
- [11] Ataman C, Lani S, Noell W, et al. Fabrication and characterization of 3D integrated 2 DOF micromirror arrays for excessive thermal loads [C]//2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, January 23-27, 2011, Cancun, Mexico. New York: IEEE, 2011: 684-687.
- [12] Mi X Y, Soneda H, Okuda H, et al. A multi-chip directly mounted 512-MEMS-mirror array module with a hermetically sealed package for large optical cross-connects[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2006, 8(7): S341-S346.
- [13] Haspeslagh L, de Coster J, Pedreira O V, et al. Highly reliable CMOS-integrated 11MPixel SiGe-based micro-mirror arrays for high-end industrial applications [C]//2008 IEEE International Electron Devices Meeting, December 15-17, 2008, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2008: 4796779.
- [14] Guo X J, Li Y Q, Dong L S, et al. Parametric source-mask-numerical aperture co-optimization for immersion lithography [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(4): 043013.
- [15] Sheng N Y, Li E Z, Sun Y Y, et al. Mitigating the impact of mask absorber error on lithographic performance by lithography system holistic optimization [J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1275.
- [16] Oka Y, Shinozaki R, Terao K, et al. "assist-free" assembly technique of standing optical devices on soft spring actuator stages [C]//2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), January 26-30, 2014, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2014: 433-436.