

## 光刻机环状多分区高能量利用率光瞳校正研究

朱思羽<sup>1,2</sup>, 杨宝喜<sup>1,2</sup>, 马晓喆<sup>1,2</sup>, 张方<sup>1\*\*</sup>, 程伟林<sup>1</sup>, 牛志元<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** 光刻机的照明光瞳性能对曝光图形质量和套刻精度均有重要影响。照明光瞳由光刻机照明系统产生,在光刻机长时间使用后,照明光瞳的性能会逐渐劣化,需要采用光瞳校正手段来改善照明光瞳的性能。本文提出一种径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法,该方法在径向环状多分区方法的基础上优化了常规光瞳校正方法中基准能量的选取方式,可设计出适用于多种照明模式的单一光瞳校正板。在不将光瞳性能校正至零的情况下,该方法可以使得校正后的光瞳性能满足需求,这样可减小由光瞳校正所引起的能量损失。通过对劣化光瞳的校正分析,可以发现:所提方法可将光瞳的性能校正至需求范围内,且与常规光瞳校正方法相比,其可使环形和四极照明模式的能量损失最大值分别由 5.54% 和 3.06% 降至 2.06% 和 0.93%,这对提高光刻机的产率具有重要意义。

**关键词** 测量; 光刻; 照明系统; 光瞳校正

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1704001

### 1 引言

光刻是集成电路制造的关键工艺,集成电路集成度的增加要求光刻工艺可实现的特征尺寸(CD)越来越小,为此研究人员开发了多种分辨率增强技术(RET),如离轴照明(OAI)技术<sup>[1-4]</sup>、光学临近效应校正(OPC)<sup>[5-6]</sup>、光源掩模协同优化(SMO)技术<sup>[7-9]</sup>等。其中,OAI 技术利用光刻机中不同的离轴照明模式来减小 CD 和增大焦深(DOF)。常见的离轴照明模式有环形、四极(Q<sub>0</sub> 和 Q<sub>45</sub>)和两极(D<sub>x</sub> 和 D<sub>y</sub>)。不同的离轴照明模式适用于不同的曝光图形,这样可提高成像质量,例如环形照明模式常用于密集线条,有利于改善密集线条 CD 的均匀性等。光瞳特性参数用于描述照明光瞳的能量分布对称性<sup>[10-12]</sup>,主要包括光瞳椭圆度、X 方向光瞳极平衡性、Y 方向光瞳极平衡性、四象限光瞳极平衡性等。在光刻机使用过程中,镜片长时间暴露在紫外光环境中,其材料和膜层的透过率逐渐降低,这会影响到照明光瞳的能量分布对称性<sup>[13]</sup>。为了使照明光瞳的性能始终能满足使用需求,需要对照明光瞳进行定

期校正,但光瞳校正会损失一定的曝光能量,进而影响光刻机的产率。

近年来,国内外研究人员先后提出了多种光瞳校正方法或装置。van der Lei 等<sup>[14]</sup>设计了一种可用于照明装置的光学积分器,改变光学积分器的纵横比可实现对光瞳对称性的调整,但该方法需要更换系统关键功能元器件,不利于光刻机的长期使用。Antoni 等<sup>[15]</sup>利用多片具有一定透过率的遮光元件进行光瞳校正,通过遮光元件间的相对转动可获得不同的透过率。Maul 等<sup>[16]</sup>设计了一种用于补偿光瞳不对称性的滤光装置,该装置利用局部遮挡效应来调整照明光瞳的能量分布。但文献<sup>[15-16]</sup>均未给出具体的校正流程。Zhu 等<sup>[17]</sup>提出了一种光瞳校正方法,利用该方法校正后的光瞳的特性参数接近理论最小值,但能量损失较大。为解决以上问题,本文提出了一种高能量利用率光瞳校正方法,该方法在将光瞳校正至性能需求范围内的同时,还实现了能量利用率的提高,进而实现了在保证光刻成像质量的前提下提高光刻机产率的目的。

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-02-07; 录用日期: 2021-03-12

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)、上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1426500)

通信作者: \*huanghuijie@siom.ac.cn; \*\*zhangfang@siom.ac.cn

## 2 理论模型

### 2.1 光刻机照明系统工作原理

准分子激光器发出的光束经光刻机照明系统调制后,可为掩模提供成像曝光所需的照明模式与照明光场。光刻机照明系统示意图如图 1 所示,光刻机照明系统主要包括扩束与传输单元、光瞳整形单

元、照明均匀化单元、扫描狭缝和照明镜组等<sup>[18-19]</sup>。光瞳整形单元由衍射光学元件、变焦准直镜组和变倍锥形镜组组成<sup>[20]</sup>,可实现相干因子连续变化的照明模式<sup>[10, 18]</sup>,如传统、环形、四极和二极等。照明均匀化单元用于实现特定的照明光场分布。照明镜组将扫描狭缝处的照明光场分布成像于掩模面,从而在掩模面各视场点处均可得到完整的照明光瞳。

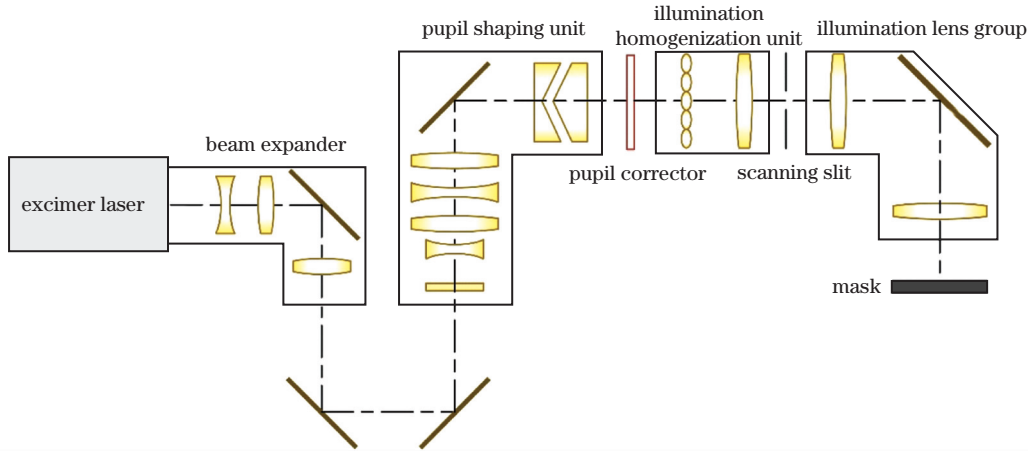


图 1 光刻机照明系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of illumination system for photolithography machine

### 2.2 光瞳特性参数定义

光瞳特性参数可反映照明光瞳的能量分布对称性。对于传统、环形、四极、二极等常用照明模式,其光瞳特性参数主要包括光瞳椭圆度、X 方向光瞳极平衡性、Y 方向光瞳极平衡性、四象限光瞳极平衡性等,表达式<sup>[21-22]</sup>分别为

$$b_{HV} = \left| \frac{E_i + E_{iii}}{E_{ii} + E_{iv}} - 1 \right| \times 100\%, \quad (1)$$

$$b_{ST} = \left| \frac{E_{II} + E_{IV}}{E_I + E_{III}} - 1 \right| \times 100\%, \quad (2)$$

$$b_X = \frac{|E_{X+} - E_{X-}|}{E_{X+} + E_{X-}} \times 100\%, \quad (3)$$

$$b_Y = \frac{|E_{Y+} - E_{Y-}|}{E_{Y+} + E_{Y-}} \times 100\%, \quad (4)$$

$$b_{Q_0} = \frac{\max(E_1, \dots, E_{IV}) - \min(E_1, \dots, E_{IV})}{\max(E_1, \dots, E_{IV}) + \min(E_1, \dots, E_{IV})} \times 100\%, \quad (5)$$

$$b_{Q_{45}} = \frac{\max(E_i, \dots, E_{iv}) - \min(E_i, \dots, E_{iv})}{\max(E_i, \dots, E_{iv}) + \min(E_i, \dots, E_{iv})} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: $b_{HV}$ 、 $b_{ST}$  为光瞳椭圆度; $b_X$  为 X 方向光瞳极平衡性; $b_Y$  为 Y 方向光瞳极平衡性; $b_{Q_0}$ 、 $b_{Q_{45}}$  为四象限光瞳极平衡性; $E_i$ 、 $E_{ii}$ 、 $E_{iii}$ 、 $E_{iv}$  分别为 i、ii、iii、iv 区域的能量,区域分界线沿  $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向,如图 2(a) 所示; $E_{X+}$  和  $E_{X-}$  分别为 X 方向正、负区域的能量,下标 X+ 和 X- 分别为 X 方向的正、负区域,区域分界线沿垂直轴(V轴),如图 2(b) 所示; $E_{Y+}$  和  $E_{Y-}$  分别

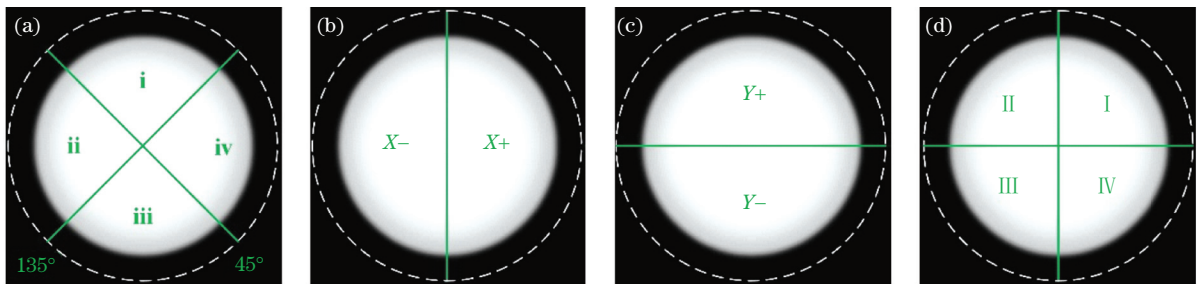


图 2 光瞳特性参数区域划分示意图。(a)  $b_{HV}$  和  $b_{Q_{45}}$ ; (b)  $b_X$ ; (c)  $b_Y$ ; (d)  $b_{ST}$  和  $b_{Q_0}$

Fig. 2 Schematic diagrams of region partitions of pupil characteristic parameters. (a)  $b_{HV}$  and  $b_{Q_{45}}$ ; (b)  $b_X$ ; (c)  $b_Y$ ; (d)  $b_{ST}$  and  $b_{Q_0}$

为 Y 方向正、负区域的能量,下标 Y+ 和 Y- 分别为 Y 方向的正、负区域,区域分界线沿水平轴(H 轴),如图 2(c)所示;  $E_I$ 、 $E_{II}$ 、 $E_{III}$ 、 $E_{IV}$  分别为 I、II、III、IV 区域的能量,区域分界线沿 H 轴和 V 轴,如图 2(d)所示。

### 2.3 径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法

光瞳校正通过遮挡光瞳相应区域的能量使掩模面各视场点的光瞳性能均满足指标需求的方法。考虑到光瞳校正器的加工和装调误差,在进行光瞳校正器设计时,全视场光瞳校正目标  $G_1$  需优于光刻机实际需要的光瞳性能指标  $R$ 。另外,考虑到不同视场点光瞳校正所需透过率之间的差异,引入单视场点光瞳校正目标  $G_2$ :

$$G_1 = R - \Delta_1, \quad (7)$$

$$G_2 = G_1 - \Delta_2 = R - (\Delta_1 + \Delta_2), \quad (8)$$

式中:  $\Delta_1$  为考虑光瞳校正器的加工和装调误差后所留的余量;  $\Delta_2$  为考虑不同视场点光瞳校正所需透过率之间的差异后所留的余量,其值可根据实际校正结果进行调整。

结合光瞳特性参数的评价方法,将某一视场点的光瞳沿切向分为 8 个区域,如图 3 所示。计算切向 8 个区域的能量  $E_i$  ( $i$  为区域编号,  $i=1, 2, \dots, 8$ ), 并从大到小排序, 排序后的能量值标记为  $E_j$  ( $j$  为能量值编号,  $j=1, 2, \dots, 8$ )。依次以排序后第  $j$  ( $j \geq 2$ ) 个能量值  $E_j$  作为基准,  $T_{ij}$  是以能量值  $E_j$  为基准计算得到的第  $i$  个区域的透过率, 其表达式为

$$T_{ij} = \begin{cases} 1, & E_i \leq E_j \\ E_i/E_j, & E_i > E_j \end{cases}, \quad (9)$$

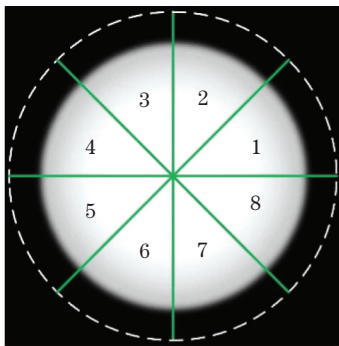


图 3 光瞳切向 8 分区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tangential 8 partitions of pupil

根据每个能量基准值  $E_j$  对应的各区域透过率  $T_{ij}$ , 对光瞳各区域强度分布进行校正, 并计算校正后的光瞳特性参数。此时, 以能量值  $E_j$  为基准进行光瞳校正引起的能量损失  $E_{Lj}$  为

$$E_{Lj} = \frac{\sum_{i=1}^8 E_i (1 - T_{ij})}{\sum_{i=1}^8 E_i} \times 100\%。 \quad (10)$$

随着  $j$  逐渐增大, 校正后光瞳特性参数逐渐减小。由此, 可判断出校正后满足单视场点光瞳校正目标  $G_2$  的最小  $j$  值, 以  $E_{j-1}$  和  $E_j$  作为光瞳校正基准能量的上下限, 利用二分法逐步改变基准能量值, 并用改变后的基准能量值重新计算能量值大于  $E_j$  的各区域的透过率, 直至校正后的光瞳特性参数刚好满足校正目标  $G_2$ , 此时的能量基准值为最佳能量基准值  $E_b$ 。最佳能量基准值选择过程示意图如图 4 所示。利用最佳能量基准值  $E_b$  和(9)式可计算得到各切向区域最佳透过率  $T_{ib}$ , 使用透过率为  $T_{ib}$  的光瞳校正板进行光瞳校正引起的最小能量损失  $E_{Lb}$  可由(10)式计算得到。可以发现, 单视场点光瞳校正目标  $G_2$ 、最佳能量基准值  $E_b$ 、光瞳校正板透过率、校正后光瞳的特性参数是一一对应的。因此, 合理地设置单视场点光瞳校正目标  $G_2$  便可使校正后的光瞳特性参数满足指标需求, 而不需要将光瞳校正至零(理论极限值)。该方法不仅使校正后的光瞳性能满足了指标需求, 还减小了光瞳校正引起的能量损失。

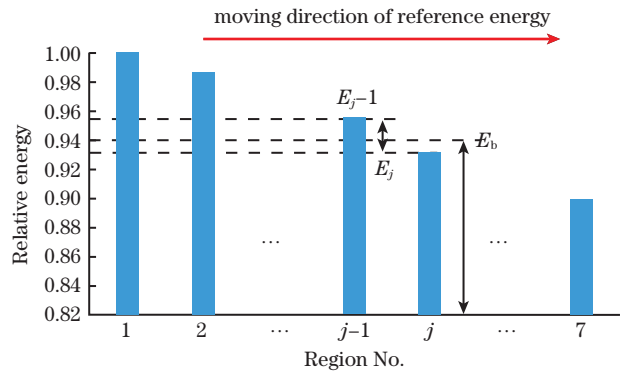


图 4 最佳能量基准值选择过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of selected process for optimal reference value of energy

同样地, 按照上述方法计算其余视场点的最佳透过率, 将各视场点的同一切向区域的透过率平均值  $\bar{T}_{ib}$  作为该照明模式的校正板透过率。然后, 使用该透过率对各视场点光瞳性能进行评估, 若满足全视场光瞳校正目标  $G_1$ , 则将  $\bar{T}_{ib}$  作为该照明模式最终的校正板透过率; 若不满足校正目标  $G_1$ , 则调整  $\Delta_2$  后, 再重新计算透过率, 直至校正结果满足  $G_1$ 。

为了同时兼顾同一照明模式不同相干因子的校正需求, 对上述切向 8 分区高能量利用率光瞳校正方法进行了改进, 提出径向环状多分区高能量利用

率光瞳校正方法。在光瞳切向 8 分区的基础上,根据相干因子范围将光瞳沿径向分为  $N$  个环状区域;也可根据不同相干因子光瞳特性参数的测量结果,判断出需要校正的光瞳对应的相干因子范围,将光瞳沿径向分为  $N$  个环状区域。光瞳径向环状多分区示意图如图 5 所示。如果所需校正的多个光瞳的相干因子的范围无交叠,则在各自环状分区内独立计算透过率  $T_{ni}$  ( $n=1,2,\dots,N; i=1,2,\dots,8$ ),即可使所有光瞳满足单视场点光瞳校正目标  $G_2$ 。如果所需校正的多个光瞳的相干因子的范围有交叠,则在具有最小相干因子的光瞳所对应的环状分区内计算透过率  $T_{li}$  ( $1 \leq l < N; i=1,2,\dots,8$ ),进而使具有最小相干因子的光瞳的特性参数满足校正目标  $G_2$ 。然后,评估该透过率对较大相干因子光瞳的影响,若具有较大相干因子的光瞳性能不满足校正目标  $G_2$ ,则计算具有较大相干因子的光瞳对应的环状分区的透过率  $T_{ki}$  ( $k=l+1, 1 < k \leq N; i=1,2,\dots,8$ ),使其光瞳特性参数满足校正目标  $G_2$ ,依次判断已确定的透过率对具有较大相干因子的光瞳性能的影响,直至  $n=N$ 。若使用切向 8 分区高能率光瞳校正方法,则环  $n$  ( $n=l,k,\dots,N$ ) 各切向区域  $i$  ( $i=1,2,\dots,8$ ) 的最终透过率为  $\bar{T}_{nib}$ 。此时

,某一视场点具有最大相干因子的光瞳校正引起的能量损失  $E'_{Lb}$  为

$$E'_{Lb} = \frac{\sum_{n=l}^N \sum_{i=1}^8 E_{ni} (1 - \bar{T}_{nib})}{\sum_{n=l}^N \sum_{i=1}^8 E_{ni}} \times 100\%, \quad (11)$$

式中:  $E_{ni}$  是环  $n$  ( $n=l,k,\dots,N$ ) 的第  $i$  ( $i=1,2,\dots,8$ ) 个切向区域的能量。

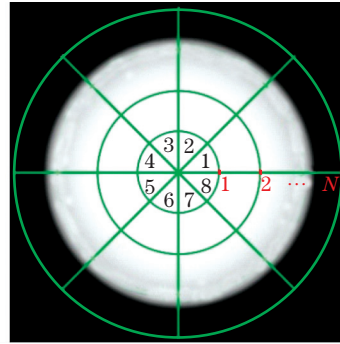


图 5 光瞳径向环状多分区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of radial multi-ring partition of pupil

利用径向环状多分区高能率光瞳校正方法同时校正多种相干因子照明模式的流程图如图 6 所示,具体步骤为

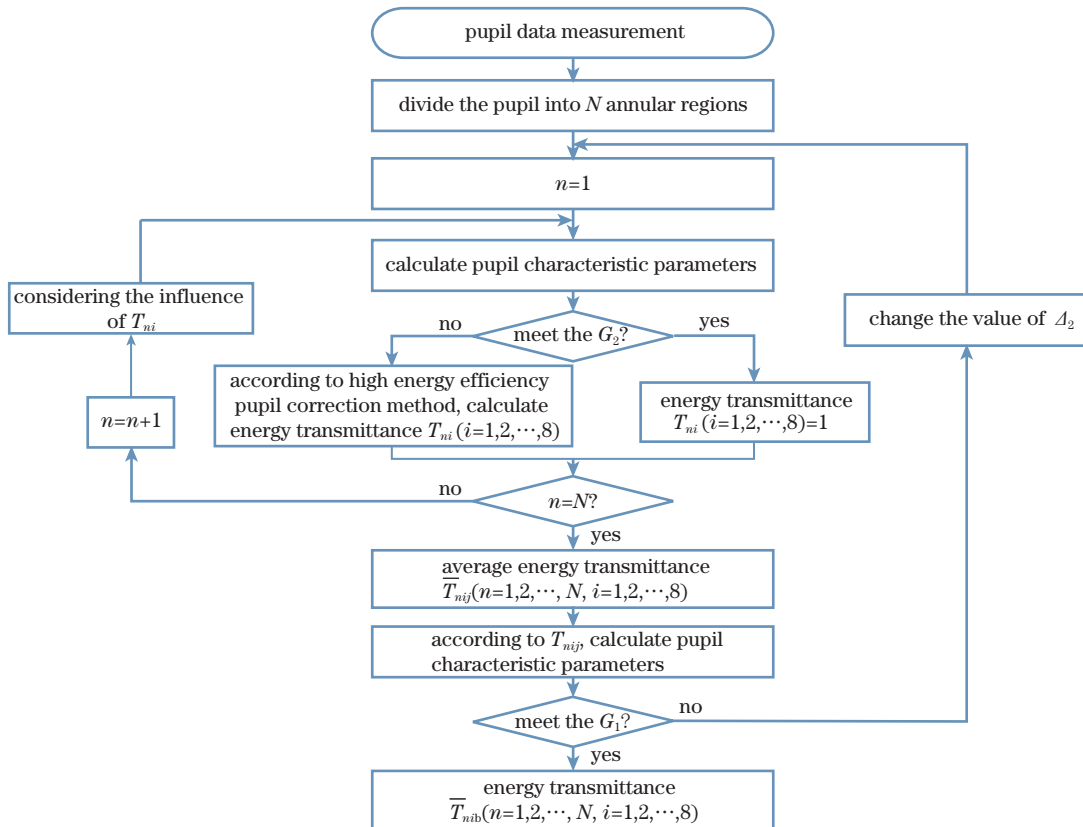


图 6 径向环状多分区高能率光瞳校正方法流程图

Fig. 6 Flow chart of high energy efficiency pupil correction method based on radial multi-ring partition

1) 根据相干因子取值范围,沿径向将光瞳分为  $N$  个环状区域;

2) 从最小的环状分区开始,并依次往外。令  $n = 1$ ,计算对应光瞳的光瞳特性参数。若满足单视场点光瞳校正目标  $G_2$ ,则第 1 个环状分区内切向 8 分区的透过率  $T_{1i} (i=1, 2, \dots, 8)$  均为 1;若不满足校正目标  $G_2$ ,则利用切向 8 分区高能量利用率光瞳校正方法计算光瞳透过率,并作为第 1 个环状分区内切向 8 分区的透过率;

3) 令  $n=2$ ,评估  $T_{1i}$  对对应光瞳的影响。若满足校正目标  $G_2$ ,则第 2 个环状分区内切向 8 分区的透过率  $T_{2i} (i=1, 2, \dots, 8)$  为 1;若不满足校正目标  $G_2$ ,则利用切向 8 分区高能量利用率光瞳校正方法计算光瞳第 2 个环状分区的透过率,使其光瞳特性参数满足校正目标  $G_2$ ;

4) 重复步骤 3),依次计算各环状分区内切向 8 分区的透过率  $T_{ni} (n=3, 4, \dots, N; i=1, 2, \dots, 8)$ ;

5) 取各视场点的同一环状分区各切向 8 分区透过率的平均值为  $\bar{T}_{nij} (n=3, 4, \dots, N, i=1, 2, \dots, 8)$ ,并利用  $\bar{T}_{nij}$  对各视场点光瞳性能进行评估,若满足全视场光瞳校正目标  $G_1$ ,将  $\bar{T}_{nij}$  作为最终的

校正板透过率  $\bar{T}_{nib}$ 。

与常规光瞳校正方法相比,径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法改变了基准能量值的选取方式,该方法不仅保证了校正的效果,还减小了光瞳校正引起的能量损失。

### 3 实测光瞳校正验证分析

为验证径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法的可行性,针对实测光瞳数据进行了光瞳校正分析。实测光瞳来自于数值孔径  $NA$  为 0.82 的 KrF 步进扫描光刻照明系统的照明光场,主要包括环形照明模式 ( $A_1, A_2, A_3$ ) 和四极照明模式 ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ) 在 9 个视场点 ( $F_1, F_2, \dots, F_9$ ) 处的光瞳数据。这 6 种照明模式的相干因子及校正前各视场点光瞳特性参数的最大值如表 1 所示,可以发现,环形照明模式的光瞳椭圆度均超过指标需求,且其值随相干因子的增大而增大;四极照明模式中  $Q_3$  的  $X$  方向光瞳极平衡性和四象限光瞳极平衡性均超过指标需求。9 个视场点在照明光场中的位置如图 7 所示,中心视场处不同相干因子照明模式的光瞳如图 8 所示。

表 1 6 种照明模式的相干因子及校正前各视场点光瞳特性参数最大值

Table 1 Coherent factors of 6 kinds of illumination modes and the maximum value of characteristic parameters of uncorrected pupils in each field of view

Illumination modes	Inner coherent factor	Outer coherent factor	Ellipticity	Pole balance in X direction	Pole balance in Y direction	Pole balance in four quadrants
$A_1$	0.20	0.44	3.26	0.30	1.75	2.04
$A_2$	0.47	0.72	5.12	0.07	1.82	2.13
$A_3$	0.54	0.83	5.63	0.08	1.80	1.89
$Q_1$	0.20	0.44	0.88	0.79	1.39	2.17
$Q_2$	0.36	0.60	0.91	1.25	2.36	3.60
$Q_3$	0.64	0.88	0.76	3.43	1.29	4.73
Target requirement			3.00	3.00	3.00	4.00

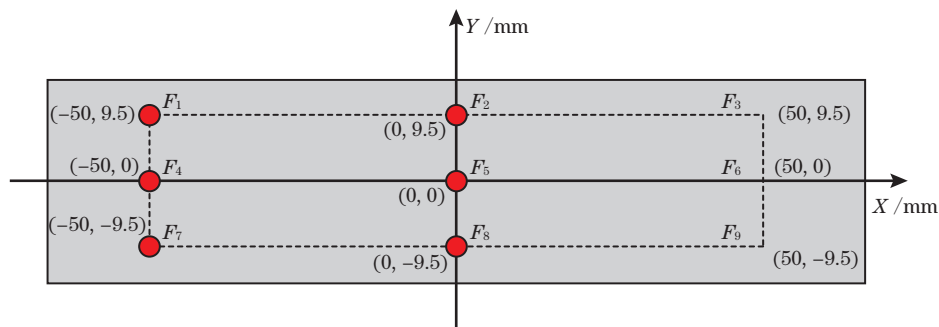


图 7 照明光场视场点的分布

Fig. 7 Distributions of fields of view in illumination light field

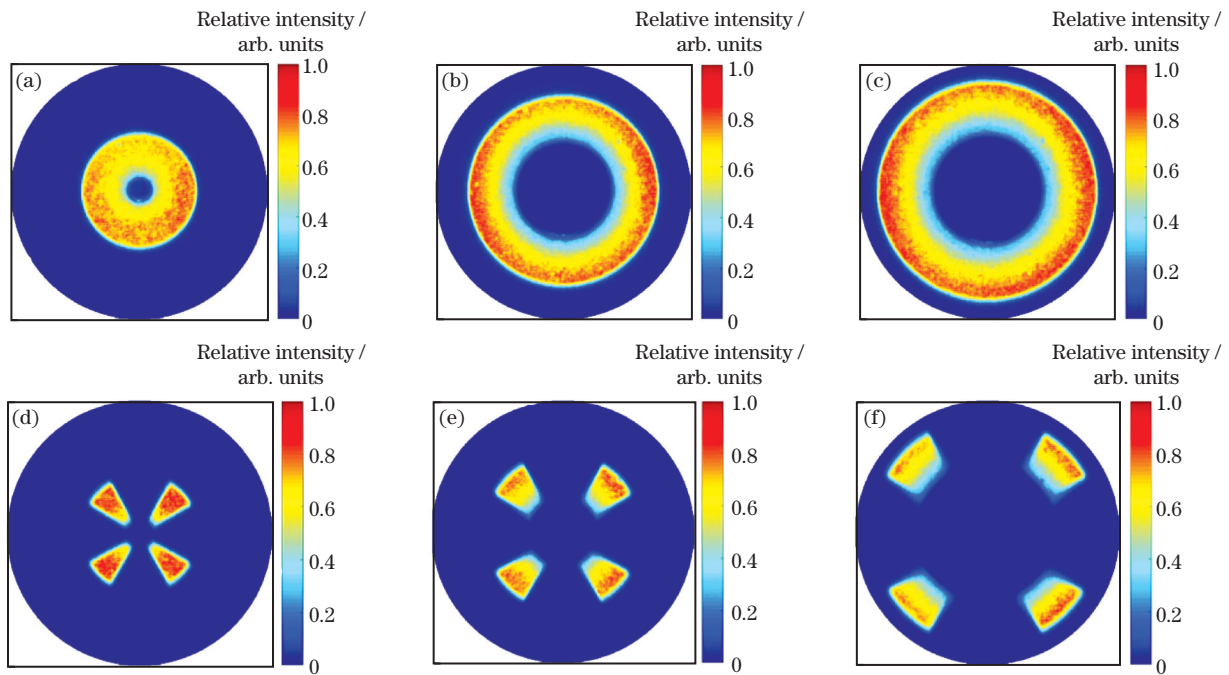


图 8 中心视场处不同相干因子照明模式的光瞳图。(a)  $A_1$ ; (b)  $A_2$ ; (c)  $A_3$ ; (d)  $Q_1$ ; (e)  $Q_2$ ; (f)  $Q_3$

Fig. 8 Pupil diagrams of illumination modes with different coherent factors in central field of view. (a)  $A_1$ ; (b)  $A_2$ ; (c)  $A_3$ ; (d)  $Q_1$ ; (e)  $Q_2$ ; (f)  $Q_3$

### 3.1 环形照明模式校正分析

为了对比分析,在进行径向环状多分区高能量利用率光瞳校正前,使用常规校正方法对各视场点光瞳进行了校正分析。然后,利用径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法设计了一块校正板同时对三种环形照明模式进行校正分析,根据三种环形照明模式相干因子范围将光瞳沿径向分为三个环状区域,记为  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ ,相干因子范围分别为  $[0, 0.5)$ 、 $[0.5, 0.75)$ 和 $[0.75, 1]$ 。根据实际光瞳校正器的加工和装调误差,设置  $\Delta_1$  为 0.3%;根据各照明模式不同视场点光瞳校正结果差异,设置  $\Delta_2$  为 0.2%,则全视场光瞳校正目标  $G_1$  为  $b_{HV} =$

$2.7\%$ 、 $b_{ST} = 2.7\%$ 、 $b_X = 2.7\%$ 、 $b_Y = 2.7\%$ 、 $b_{Q_0} = 3.7\%$ 、 $b_{Q_{45}} = 3.7\%$ 。根据图 6 所示的流程图,对每个环状分区逐次进行校正,校正板透过率  $\bar{T}_{nib}$  和校正结果分别如表 2 和表 3 所示。其中,照明模式  $A_3$  各视场点校正前后的光瞳特性参数对比如图 9 所示。

通过对比两种光瞳校正结果可以发现:1) 两种校正方法的校正结果均可满足全视场光瞳校正目标  $G_1$ ;2) 常规光瞳校正方法引起的三种照明模式的能量损失最大值分别为 4.54%、5.54%、5.52%,与之相比,径向环状多分区光瞳校正方法引起的能量损失明显降低,最大值分别为 1.98%、2.06%、2.21%。

表 2 环形照明模式下两种光瞳校正板透过率

Table 2 Transmittances of two kinds of pupil correction plates at annular illumination modes

Method	Illumination mode	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5	Region 6	Region 7	Region 8
Traditional method	$A_1$	0.9515	1.0000	0.9892	0.9550	0.9346	0.9407	0.9434	0.9249
	$A_2$	0.9219	0.9890	1.0000	0.9340	0.9045	0.9454	0.9406	0.9293
	$A_3$	0.9201	0.9881	1.0000	0.9298	0.9056	0.9531	0.9371	0.9329
Multi-ring method	$M_1$	0.9838	1.0000	1.0000	0.9698	0.9593	0.9609	0.9609	0.9603
	$M_2$	0.9709	1.0000	1.0000	0.9872	0.9518	1.0000	0.9978	0.9847
	$M_3$	0.9685	1.0000	1.0000	0.9763	0.9612	1.0000	0.9837	0.9793

表 3 环形照明模式下两种光瞳校正结果

Table 3 Correction results of two kinds of pupils at annular illumination modes

Method	Illumination mode	Ellipticity	Pole balance in X direction	Pole balance in Y direction	Pole balance in four quadrants	Energy loss
		$b_{HV} / \%$	$b_X / \%$	$b_Y / \%$	$b_{Q_0} / \%$	$E_{L_j} / \%$
Traditional method	A <sub>1</sub>	0.64	0.31	0.20	0.49	4.54
	A <sub>2</sub>	0.42	0.08	0.22	0.49	5.54
	A <sub>3</sub>	0.84	0.19	0.42	0.95	5.52
Multi-ring method	A <sub>1</sub>	2.26	0.16	0.72	0.89	1.98
	A <sub>2</sub>	2.15	0.06	1.30	1.42	2.06
	A <sub>3</sub>	2.35	0.12	1.26	1.47	2.21

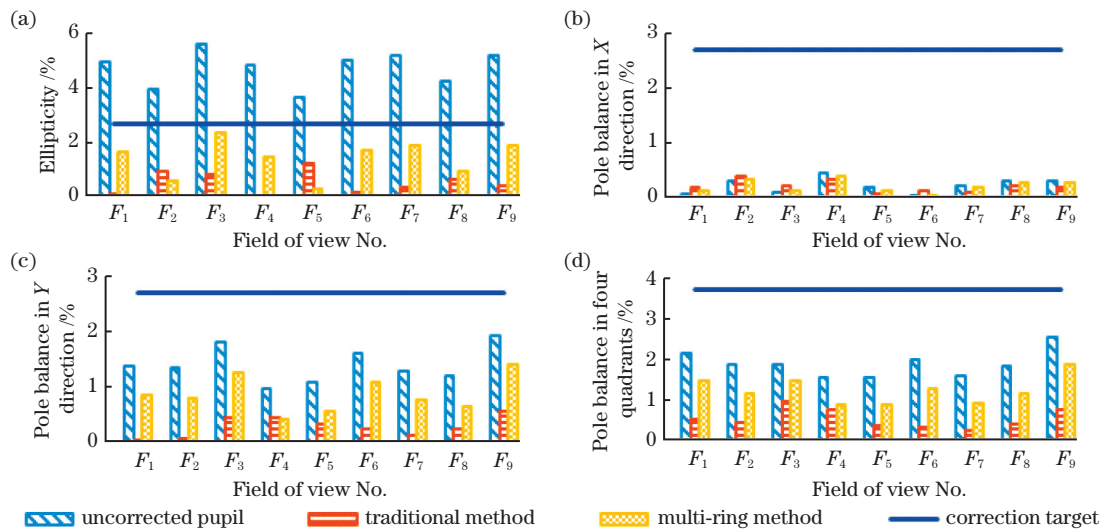


图 9 照明模式 A<sub>3</sub> 校正前后光瞳特性参数对比。(a)光瞳椭圆度;(b) X 方向光瞳极平衡性;(c) Y 方向光瞳极平衡性;(d)四象限光瞳极平衡性

Fig. 9 Comparisons of pupil characteristic parameters before and after correction of illumination mode A<sub>3</sub>.

(a) Ellipticity; (b) pole balance in X direction; (c) pole balance in Y direction; (d) pole balance in four quadrants

### 3.2 四极照明模式校正分析

同样地,对四极照明模式,首先使用常规校正方法对各视场点光瞳进行了校正分析。然后使用径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法设计一块校

正板同时对三种照明模式进行校正分析,Δ<sub>1</sub>、Δ<sub>2</sub>、全视场光瞳校正目标 G<sub>1</sub> 和环状区域划分方法与环形照明模式光瞳校正中的设置相同。校正板透过率和校正结果分别如表 4 和表 5 所示。照明模式 Q<sub>3</sub> 各视场点校正前后的光瞳特性参数对比如图 10 所示。

表 4 四极照明模式下两种光瞳校正板透过率

Table 4 Transmittances of two kinds of pupil correction plates at quadrupole illumination modes

Method	Illumination mode	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5	Region 6	Region 7	Region 8
Traditional method	Q <sub>1</sub>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Q <sub>2</sub>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	Q <sub>3</sub>	0.9441	0.9441	0.9916	0.9916	1.0000	1.0000	0.9454	0.9454
Multi-ring method	M <sub>1</sub>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	M <sub>2</sub>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	M <sub>3</sub>	0.9543	0.9543	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9712	0.9712

表 5 四极照明模式下两种光瞳校正结果

Table 5 Correction results of two kinds of pupils at quadrupole illumination modes

Method	Illumination modes	Ellipticity	Pole balance in X direction	Pole balance in Y direction	Pole balance in four quadrants	Energy loss
		$b_{ST} / \%$	$b_X / \%$	$b_Y / \%$	$b_{Q_{45}} / \%$	$E_{L_j} / \%$
Traditional method	Q <sub>1</sub>	0.88	0.79	1.39	2.17	0.00
	Q <sub>2</sub>	0.91	1.25	2.36	3.60	0.00
	Q <sub>3</sub>	0.48	0.80	1.05	1.86	3.06
Multi-ring method	Q <sub>1</sub>	0.87	0.76	1.39	2.13	0.03
	Q <sub>2</sub>	0.89	1.21	2.35	3.55	0.04
	Q <sub>3</sub>	1.28	2.53	1.04	3.59	0.93

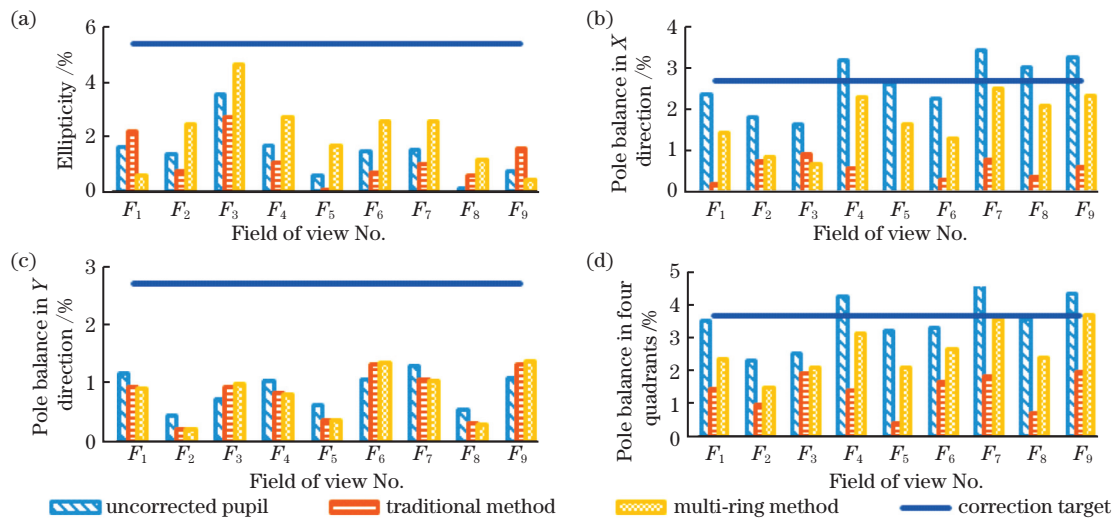


图 10 照明模式 Q<sub>3</sub> 校正前后光瞳特性参数对比。(a)光瞳椭圆度;(b)X 方向光瞳极平衡性;(c)Y 方向光瞳极平衡性;(d)四象限光瞳极平衡性

Fig. 10 Comparisons of pupil characteristic parameters before and after correction of illumination mode Q<sub>3</sub>. (a) Ellipticity; (b) pole balance in X direction; (c) pole balance in Y direction; (d) pole balance in four quadrants

通过对比两种光瞳校正结果可以发现:1) 两种校正方法的校正结果均可满足全视场光瞳校正目标  $G_1$ ; 2) 常规光瞳校正方法引起的能量损失最大值为 3.06%, 与之相比, 径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法引起的能量损失明显减小, 最大值为 0.93%; (3) 由于 Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub> 在相干因子  $[0.44, 1]$  或  $[0.6, 1]$  范围内存在杂散光, 因此在径向环状多分区光瞳校正方法中, 虽然只在 Q<sub>3</sub> 对应分区内存在透过率遮挡, 但是 Q<sub>1</sub> 和 Q<sub>2</sub> 照明模式中也存在能量损失, 分别为 0.03% 和 0.04%。

## 4 结 论

提出了一种光刻机径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法, 该方法通过改变常规光瞳校正方法中基准能量值的选取方式, 并结合光瞳性能参数指标需求, 计算得到光瞳校正所需透过率。该方法不仅可以使校正后的光瞳性能满足指标需求, 还可

以使光瞳校正造成的能量损失最小。同时, 该方法采用径向环状多分区的方式, 可设计出多种照明模式复用的光瞳校正板, 该光瞳校正板可同时满足同一照明模式不同相干因子光瞳的校正需求。为验证该方法的可行性, 对 NA 为 0.82 的 KrF 步进扫描光刻机照明系统的照明光场处的环形照明模式和四极照明模式的光瞳数据进行了光瞳校正分析。分析结果表明, 径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法可利用一块光瞳校正板将同一照明模式不同相干因子的光瞳校正至指标需求内, 并且与常规校正方法相比, 径向环状多分区光瞳校正方法可使三种环形照明模式校正后的能量损失最大值由 4.54%、5.54%、5.52% 降至 1.98%、2.06%、2.21%; 四极照明模式 Q<sub>3</sub> 校正后的能量损失最大值由 3.06% 降至 0.93%。所提的径向环状多分区高能量利用率光瞳校正方法可提高光刻机曝光系统的透过率, 这对提高光刻机的产率具有重要的使用价值。



## 参 考 文 献

- [1] Zhang Y Q, Wu R M, Zheng Z R. Freeform surface off-axis illumination design with the Monge-Ampère equation method in optical lithography[J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7296-7303.
- [2] 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.
- [3] Shih C T, Yu S S, Lu Y C, et al. Mitigation of image contrast loss due to mask-side non-telecentricity in an EUV scanner[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94220Y.
- [4] Chen M, Zhang F, Zeng A J, et al. Method of pupil shaping for off-axis illumination in optical lithography [J]. Journal of Optical Technology, 2016, 83(3): 154-158.
- [5] Shen Y J, Peng F, Zhang Z R. Efficient optical proximity correction based on semi-implicit additive operator splitting[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1520-1528.
- [6] Oh S, Han D D, Shim H B, et al. Optical proximity correction (OPC) in near-field lithography with pixel-based field sectioning time modulation[J]. Nanotechnology, 2018, 29(4): 045301.
- [7] Wang L, Li S K, Wang X Z, et al. Source mask projector optimization method of lithography tools based on particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1022001.  
王磊, 李思坤, 王向朝, 等. 基于粒子群优化算法的光刻机光源掩模投影物镜联合优化方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1022001.
- [8] 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.
- [9] Mao Y J, Li S K, Wang X Z, et al. Multi-parameter joint optimization for lithography based on photoresist topography model[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0422002.  
茅言杰, 李思坤, 王向朝, 等. 基于光刻胶三维形貌的光刻多参数联合优化方法[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0422002.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [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.
- [14] van der Lei S A, Tas M A, Hoegge J, et al. Optical integrator for an illumination device: US6733165[P]. 2004-05-11.
- [15] Antoni M. Projection exposure device: US6535274[P]. 2003-03-18.
- [16] Maul M, Fiolka D. Filter device for the compensation of an asymmetric pupil illumination: US8636386[P]. 2014-01-28.
- [17] Zhu S Y, Niu Z Y, Zhang F, et al. Programmable pupil correction method for photolithography illumination system[J]. Optik, 2020, 208: 164072.
- [18] Zhao Y, Gong Y. Design of beam shaping unit for deep ultraviolet lithographic illumination system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 29-34.  
赵阳, 巩岩. 深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 29-34.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Rui D W, Zhang W, Yang H J. Calibrating the pupil

fill balance for hypernumerical aperture lithographic objective[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(9): 095103.

[22] 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.

## Research on High Energy Efficiency Pupil Correction Based on Multi-ring Partition in Photolithography Machine

Zhu Siyu<sup>1,2</sup>, Yang Baoxi<sup>1,2</sup>, Ma Xiaozhe<sup>1,2</sup>, Zhang Fang<sup>1\*</sup>,  
Cheng Weilin<sup>1</sup>, Niu Zhiyuan<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** Photolithography is a crucial technology in integrated circuit manufacturing. With the critical dimension of photolithography becoming smaller, integrated circuits are becoming more and more compact. For this reason, a variety of resolution enhancement techniques, such as off-axis illumination, have been proposed. The influence of pupil performance on the quality of exposure pattern and overlay accuracy is prominent with the application of this technology. Off-axis illumination modes are generated by the illumination system of the photolithography machine. The generally used illumination modes include conventional, annular,  $0^\circ$  quadrupole ( $Q_0$ ),  $45^\circ$  quadrupole ( $Q_{45}$ ), dipole in  $X$  direction ( $D_X$ ), and dipole in  $Y$  direction ( $D_Y$ ). In the working process of the photolithography machine, the lenses are exposed to deep ultraviolet light. Thus, the transmittance of their optical materials and coating films gradually deteriorate, which may affect the pupil performance. It is necessary to adopt the pupil correction technology for illumination system to improve the pupil performance.

Recently, various pupil correction methods or devices have been proposed. However, these methods have not produced a specific correction process. Energy loss during pupil correction affects production rate of photolithography machine. To solve these problems, a high energy efficiency pupil correction method is proposed in this paper. This method can improve the performance of a corrected pupil while energy efficiency is increased maximally. As a result, production rate of photolithography machine is improved while ensuring quality of exposure pattern.

**Methods** The main goal of the pupil correction method is to correct an unqualified pupil to a full-field pupil correction target. In traditional correction method, the theoretical limit (zero) is set as the target. However, the reference energy value for the correction method proposed in this paper is changed. The reference energy value is selected by considering the process and assembly errors of the pupil corrector. The deviations of pupil correction results at different fields of view are also considered. In this way, the performance of the corrected pupil can meet the requirements while the energy loss during the correction is minimized. Furthermore, considering the correction requirements of different illumination modes, a pupil correction plate suitable for many illumination modes is designed by the multi-ring partition method.

To verify the feasibility of this method, a pupil correction analysis is conducted. The pupils, including three annular illumination modes and three different quadrupole illumination modes, are measured in the illumination system of a KrF step-and-scan photolithography machine with  $NA=0.82$ . These annular (quadrupole) illumination modes are corrected by a correction plate, for which the transmittances are calculated by the multi-ring partition pupil correction method. The pupils of these annular (quadrupole) illumination modes are divided into three rings ( $[0, 0.5)$ ,  $[0.5, 0.75)$ , and  $[0.75, 1]$ ) along the radial direction. According to the manufacturing and assembling errors of the pupil corrector,  $\Delta_1$  is set to 0.3%.  $\Delta_2$  is set to 0.2% for the difference of pupil correction results at different fields of view.

**Results and Discussions** For a comparison study, the traditional correction method and the method proposed in this paper (Fig. 6) are used to correct the measured three annular (quadrupole) illumination modes. The correction results of the two correction methods can meet the full-field pupil correction target (Fig. 9 and Fig. 10). The transmittance of the correction plate designed by the multi-ring partition pupil correction method is significantly improved (Table 2 and Table 4), and is applicable to the three annular (quadrupole) illumination modes. Compared with the traditional correction method, the multi-ring partition pupil correction method can reduce the maximum energy loss after correction from 4.54%, 5.54%, and 5.52% to 1.98%, 2.06%, and 2.21% for the three annular illumination modes (Table 3), and the maximum energy loss after correction from 3.06% to 0.93% for the quadrupole illumination mode  $Q_3$  (Table 5).

**Conclusions** In this paper, the high-energy efficiency pupil correction method based on multi-ring partition is proposed. The multi-ring partition method is adopted, and the selection method of the reference energy value is changed. In this way, one pupil correction plate is suitable for several illumination modes. The energy loss caused by pupil correction can be reduced, and the performance of the corrected pupil meets the requirements. The results of pupil correction indicate that the maximum energy loss of annular and quadrupole corrected pupils can be reduced from 5.54% and 3.06% to 2.06% and 0.93% respectively, in comparison with the traditional pupil correction method. This method is of great significance to improve the production rate of the photolithography machine.

**Key words** measurement; photolithography; illumination system; pupil correction

**OCIS codes** 120.4820; 110.5220; 120.1880