

一种基于线性模型的光刻投影物镜偏振像差补偿方法

涂远莹^{1,2} 王向朝^{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 提出一种基于线性模型的光刻投影物镜偏振像差补偿方法。根据 Hopkins 矢量部分相干成像理论, 推导了投影物镜含有偏振像差时交替型相移掩模 (Alt-PSM) 光栅图形的空间像光强分布以及偏振像差引起的光栅图形成像位置偏移 (IPE) 与最佳焦面偏移 (BFS) 的解析表达式。利用该解析表达式建立了偏振像差与光栅图形成像质量 (IPE、BFS) 的线性模型。通过该线性模型能快速计算偏振像差线性灵敏度, 调整控制相应的标量像差补偿量, 从而减小偏振像差对光栅图形成像质量的不利影响, 实现偏振像差补偿。该方法的补偿效果主要与标量像差调整精度以及光栅图形对标量像差的灵敏度有关。仿真结果表明, 该补偿方法能有效地减小偏振像差引起的 IPE 以及不同栅距的光栅图形的 BFS 差值, 从而提高光栅图形成像质量。

关键词 光学制造; 光刻投影物镜; 偏振像差补偿; 泡利-泽尼克系数; 线性模型

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201333.0622002

Polarization Aberration Compensation Method for Lithographic Projection Lens Based on a Linear Model

Tu Yuanying^{1,2} Wang Xiangzhao^{1,2}

(¹ *Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Based on a linear model, a novel method to compensate the polarization aberration of lithographic projection lens is proposed. By using the Hopkins vector theory of partially coherent imaging, the analytical expressions of the aerial image, as well as the image placement error (IPE) and the best focus shift (BFS) induced by the polarization aberrations are derived for the alternating phase-shift mask (Alt-PSM) grating pattern. Based on these analytical expressions, a linear relation model is established between the polarization aberration and the image quality (IPE, BFS). By calculating the polarization aberration linear sensitivities and adjusting the scalar aberrations based on the linear model, the adverse influences of the polarization aberrations on image quality can be minimized, i. e., realizing polarization aberration compensation. The compensation accuracies are dependent on the scalar aberration adjustment accuracy of the projection lens and the sensitivity of the grating pattern to the scalar aberration. The simulation results show that the IPE and the BFS difference of the gratings with different pitches can be effectively reduced, and the image quality can be improved by the polarization aberration compensation method.

Key words optical fabrication; lithographic projection lens; polarization aberration compensation; Pauli-Zernike coefficient; linear model

OCIS codes 220.3740; 220.3630; 220.1000; 260.5430

收稿日期: 2013-02-04; 收到修改稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(60938003, 61205102, 61275207)资助课题。

作者简介: 涂远莹(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事光刻成像方面的研究。E-mail: tuyuanying@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

光刻投影物镜偏振像差易引起图形特征尺寸(CD)误差、成像位置偏移(IPE)与最佳焦面偏移(BFS)等,严重影响了光刻分辨率与套刻精度^[1~3]。在大数值孔径投影物镜与偏振光照明条件下,投影物镜偏振像差对光刻成像质量的影响不可忽略^[4]。为了减小偏振像差的不利影响并提高光刻成像质量,需要快速、有效的偏振像差补偿和控制方法^[5,6]。为此,Arai等^[7]提出了一种基于泡利-泽尼克系数与透镜位置调整的偏振像差优化方法。根据该方法的优化原则,在调整透镜位置之前需要由光刻仿真软件逐个计算泡利-泽尼克系数的光栅图形线宽不对称的灵敏度,且不同的偏振像差与透镜位置之间没有明确的调整关系。因此优化效果和速度受光刻仿真软件计算结果影响,优化过程也相对复杂。

为了提高投影物镜偏振像差的补偿效果与速度,提出一种基于线性模型的光刻投影物镜偏振像差补偿方法。该方法利用投影物镜偏振像差引起的光栅图形 IPE 与 BFS 的线性解析表达式,建立偏振像差与光栅图形成像质量的线性模型。通过该线性

模型计算偏振像差线性灵敏度、调整控制相应的标量像差,补偿偏振像差对光栅图形成像质量的影响。基于仿真计算结果分析讨论本方法的偏振像差补偿过程与补偿效果。

2 原 理

2.1 光刻矢量成像模型

图 1(a)为典型的光刻成像系统简图,包括光源、掩模、投影光学系统与像面等。为了分析方便,对掩模面坐标 (x_o, y_o) 、光瞳坐标 (f, g) 与像面坐标 (x_i, y_i) 进行归一化^[8]:

$$\begin{aligned} \hat{x}_o &= -\frac{Mx_o}{\lambda/NA}, & \hat{y}_o &= -\frac{My_o}{\lambda/NA}, \\ \hat{f} &= \frac{f}{NA/\lambda}, & \hat{g} &= \frac{g}{NA/\lambda}, \\ \hat{x}_i &= \frac{x_i}{\lambda/NA}, & \hat{y}_i &= \frac{y_i}{\lambda/NA}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 M 为投影物镜的横向放大率, λ 是光刻机曝光波长, NA 是投影物镜数值孔径。图 1(b)、(c)分别为沿 x 和 y 方向的交替型相移掩模(Alt-PSM)光栅。

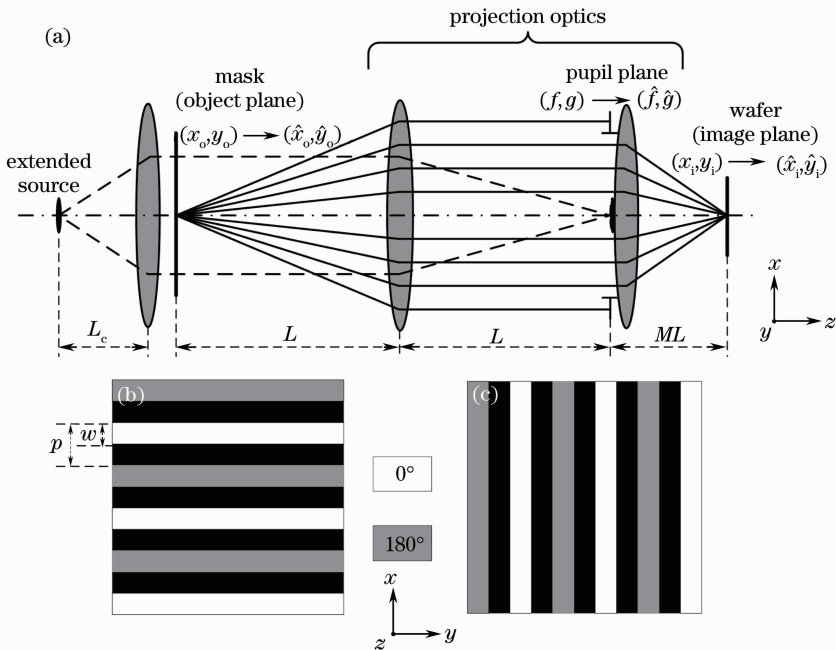


图 1 (a)典型的光刻成像系统简图; (b)沿 x 方向的 Alt-PSM 光栅; (c)沿 y 方向的 Alt-PSM 光栅

Fig. 1 (a) Schematic of a typical optical lithographic imaging system; (b) Alt-PSM grating oriented in x direction; (c) Alt-PSM grating oriented in y direction

根据 Hopkins 矢量部分相干成像理论^[9],像面上的光强分布可表示为

$$I(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \Delta z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \cdots \int_{-\infty}^{+\infty} I_{\text{TCC}}(\hat{f}', \hat{g}'; \hat{f}'', \hat{g}'', \Delta z) O(\hat{f}', \hat{g}') \mathbf{M}(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') \mathbf{J}_{\text{Jones}}(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}') \times \\ \mathbf{E} \mathbf{O}^*(\hat{f}'', \hat{g}'') \mathbf{M}^*(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'') \mathbf{J}_{\text{Jones}}^*(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'') \mathbf{E}^* \times \\ \exp\{-i2\pi[(\hat{f}' - \hat{f}'')\hat{x}_i + (\hat{g}' - \hat{g}'')\hat{y}_i]\} d\hat{f} d\hat{g} d\hat{f}' d\hat{g}' d\hat{f}'' d\hat{g}'' \quad (2)$$

对比(2)式与 Hopkins 标量部分相干成像公式^[9]可知,以 $O(\hat{f}, \hat{g}) \mathbf{M} \mathbf{J}_{\text{Jones}} \mathbf{E}$ 代替标量成像公式中的 $O(\hat{f}, \hat{g})$, 可将标量成像拓展到矢量成像。其中 $O(\hat{f}, \hat{g})$ 是掩模频谱, 矩阵 \mathbf{M} 为 3×2 的传输矩阵, 它将进入光瞳的场分量映射为成像面上的场分量。矢量 $\mathbf{E} = (E_x \ E_y)^\top$ 为入射光瞳上的电场矢量。 $\mathbf{J}_{\text{Jones}}$ 是 2×2 的琼斯矩阵^[10], 它与电场矢量的关系为

$$\mathbf{E}' = \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\text{Jones}} \mathbf{E}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{E}' = (E'_x \ E'_y)^\top$ 是出射光瞳上的电场矢量, J_{kl} ($k, l = x, y$) 描述入射 l 偏振分量与出射 k 偏振分量的耦合关系, 且 J_{kl} 均为复数。琼斯矩阵描述了进入光瞳的电场矢量的偏振特性变化, 即光瞳坐标 (\hat{f}, \hat{g}) 处的投影物镜偏振像差。根据线性代数可知^[11], 对于 2×2 的琼斯矩阵可用 4 个正交的埃尔米特矩阵表示, 泡利矩阵就是这样的一组基础矩阵^[12]:

$$\sigma_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \sigma_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \\ \sigma_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用泡利矩阵对(3)式中的琼斯矩阵进行分解, 则琼斯矩阵可写为

$$\mathbf{J}_{\text{Jones}} = \sum_{k=0}^3 a_k \sigma_k = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 & a_2 - ia_3 \\ a_2 + ia_3 & a_0 - a_1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 a_k ($k = 0, 1, 2, 3$) 是泡利矩阵的复数系数。根据每个泡利矩阵的本征偏振态分析各个系数的物理意义, 则有系数 a_0 的幅值代表标量透射率, 相位为标量像差, 而 $a_1 \sim a_3$ 的实部和虚部分别描述了不同本征偏振态之间的衰减和相位延迟, 即 x/y 方向线偏振, $45^\circ/135^\circ$ 方向线偏振和圆偏振。本文采用泽尼克多项式^[13]对整个光瞳上的泡利系数再次进行分解得到相应的泡利-泽尼克系数:

$$D(\hat{f}, \hat{g}) = \sum_{m=1}^{37} p_{z_m} R_m(\hat{f}, \hat{g}), \quad (6)$$

其中, $D(\hat{f}, \hat{g})$ 对应 a_0 的幅值、相位以及 $a_1 \sim a_3$ 的实部和虚部在光瞳上的分布, $R_m(\hat{f}, \hat{g})$ 是泽尼克多项式, p_{z_m} 是偏振像差的泡利-泽尼克系数。同标量

像差中的泽尼克系数一样, 偏振像差也可用一系列的泡利-泽尼克系数表示。下面对偏振像差的分析都将基于这一系列的泡利-泽尼克系数。此外, (2) 式中 I_{TCC} 为交叉传递系数:

$$I_{\text{TCC}}(\hat{f}', \hat{g}'; \hat{f}'', \hat{g}'', \Delta z) = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(\hat{f}, \hat{g}) H(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g} + \hat{g}', \Delta z) \times \\ H^*(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g} + \hat{g}'', \Delta z) d\hat{f} d\hat{g}, \quad (7)$$

式中 $J(\hat{f}, \hat{g})$ 是柯勒照明的有效光源强度分布。传统照明方式下有

$$J(\hat{f}, \hat{g}) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \text{circ}\left(\frac{\sqrt{\hat{f}^2 + \hat{g}^2}}{\sigma}\right), \quad (8)$$

式中 σ 为照明光源的部分相干因子。 I_{TCC} 中 $H(\hat{f}, \hat{g}, \Delta z)$ 是光瞳函数:

$$H(\hat{f}, \hat{g}, \Delta z) = \\ \exp[i2\pi\Delta z \sqrt{1 - NA^2(\hat{f}^2 + \hat{g}^2)}/NA^2], \quad (9)$$

式中 $\hat{f}^2 + \hat{g}^2 \leq 1$, 且 Δz 是指偏离成像面的归一化距离。

图 1 中黑色区域不透光, 白色区域透光, 灰色区域为透光相移区且相移大小为 180° 。图 1 中 w 与 p 分别为光栅图形的线宽和栅距, 对它们进行如(1)式的归一化则有 $\hat{w} = w/(\lambda/NA)$ 与 $\hat{p} = p/(\lambda/NA)$ 。这两个光栅图形进行成像时分别采用 y 与 x 方向的线偏振照明方式。由于光刻成像过程中的厚掩模效应具有类似像差的特性^[14], 因此可通过修正偏振像差系数来包含光刻成像过程中的厚掩模效应。此处仍使用基尔霍夫薄掩模近似, 则图 1(b) 中 Alt-PSM 光栅图形的衍射谱为

$$O(\hat{f}) = i \frac{\hat{w}}{\hat{p}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\hat{f} - \frac{n}{2\hat{p}}\right) \text{sinc}(\hat{w}\hat{f}) \sin(\pi\hat{p}\hat{f}), \\ n \in \mathbf{Z}, \quad (10)$$

式中 n 为能进入投影物镜光瞳的最高衍射级次。当 \hat{p} 满足 $1/[2(1+\sigma)] < \hat{p} < 3/[2(1+\sigma)]$ 时, 成像面上的光强分布由 ± 1 级衍射光干涉形成。此外, 传输矩阵为

$$\mathbf{M}(\hat{f}, \hat{g}) = \frac{1}{\hat{f}^2 + \hat{g}^2} \begin{bmatrix} \hat{g}^2 & -\hat{f}\hat{g} \\ -\hat{f}\hat{g} & \hat{f}^2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

将(8)~(11)式代入(2)式,则图 1(b)中的 Alt-PSM 光栅图形在成像面上的光强分布为

$$I(\hat{x}_i, \Delta z) = A_0 \{ A_1 + A_2 + \int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \exp[-i4\pi\hat{f}_0(\hat{f}\Delta z + \hat{x}_i)] \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, -\hat{f}_0) \mathbf{P}_A(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, -\hat{f}_0) d\hat{f}d\hat{g} + \int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \exp[i4\pi\hat{f}_0(\hat{f}\Delta z + \hat{x}_i)] \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, -\hat{f}_0, \hat{f}_0) \mathbf{P}_A(\hat{f}, \hat{g}, -\hat{f}_0, \hat{f}_0) d\hat{f}d\hat{g} \}, \quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned} \hat{f}_0 &= 1/(2\hat{p}), \\ A_0 &= [\hat{w}\text{sinc}(\hat{w}\hat{f}_0)/\hat{p}]^2 \\ \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}', \hat{f}'') &= \frac{(\hat{f} + \hat{f}')^2 (\hat{f} + \hat{f}'')^2}{[(\hat{f} + \hat{f}')^2 + \hat{g}^2][(\hat{f} + \hat{f}'')^2 + \hat{g}^2]}, \\ \mathbf{P}_A(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}', \hat{f}'') &= [a_0(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g}) - a_1(\hat{f} + \hat{f}', \hat{g})] \cdot [a_0(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g}) - a_1(\hat{f} + \hat{f}'', \hat{g})]^*, \\ A_1 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, \hat{f}_0) \mathbf{P}_A(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, \hat{f}_0) d\hat{f}d\hat{g}, \\ A_2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, -\hat{f}_0, -\hat{f}_0) \mathbf{P}_A(\hat{f}, \hat{g}, -\hat{f}_0, -\hat{f}_0) d\hat{f}d\hat{g}, \end{aligned} \quad (13)$$

由(13)式可知,由于掩模图形为一维图形且采用了线偏振照明,因此只有偏振像差 \mathbf{P}_A 的 a_0 和 a_1 两项对 Alt-PSM 光栅图形的空间像光强分布有影响。下面将围绕偏振像差的 a_0 和 a_1 这两项分析讨论偏振像差对光栅图形成像质量的影响以及相应的偏振像差补偿。

2.2 偏振像差线性灵敏度

结合(6)式中的泡利-泽尼克系数定义,(13)式中的偏振像差项 \mathbf{P}_A 具有如下表达式,

$$\begin{aligned} \text{A: Amp}(a_0) &= 1 - \sum_{m=1}^{37} p_{Z_m} R_m(\hat{f}, \hat{g}), \\ \text{B: Re}(a_1) &= \sum_{m=1}^{37} p_{Z_m} R_m(\hat{f}, \hat{g}), \\ \text{C: Pha}(a_0) &= \exp[-i(2\pi/\lambda) \sum_{m=1}^{37} p_{Z_m} R_m(\hat{f}, \hat{g})], \\ \text{D: Im}(a_1) &= -i(\pi/\lambda) \sum_{m=1}^{37} p_{Z_m} R_m(\hat{f}, \hat{g}). \end{aligned} \quad (14)$$

式中的四种像差情况分别对应 a_0 的幅值、 a_1 的实部、 a_0 的相位与 a_1 的虚部。将(14)式代入(12)式,当泡利-泽尼克系数较小时,可忽略偏振像差中的二次项^[15],通过求解

$$\begin{aligned} \partial I(\hat{x}_i, \Delta z = 0) / \partial \hat{x}_i &= 0, \\ \partial I(\hat{x}_i = 0, \Delta z) / \partial \Delta z &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

分别得到 IPE 与 BFS 的解析表达式,并进一步写为

$$\begin{aligned} X_{\text{IPE}} &= \sum_{m=1}^{37} S_{\text{IPE}-m} \cdot p_{Z_m}, \\ Z_{\text{BFS}} &= \sum_{m=1}^{37} S_{\text{BFS}-m} \cdot p_{Z_m}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中偏振像差线性灵敏度 S 为

$$\begin{aligned} S_{\text{IPE}-m-A} &= S_{\text{IPE}-m-B} = S_{\text{BFS}-m-A} = S_{\text{BFS}-m-B} \equiv 0, \\ S_{\text{IPE}-m-C} &= -\frac{1}{2\lambda\hat{f}_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, -\hat{f}_0) \times \\ &\quad [R_m(\hat{f} + \hat{f}_0, \hat{g}) - R_m(\hat{f} - \hat{f}_0, \hat{g})] d\hat{f}d\hat{g} / \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, -\hat{f}_0) d\hat{f}d\hat{g} \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_{\text{IPE}-m-D} &= -S_{\text{IPE}-m-C}/2, \\
S_{\text{BFS}-m-C} &= -\frac{1}{2\lambda\hat{f}_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, -\hat{f}_0) \hat{f} \times \\
&\quad [R_m(\hat{f} + \hat{f}_0, \hat{g}) - R_m(\hat{f} - \hat{f}_0, \hat{g})] d\hat{f} d\hat{g} / \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int J(\hat{f}, \hat{g}) \mathbf{M}_0(\hat{f}, \hat{g}, \hat{f}_0, -\hat{f}_0) \hat{f}^2 d\hat{f} d\hat{g} \right], \\
S_{\text{BFS}-m-D} &= -S_{\text{BFS}-m-C}/2.
\end{aligned} \tag{17}$$

上式中的下标 A、B、C 和 D 分别对应(14)式中的四种像差情况。 $S_{\text{IPE}-m-A}$ 表示情况 A 中 m 阶像差引起的 IPE 的灵敏度,其他的灵敏度解析表达式具有类似的解释。(17)式中只有奇像差项的 $S_{\text{IPE}-m-C}$ 和 $S_{\text{IPE}-m-D}$, 偶像差项的 $S_{\text{BFS}-m-C}$ 和 $S_{\text{BFS}-m-D}$ 具有非零值,即只有 a_0 的相位和 a_1 的虚部会引起 Alt-PSM 光栅图形出现 IPE 或 BFS。结合(16)式与(17)式,可知在 IPE 与偏振像差奇像差项之间、BFS 与偶像差项之间具有线性关系,并且通过解析表达式(17)式可直接快速地计算相应的线性灵敏度。

2.3 偏振像差与标量像差的关系

根据水平光栅和垂直光栅的衍射谱的相似性,图 1(c)中的光栅成像时,IPE 与奇像差项,BFS 与偶像差项之间具有类似的线性关系,具体如下。

1) m 和 $m+1$ 分别为 x 和 y 方向上奇像差的泽尼克阶数,如 Z_7 和 Z_8 , 有:

$$\begin{aligned}
S_{\text{IPE}-m+1-C-y} &= S_{\text{IPE}-m-C-x}, \\
S_{\text{IPE}-m+1-D-y} &= -S_{\text{IPE}-m-D-x}.
\end{aligned} \tag{18}$$

2) 球差项:

$$\begin{aligned}
S_{\text{BFS}-m-C-y} &= S_{\text{BFS}-m-C-x}, \\
S_{\text{BFS}-m-D-y} &= -S_{\text{BFS}-m-D-x}.
\end{aligned} \tag{19}$$

3) 像散项:

$$\begin{aligned}
S_{\text{BFS}-m-C-y} &= -S_{\text{BFS}-m-C-x}, \\
S_{\text{BFS}-m-D-y} &= S_{\text{BFS}-m-D-x}.
\end{aligned} \tag{20}$$

其中,下标 x 和 y 分别对应图 1(b)和(c)中的 Alt-PSM 光栅图形。由(18)~(20)式可以看出,偏振像差 $\text{Pha}(a_0)$ 与 $\text{Im}(a_1)$ 对成像质量的影响是不同的,主要体现在以下两个方面:1) $\text{Pha}(a_0)$ 的奇像差项引起的 x 和 y 方向上的 IPE 是相同的,而 $\text{Im}(a_1)$ 的奇像差项引起的 x 和 y 方向上的 IPE 则相反;2) $\text{Pha}(a_0)$ 与 $\text{Im}(a_1)$ 的球差项与像散项对成像质量的影响互换,即 $\text{Pha}(a_0)$ 的球差项和 $\text{Im}(a_1)$ 的像散项使沿 x 和 y 方向的光栅具有相同的 BFS,而 $\text{Pha}(a_0)$ 的像散项和 $\text{Im}(a_1)$ 的球差项使沿 x 和 y 方向的光栅具有相反的 BFS。根据(16)~(20)式,对比光栅图形成像时标量像差对成像质量的影响,可知偏振像差

与标量像差之间具有明显的差别与联系。

2.4 基于线性模型与标量像差控制的偏振像差补偿方法

高级光刻投影光学系统的球差、像散和彗差等参数都是可调的^[16],并且标量像差 Z_7 、 Z_9 、 Z_{12} 等与 Alt-PSM 光栅图形 IPE、BFS 之间具有线性关系,这一关系通常被用来检测标量像差^[17]。基于 2.2 节中的偏振像差线性灵敏度以及 2.3 节中的偏振像差与标量像差之间的关系,可以间接建立偏振像差与投影物镜物理结构位置之间的映射关系。根据像差线性灵敏度公式调整投影物镜物理结构位置、控制相应的标量像差以减小或抵消偏振像差对成像质量的影响,即可实现偏振像差补偿。补偿过程中,根据(17)~(20)式可快速确定需要调整的标量像差的种类和补偿量进而提高偏振像差的补偿速度。例如补偿 $\text{Im}(a_1)$ 的奇像差项引起的 IPE 时,可以调整影响投影物镜彗差、三波差等奇像差的光学元件,使得这类标量奇像差引起的 IPE 与偏振像差引起的 IPE 大小相等,方向相反,即

$$S_{\text{IPE}-m-D} \cdot p_{Z_m} = -(S_7 \cdot Z_7 + S_{10} \cdot Z_{10} + \dots), \tag{21}$$

其中,等式左边的灵敏度由(17)式确定, p_{Z_m} 为待补偿偏振像差的泡利-泽尼克系数,右边为需要调整的标量像差泽尼克系数与灵敏度。同样,通过调整像散、球差等标量偶像差可以对偏振像差引起的 BFS 进行补偿。对偏振像差奇像差项引起的 IPE 进行补偿的目标是使 IPE 最小化,而偏振像差的偶像差项使不同的图形具有不同的最佳焦面,对这类偏振像差的补偿目标则是使不同图形的 BFS 差值最小,从而增大光刻成像的工艺窗口。

3 仿真结果与分析

3.1 计算像差灵敏度

利用本方法补偿偏振像差时,需要计算像差灵敏度。由于(17)式得到了像差灵敏度的解析表达

式,改变成像条件或光栅图形结构参数时不需要通过光刻仿真软件计算整个光刻成像过程来得到相应的灵敏度,因此大大提高了偏振像差的补偿速度。利用(17)式计算像差灵敏度时,所得的灵敏度数值与以下成像参数有关: λ 、 σ 、 NA 、Alt-PSM 光栅图形栅距 p 以及相应的像差种类与系数。以(14)式中的情况 C 与 D,即 $\text{Pha}(a_0)$ 与 $\text{Im}(a_1)$ 具有 Z_7 (彗差)

与 Z_9 (球差) 两种像差为例计算灵敏度。光栅图形成像过程中通常需要对 NA 与 σ 进行调整以提高成像质量,因此此处讨论灵敏度随 (NA, σ) 的变化情况。此时, $\lambda=193 \text{ nm}$, $w=45 \text{ nm}$, $p=90 \text{ nm}$, σ 的变化范围为 $0.3 \sim 0.8$, NA 的变化范围为 $1.1 \sim 1.35$, 计算得到的像差灵敏度分布如图 2 所示。

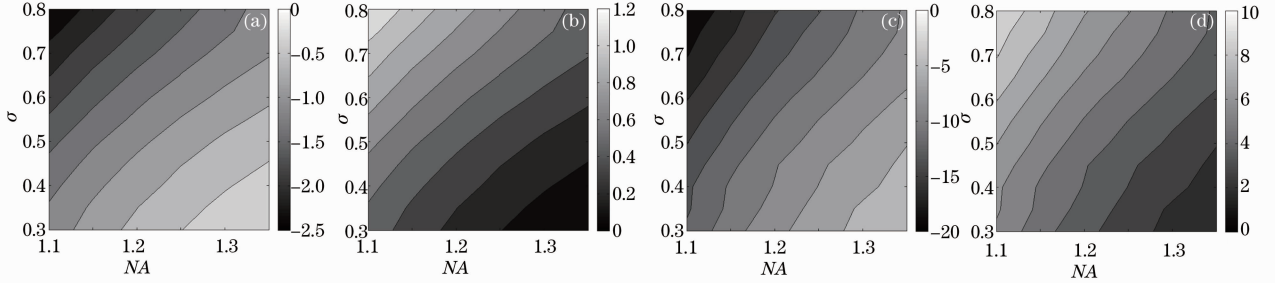


图 2 像差灵敏度随 NA 和 σ 的变化情况。(a) $S_{\text{IPE-7-C}}$; (b) $S_{\text{IPE-7-D}}$; (c) $S_{\text{BFS-9-C}}$; (d) $S_{\text{BFS-9-D}}$

Fig. 2 Wavefront aberration sensitivities vary with NA and σ . (a) $S_{\text{IPE-7-C}}$; (b) $S_{\text{IPE-7-D}}$; (c) $S_{\text{BFS-9-C}}$; (d) $S_{\text{BFS-9-D}}$

虽然图 2 只给出了 Z_7 和 Z_9 的灵敏度分布,但是只要知道所需的成像参数就能根据像差灵敏度的解析表达式计算相应的灵敏度。上述灵敏度计算结果可评估特定偏振像差对 Alt-PSM 光栅图形成像质量的影响,也是偏振像差补偿过程中选择和调整相应标量像差的基础。因此,计算像差线性灵敏度是基于线性模型与标量像差控制的偏振像差补偿方法的前提。

3.2 补偿成像位置偏移

Alt-PSM 光栅图形成像时,偏振像差的奇像差项(Z_7 、 Z_{10} 等)引起的 IPE 影响光刻成像套刻精度,降低成像质量。调整标量奇像差补偿偏振像差的奇像差项引起的 IPE 时,首先查找灵敏度分布(如图 2 所示)得到相应的像差灵敏度数值,再根据(21)式计算相应的标量像差调整补偿量。下面同样以 $\text{Im}(a_1)$ 具有 Z_7 像差为例进行说明。此时光刻成像参数如下: $\lambda=193 \text{ nm}$, $w=45 \text{ nm}$, $p=90 \text{ nm}$, $\sigma=0.3$, $NA=1.35$ 。若单独调整标量像差 Z_7 对其进行补偿时,则调整补偿量为

$$O_{\text{IPE-7-C}} = -\frac{S_{\text{IPE-7-D}}}{S_{\text{IPE-7-C}}} p_{Z_7}, \quad (22)$$

式中 p_{Z_7} 为 $\text{Im}(a_1)$ 的 Z_7 泡利-泽尼克系数, $O_{\text{IPE-7-C}}$ 为标量像差 Z_7 的调整补偿量。未进行偏振像差补偿时, $\text{Im}(a_1)$ 的 Z_7 引起的 IPE 如图 3 中的方形线所示,且 IPE 与泡利-泽尼克系数之间具有线性关系。假设投影物镜的标量像差能精确地调整至任意数值,则能对偏振像差进行理想补偿,完全抵消偏振像

差引起的 IPE。实际上投影物镜受光学元件与光学结构设计的限制,标量像差并不能精确地调整至任意数值。当标量像差 Z_7 的调整精度为 $\pm 1 \text{ nm}$ 时,将 $\text{Im}(a_1)$ 的奇像差项 Z_7 、由(22)式确定的 $O_{\text{IPE-7-C}}$ 以及调整误差同时代入(12)式并根据(15)式可计算补偿后的 IPE,结果如图 3 中的倒三角线与星形线所示。由图 3 可知,调整标量像差 Z_7 后, $\text{Im}(a_1)$ 具有 0.05λ 的 Z_7 像差时引起的 IPE 由原来的 0.57 nm 降低为 -0.12 nm ($+1 \text{ nm}$ 的 Z_7 调整误差)和 0.11 nm (-1 nm 的 Z_7 调整误差)。此外, $\text{Im}(a_1)$ 具有不同数值的 Z_7 像差时,补偿效果几乎相同。由此可以看出该偏振像差补偿方法的补偿效果主要由标量像差调整精度及 Alt-PSM 光栅图形对被调整的标量像差的 IPE 灵敏度决定。当偏振

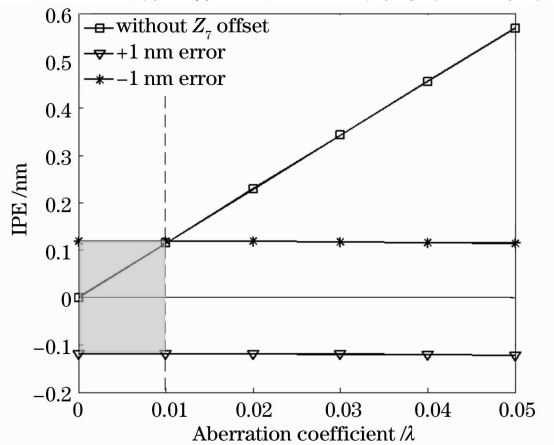


图 3 固定栅距的光栅图形的 IPE 补偿结果

Fig. 3 Compensation results for IPE of grating pattern with certain pitch

像差很小,标量像差调整误差引起的 IPE 大于偏振像差引起的 IPE 时,不能使用该补偿方法,即该补偿方法的适用范围为偏振像差 $\text{Im}(a_1)$ 的 Z_7 像差系数大于图中灰色区域所确定的系数。

基于上述 IPE 补偿过程与补偿效果分析,可知不同的 Alt-PSM 光栅图形具有不同的补偿效果。固定 $\text{Im}(a_1)$ 的 Z_7 像差系数为 0.05λ , 改变光栅图形的栅距 p , 且它的变化范围设为 $90 \sim 150 \text{ nm}$, 此时

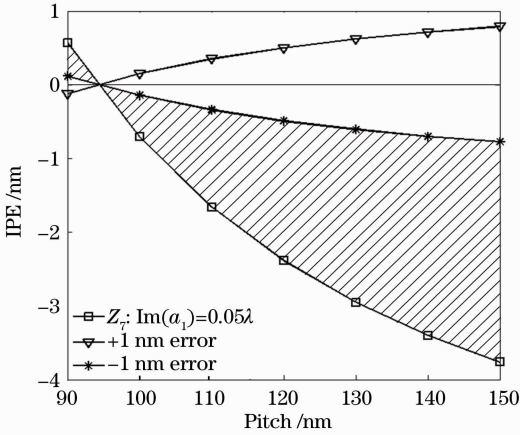


图 4 不同栅距的光栅图形的 IPE 补偿结果

Fig. 4 Compensation results for IPE of grating patterns with different pitches

补偿后的 IPE 结果如图 4 所示。图中斜线区域表示调整标量像差 Z_7 的 IPE 补偿效果。

3.3 补偿最佳焦面偏移

Alt-PSM 光栅图形成像时,偏振像差的偶差项(Z_9 等)引起 BFS,减小光刻成像工艺窗口。为了增大光刻成像工艺窗口,BFS 的补偿效果以不同栅距的 Alt-PSM 光栅图形之间的 BFS 差值为标准。下面以 $\text{Im}(a_1)$ 具有 Z_9 像差为例进行说明。根据 (19) 式,该偏振像差对光栅图形成像质量的影响类

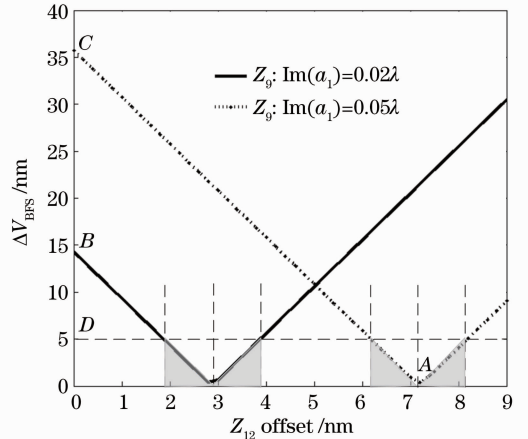


图 5 $O_{\text{BFS}-12-C}$ 与 ΔV_{BFS} 的关系

Fig. 5 Relationship between $O_{\text{BFS}-12-C}$ and ΔV_{BFS}

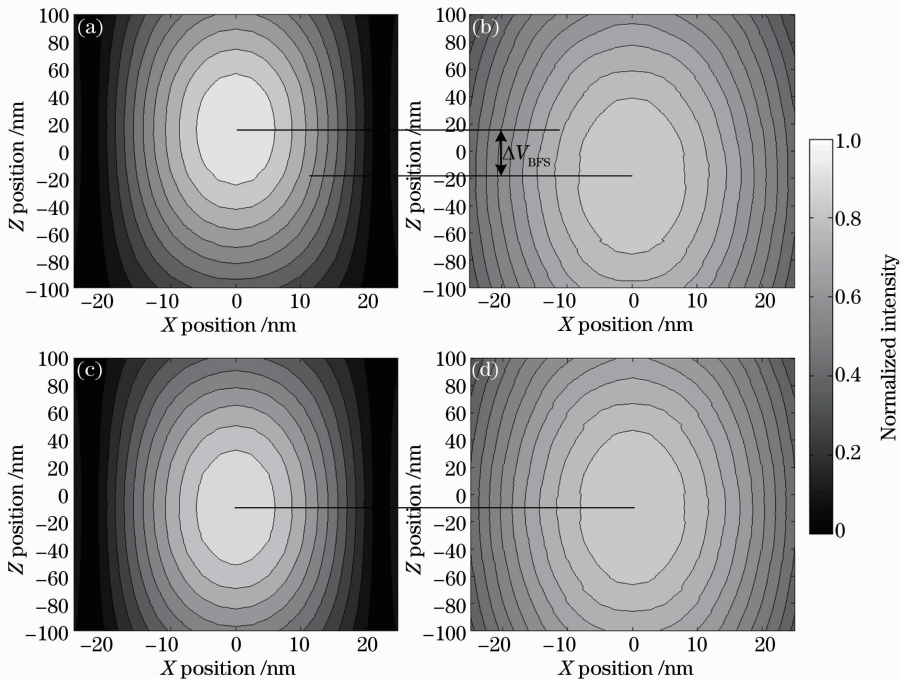


图 6 BFS 补偿前后的光栅图形空间像对比。(a) 补偿前,栅距为 90 nm; (b) 补偿前,栅距为 150 nm; (c) 补偿后,栅距为 90 nm; (d) 补偿后,栅距为 150 nm

Fig. 6 Comparison of the aerial images before and after BFS compensation. (a) Before compensation, 90 nm pitch; (b) before compensation, 150 nm pitch; (c) after compensation, 90 nm pitch; (d) after compensation, 150 nm pitch

似于标量像差像散,因此选择调整标量像差三阶像散 Z_{12} 进行 BFS 补偿。成像参数如下: $\lambda = 193 \text{ nm}$, $\sigma = 0.3$, $NA = 1.35$, p 取 90、100、110、120、130、140、150 nm。调整标量像差 Z_{12} 时,对应每一个栅距都有一个补偿后的 BFS 值,即

$$V_{\text{BFS_pitch}} = S_{\text{BFS-12-C}} \cdot O_{\text{BFS-12-C}} + S_{\text{BFS-9-D}} \cdot p_{z_9}, \quad (23)$$

式中 p_{z_9} 为 $\text{Im}(a_1)$ 的 Z_9 泡利-泽尼克系数,最佳的 Z_{12} 调整补偿量 $O_{\text{BFS-12-C}}$ 能使不同栅距的光栅图形之间的最佳焦面偏移差值 $\Delta V_{\text{BFS}} = \max(V_{\text{BFS_pitch}}) - \min(V_{\text{BFS_pitch}})$ 具有最小值。图 5 为不同调整补偿量 $O_{\text{BFS-12-C}}$ 对应的 ΔV_{BFS} , 由该曲线的最小值可以确定最佳的 $O_{\text{BFS-12-C}}$ 。由图 5 可知,当 $\text{Im}(a_1)$ 的 Z_9 像差系数分别为 0.02λ 和 0.05λ , 标量像差的调整精度为 $\pm 1 \text{ nm}$ 时, ΔV_{BFS} 分别由补偿前的 14.3 nm(B 点)和 35.7 nm(C 点)减小至 5.0 nm(D 点)。在精确调整 Z_{12} 的情况下,即调整补偿量 $O_{\text{BFS-12-C}}$ 等于图中 A 点确定的数值 7.2 nm, 补偿前后的 ΔV_{BFS} 对比图如图 6 所示。由图 6 可知,栅距为 90 nm 与 150 nm 的光栅图形之间具有最大的 ΔV_{BFS} , 通过偏振像差补偿后,有效地减小了两者之间的 ΔV_{BFS} , 增大了不同栅距的光栅图形的光刻成像工艺窗口。

4 结 论

提出了一种基于线性模型的光刻投影物镜偏振像差补偿方法,可以快速、高精度地补偿偏振像差对光刻成像质量的不利影响。基于 Hopkins 矢量部分相干成像理论,得到了投影物镜偏振像差引起的光栅图形成像位置偏移与最佳焦面偏移的线性解析表达式。利用该线性解析表达式分析了偏振像差对光栅成像质量的影响并建立了线性模型描述两者之间的关系。仿真结果表明,通过该线性模型调整标量像差进而补偿偏振像差影响的方法有效地减小了光栅图形 IPE 以及不同栅距的光栅图形之间的最佳焦面偏移差值,提高了光栅图形成像质量。

参 考 文 献

- 1 J. Kye, G. McIntyre, Y. Norihiro *et al.*. Polarization aberration analysis in optical lithography systems [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61540E
- 2 B. Geh, J. Ruoff, J. Zimmermann *et al.*. The impact of projection lens polarization properties on lithographic process at hyper-NA [C]. *SPIE*, 2007, **65200F**: 65200F
- 3 J. Ruoff, M. Totzeck. Using orientation Zernike polynomials to predict the imaging performance of optical systems with birefringent and partly polarizing components [C]. *SPIE*, 2010, **7652**: 76521T
- 4 G. R. McIntyre, J. Kye, H. Levinson. Polarization aberrations in hyper-numerical-aperture projection printing: a comparison of various representations [J]. *J. Microlithogr. Microfabr. Microsyst.*, 2006, **5**(3): 033001
- 5 N. Kita. Technique to manage polarization aberrations [J]. *Opt. Rev.*, 2009, **16**(3): 305~312
- 6 T. Matsuyama, N. Kita. Polarization aberration control for ArF projection lenses [C]. *SPIE*, 2009, **7274**: 72741M
- 7 T. Arai, A. Yamada, K. Mori *et al.*. Optimization procedure of exposure tools with polarization aberrations [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 692411
- 8 H. H. Hopkins. Canonical pupil coordinates in geometrical and diffraction image theory [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1964, **1**(suppl. 1-1): 31~35
- 9 A. K. Wong. Optical Imaging in Projection Micro-Lithography [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005. 67~72, 102~107
- 10 R. Clark Jones. A new calculus for the treatment of optical systems [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, **31**(7): 488~493
- 11 R. Barakat. Exponential versions of the Jones and Mueller-Jones polarization matrices [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(1): 158~163
- 12 N. Yamamoto, J. Kye, H. J. Levinson. Polarization aberration analysis using Pauli-Zernike representation [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 65200Y
- 13 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 228~257
- 14 V. Agudelo, P. Evanschitzky, A. Erdmann *et al.*. Evaluation of various compact mask and imaging models for the efficient simulation of mask topography effects in immersion lithography [C]. *SPIE*, 2012, **8326**: 832609
- 15 M. Totzeck, P. Gräupner, T. Heil *et al.*. Polarization influence on imaging [J]. *J. Microlithogr. Microfabr. Microsyst.*, 2005, **4**(3): 031108
- 16 T. Yoshihara, B. Takeshita, A. Shigenobu *et al.*. New projection optics and aberration control system for the 45-nm node [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 652022
- 17 Z. C. Qiu, X. Z. Wang, Q. Y. Bi *et al.*. Translational-symmetry alternating phase shifting mask grating mark used in a linear measurement model of lithographic projection lens aberrations [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3654~3663

栏目编辑: 张 腾