

文章编号: 1004-924X(2016)03-0469-08

掩模位置误差对光刻投影物镜畸变的影响

杨 旺^{1,2*}, 黄 玮¹, 尚红波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为使光刻投影物镜满足光刻工艺的要求, 研究了掩模位置误差对光刻投影物镜引入的畸变。采用勒让德多项式描述光刻投影物镜的畸变, 并应用勒让德多项式对光刻投影物镜进行了畸变分析及畸变补偿。利用以上方法, 对一台工作波长为 193 nm, 数值孔径 (NA) 为 0.75 的光刻投影物镜进行了畸变分析。结果显示: 当掩模面 3 个方向的平移公差为 1.0 μm , 绕 3 个轴的转动公差为 0.1 mrad 时, 光刻投影物镜标定前后的畸变分别为 2 113.2 nm 和 10.0 nm。利用勒让德多项式进行了畸变拟合, 获得了多项式中各项系数, 并给出掩模面位置误差的畸变敏感度系数; 然后利用畸变敏感度系数对掩模面的随机位置误差进行了公差分析和补偿。结果表明, 将光刻投影物镜畸变控制在 2 nm 以内时, 掩模面 z 方向的位置公差为 $\pm 2.0 \mu\text{m}$, 掩模面与 x 轴与 y 轴的倾斜公差分别为 $\pm 22.3 \mu\text{rad}$ 和 $\pm 55.3 \mu\text{rad}$ 。实验结果证明提出的方法适用于对掩模面引入的光刻投影物镜畸变进行有效分析及补偿。

关键词: 光刻; 光学设计; 光刻投影物镜; 畸变; 勒让德多项式; 公差分析

中图分类号: TN305.7; TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162403.0469

Effect of alignment errors of reticle on distortion in lithographic projection lens

YANG Wang^{1,2*}, HUANG Wei¹, SHANG Hong-bo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

* Corresponding author, E-mail: yangwang@ciomp.ac.cn

Abstract: To meet the requirement of lithographic tool for the distortion in a lithographic projection lens, the distortion of the optical lithography introduced by alignment errors of a reticle was researched. The Legendre polynomials were used to describe the distortion of lithographic projection lens, and then it was taken to analyze and compensate the distortion. Based on the proposed methods, a lithographic projection lens with a Numerical Aperture (NA) of 0.75 and the working wavelength of 193 nm was analyzed. The analysis results show that the combinational tolerances of the reticle tilt error in 1.0 μm and the reticle translation error in 0.1 mrad have aroused by uncalibrated distortions of 2 113.2 nm and 10.0 nm. The Legendre polynomial was used to fit the distortion to obtain the coefficients of the Legendre polynomial, and then to get the distortion sensitivity of the reticle alignment errors. The distortion sensitivity then was used to perform the tolerance analysis and compensation for the random position errors of the reticle. As the distortion was expected to be less 2 nm, the requirement of the reticle z -direction tolerance is $\pm 2.0 \mu\text{m}$ and those of the reticle x -tilt and y -tilt tolerances are $\pm 22.3 \mu\text{rad}$ and $\pm 55.3 \mu\text{rad}$.

收稿日期: 2015-05-26; 修订日期: 2015-07-20

基金项目: 国家重大科技专项资助课题

μm ad, respectively. The results demonstrate that the way proposed is suitable for analyzing and compensating the distortion introduced by reticle alignment errors in lithographic projection lenses.

Key words: lithography; optical design; lithographic projection lens; optical distortion; Legendre polynomials; tolerance analysis

1 引言

光刻投影物镜的主要功能是将掩模图形按一定比例近似完美地成像到硅片上,这就要求光刻投影物镜必须满足高像质、低畸变的条件。随着光刻工艺的发展,套刻工艺对光刻投影物镜的像质、畸变等要求也越来越高。其中,畸变是影响光刻投影物镜成像的关键^[1]。工作波长为193 nm的产品化光刻投影物镜的波像差和畸变都为纳米级^[2]。所以,畸变分析及控制是光刻投影物镜设计者必须考虑的问题。

传统的光学系统中,计量仪器、光学成像测绘系统和光学成像定位系统等对畸变的要求较高。一般用百分比表示畸变,而畸变要求较高的系统则达到万分之几或十万分之几,少数系统在畸变测量后会通过数据处理来降低畸变的影响^[3-7]。通常采用近轴光学理论对光学系统进行畸变分析,采用赛德尔像差对畸变进行描述^[8]。但是,赛德尔像差一般只应用三阶畸变对光学系统进行畸变描述、分析和补偿,较少应用到五阶畸变。也有人提出曲线拟合等特殊方法针对光学系统进行畸变分析^[9],但该方法难以应用到光刻投影物镜系统中。国外对套刻精度研究提出了一些畸变分析方法^[10-12],如圆域极坐标多项式和矩形区域二维多项式,不过前者不适用于光刻投影物镜的矩形视场畸变分析,而后者针对光刻投影物镜缺乏物理意义。

光刻投影物镜具有相对较大的矩形视场和较高的畸变要求,利用赛德尔像差无法全面描述其畸变,从而对畸变的分析和补偿产生一定制约。本文针对光刻投影物镜的特点,推导了掩模面位置误差对畸变的影响,并利用勒让德正交多项式对畸变进行描述。针对一个典型光刻投影物镜进行了畸变分析,给出了掩模面位置误差的畸变敏感度矩阵,并利用畸变敏感度矩阵对畸变进行了补偿,给出了掩模面的位置公差。

2 原理分析

2.1 畸变定义

几何光学理论定义畸变为某物点主光线在高斯

像面的位置与其理想像点的位置差,这是大多数光学设计软件光线追迹获得畸变的基本理论^[13]。当光学系统对畸变要求较高,需要考虑实际像点的光强能量分布时,需要引入物理光学理论,定义畸变为某物点在高斯像面成像点光强能量中心位置与其理想像点的位置差。不过,仍可以广义定义畸变为某物点在像面的实际成像点与理想成像点的位置差,因为这样可以避免实际成像点描述不同而导致的畸变定义不同。

假设光刻投影物镜的像面矩形视场为 $[-x_0, x_0], [-y_0, y_0]$,物镜像面某理想像点为 (x, y) ,其中 $-1 \leq \frac{x}{x_0} \leq 1, -1 \leq \frac{y}{y_0} \leq 1$,与它对应的实际像点为 (x_i, y_i) ,所以畸变可以表示为:

$$D(x, y) = (x_i, y_i) - (x, y) = (D_x, D_y), \quad (1)$$

其中: $D(x, y)$ 为畸变的矢量表示, D_x 为 x 方向的畸变, D_y 为 y 方向的畸变。畸变的大小 D_{st} 可以表示为:

$$D_{st} = |D(x, y)| = \sqrt{D_x^2 + D_y^2}. \quad (2)$$

式(1)~式(2)将畸变进行一次正交分解为 D_x, D_y ,能够完整地描述单视场相对理想像点的畸变。

2.2 畸变分布表示

为研究光刻机和光刻投影物镜矩形视场的畸变分布规律,需建立具有一定完备性的正交畸变基,以更好地分析引起畸变的原因和畸变补偿方法。由于光刻投影物镜是矩形视场,而勒让德多项式是在矩形区域内的正交基多项式^[14],所以可以用它表示畸变,该多项式的各个项代表的畸变具有正交性。勒让德多项式表示为:

$$\begin{cases} D_{l-m-n}(a, b) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N c_{lmn} P_m(a) P_n(b) \\ d_{l-m-n}(a, b) = P_m(a) P_n(b) \\ P_m(a) = \sum_{k=0}^K (-1)^k \frac{(2m-2k)!}{2^m k! (m-k)! (m-2k)!} a^{m-2k}, \\ P_n(b) = \sum_{k=0}^K (-1)^k \frac{(2n-2k)!}{2^n k! (n-k)! (n-2k)!} b^{n-2k} \end{cases} \quad (3)$$

其中: l 表示两个方向的畸变,符号取 x 或 y ; $K, m,$

n 为整数, $K = \frac{n}{2}$ 或 $\frac{n-1}{2}$; c_{lmn} 为多项式系数; 将像方视场进行归一化, 得到: $-1 \leq a \leq 1, -1 \leq b \leq 1$; $D_{l-m-n}(a, b)$ 为勒让德正交多项式; d_{l-m-n} 为畸变正交基, 如表1所示。

表1 勒让德多项式表示的畸变正交基

Tab. 1 List of x and y distortion orthogonal components of Legendre polynomials

No.	Type of distortion	Name
1	$d_{l-0-0}(a, b) = 1$	像面平移项
2	$d_{l-1-0}(a, b) = a$	倍率项或像面旋转项
3	$d_{l-0-1}(a, b) = b$	倍率项或像面旋转项
4	$d_{l-1-1}(a, b) = ab$	二阶XY畸变
5	$d_{l-2-0}(a, b) = \frac{1}{2}(3a^2 - 1)$	二阶X畸变
6	$d_{l-0-2}(a, b) = \frac{1}{2}(3b^2 - 1)$	二阶Y畸变
7	$d_{l-2-1}(a, b) = \frac{1}{2}(3a^2b - b)$	三阶X2Y1畸变
8	$d_{l-1-2}(a, b) = \frac{1}{2}(3ab^2 - a)$	三阶X1Y2畸变
9	$d_{l-3-0}(a, b) = \frac{1}{2}(5a^3 - 3a)$	三阶X畸变
10	$d_{l-0-3}(a, b) = \frac{1}{2}(5b^3 - 3b)$	三阶Y畸变
11	$d_{l-2-2}(a, b) = \frac{1}{4}(9a^2b^2 - 3a^2 - 3b^2 + 1)$	四阶X2Y2畸变
12	$d_{l-3-1}(a, b) = \frac{1}{2}(5a^3b - 3ab)$	四阶X3Y1畸变
13	$d_{l-1-3}(a, b) = \frac{1}{2}(5ab^3 - 3ab)$	四阶X1Y3畸变
14	$d_{l-4-0}(a, b) = \frac{1}{8}(35a^4 - 30a^2 + 3)$	四阶X畸变
15	$d_{l-0-4}(a, b) = \frac{1}{8}(35b^4 - 30b^2 + 3)$	四阶Y畸变
16		

表1中每项畸变正交基都代表一种畸变分布, 每项畸变分布之间具有正交性。根据正交多项式的特点, 可得畸变性质如下:

(1) 对畸变进行拟合, 各项畸变系数互不影响, 利于畸变的独立性分析。

(2) 任何矩形视场的畸变都可以通过畸变正交基的线性组合表示。

(3) 高阶畸变项是高阶项和低阶项的线性组合, 低阶项的线性组合对高阶项具有畸变补偿作用。

2.3 畸变分析

光刻投影物镜对畸变的要求极为苛刻, 畸变要求为纳米量级, 光学设计时需要考虑所有对畸变有纳米量级以上影响的因素。其中, 掩模面位置误差是影响畸变的重要因素之一。

为便于分析光刻投影物镜的畸变, 设定如下条件: 在光刻投影物镜坐标系下, 像面矩形视场为 $[-x_0, x_0], [-y_0, y_0]$, 物方视场中 Q 点坐标为 (x_Q, y_Q) , 理想成像点坐标为 (x, y) , 物镜系统倍率为 M , 存在 $Mx_Q = x$ 和 $My_Q = y$, 光刻投影物镜的波像差足够小, 像点的光强分布不影响系统畸变。

由于物面(掩模面)安装必然存在误差, 掩模面的平移、旋转、倾斜均会引起畸变, 因此系统畸变测试结果中包含掩模面安装误差引起的畸变。为更好地识别光刻投影物镜本身的畸变, 需要分析掩模面安装引起的畸变, 掌握掩模面安装误差引起畸变的特点。

当掩模面安装存在 x 向和 y 向平移误差时, x 方向上平移 t_x 和在 y 方向上平移 t_y , 物方视场中 Q 点物面坐标系的坐标变换为 (x'_Q, y'_Q) , 即有:

$$\begin{cases} x'_Q = x_Q - t_x \\ y'_Q = y_Q - t_y \end{cases} \quad (4)$$

根据物镜成像关系, 可知畸变为:

$$\begin{cases} D_x(x, y) = D_x(Mx_Q, My_Q) = Mx'_Q - Mx_Q = Mt_x \\ D_y(x, y) = D_y(Mx_Q, My_Q) = My'_Q - My_Q = Mt_y \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 掩模面平移会引起像面平移, 产生常数项畸变, 该畸变可以通过勒让德多项式像面平移项表示, 掩模面平移量的 M 倍为像面平移量。

当掩模面安装存在旋转误差时, 掩模面绕 z 轴旋转角度 φ , 物方视场中 Q 点物面坐标系的坐标变换为 (x'_Q, y'_Q) , 即有:

$$\begin{cases} x'_Q = x_Q \cos \varphi + y_Q \sin \varphi \\ y'_Q = -x_Q \sin \varphi + y_Q \cos \varphi \end{cases} \quad (6)$$

根据物镜成像关系, 可知畸变为:

$$\begin{cases} D_x(x, y) = D_x(Mx_Q, My_Q) = \\ M(x_Q \cos \varphi + y_Q \sin \varphi) - Mx_Q = \\ -2x \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + y \sin \varphi \\ D_y(x, y) = D_y(Mx_Q, My_Q) = \\ M(-x_Q \sin \varphi + y_Q \cos \varphi) - My_Q = \\ -x \sin \varphi - 2y \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

因为旋转角度非常小, 可以近似 $\sin \varphi \approx \varphi$, φ^2 阶量可以忽略, 式(7)可以简化为:

$$\begin{cases} D_x(x, y) = D_x(Mx_Q, My_Q) = \varphi y_0 \cdot \frac{y}{y_0} \\ D_y(x, y) = D_y(Mx_Q, My_Q) = -\varphi x_0 \cdot \frac{x}{x_0} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,掩模面旋转会引起像面旋转,产生一阶线性项,该项可以通过勒让德多项式像面旋转项表示。掩模面旋转量会引起等量的像面旋转。

当掩模面安装存在倾斜误差时,假设掩模面过物镜坐标系原点,掩模面与物镜坐标系 x 轴的夹角为 α ,与物镜坐标系 y 轴的夹角为 β ,物方视场中 Q 点物面坐标系的坐标变换为 (x'_Q, y'_Q) ,即有:

$$\begin{cases} x'_Q = x_Q \cos \alpha \\ y'_Q = y_Q \cos \beta \end{cases} \quad (9)$$

为分析光刻投影物镜畸变,需要得到等效 Q 点的 P 点坐标,这与实际的光线传播相关。光刻投影物镜要求物像双方远心,但是实际物镜很难实现物方理想远心,仍然存在物方远心度误差。因此,假设光刻投影物镜存在一定的物方远心度,入瞳中心位置在 $(0, 0, Z_T)$ 。在物镜坐标系中,经 $(0, 0, Z_T)$ 和原视场点 $(x_Q, y_Q, 0)$ 的光线与掩模面的交点为 P 点, P 点坐标可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{x_P}{x_Q} = \frac{y_P}{y_Q} = \frac{z_P - z_T}{-z_T} \\ x_P \sin \alpha + y_P \sin \beta + z_P = 0 \end{cases} \quad (10)$$

交点 P 的坐标 (x_P, y_P, z_P) 为:

$$\begin{cases} x_P = \frac{x_Q z_T}{z_T - x_Q \sin \alpha - y_Q \sin \beta} \\ y_P = \frac{y_Q z_T}{z_T - x_Q \sin \alpha - y_Q \sin \beta} \\ z_P = -\frac{x_Q z_T \sin \alpha + y_Q z_T \sin \beta}{z_T - x_Q \sin \alpha - y_Q \sin \beta} \end{cases} \quad (11)$$

P 点在物面坐标系的坐标为

$$\begin{cases} x'_P = \frac{2x_Q z_T \cos \alpha}{2z_T - x_Q \sin 2\alpha - y_Q \sin 2\beta} \\ y'_P = \frac{2y_Q z_T \cos \beta}{2z_T - x_Q \sin 2\alpha - y_Q \sin 2\beta} \\ z'_P = -\frac{x_Q z_T \sin 2\alpha + y_Q z_T \sin 2\beta}{2z_T - x_Q \sin 2\alpha - y_Q \sin 2\beta} \end{cases} \quad (12)$$

那么,畸变可以表示为:

$$\begin{cases} D_x(x, y) = D_x(Mx_Q, My_Q) = Mx'_P - Mx_Q = \\ \frac{2Mz_T(\cos \alpha - 1) \cdot x}{2Mz_T - x \sin 2\alpha - y \sin 2\beta} + \frac{\sin 2\alpha \cdot x^2 + \sin 2\beta \cdot xy}{2Mz_T - x \sin 2\alpha - y \sin 2\beta} \\ D_y(x, y) = D_y(Mx_Q, My_Q) = My'_P - My_Q = \\ \frac{2Mz_T(\cos \beta - 1) \cdot y}{2Mz_T - x \sin 2\alpha - y \sin 2\beta} + \frac{\sin 2\alpha \cdot xy + \sin 2\beta \cdot y^2}{2Mz_T - x \sin 2\alpha - y \sin 2\beta} \end{cases} \quad (13)$$

光刻投影物镜的物方远心度一般为毫弧度量级,存在 $z_T \gg x, z_T \gg y$,掩模面与物镜坐标系的夹角 α, β 均为极小量, α, β 的二阶量可以忽略,因此畸变表达式可以简化为:

$$\begin{cases} D_x(x, y) = D_x(Mx_Q, My_Q) = Mx'_P - Mx_Q = \\ \frac{\sin 2\alpha}{2Mz_T} \cdot x^2 + \frac{\sin 2\beta}{2Mz_T} \cdot xy \\ D_y(x, y) = D_y(Mx_Q, My_Q) = My'_P - My_Q = \\ \frac{\sin 2\alpha}{2Mz_T} \cdot xy + \frac{\sin 2\beta}{2Mz_T} \cdot y^2 \end{cases} \quad (14)$$

由畸变分析可知,当光刻投影物镜为物方理想远心时,存在 $z_T = \infty$,掩模面的倾斜安装误差不会引入畸变;当光刻投影物镜存在物方远心时,掩模面倾斜主要会产生两种二阶畸变,而当存在光阑像差时,即各个视场的远心度不同,会衍生更高阶畸变。引入勒让德多项式,畸变表达式为:

$$\begin{cases} D_x(x, y) = \frac{\sin 2\beta}{2M} \cdot \frac{x_0 y_0}{z_T} \cdot \frac{xy}{x_0 y_0} + \\ \frac{\sin 2\alpha}{3M} \cdot \frac{x_0^2}{z_T} \cdot \frac{1}{2} \left(3 \frac{x^2}{x_0^2} - 1 \right) + \frac{\sin 2\alpha}{6M} \cdot \frac{x_0^2}{z_T} \\ D_y(x, y) = \frac{\sin 2\alpha}{2M} \cdot \frac{x_0 y_0}{z_T} \cdot \frac{xy}{x_0 y_0} + \\ \frac{\sin 2\beta}{3M} \cdot \frac{y_0^2}{z_T} \cdot \frac{1}{2} \left(3 \frac{y^2}{y_0^2} - 1 \right) + \frac{\sin 2\beta}{6M} \cdot \frac{y_0^2}{z_T} \end{cases} \quad (15)$$

可以看出,通过勒让德多项式描述二阶畸变不仅能够体现其物理意义,也能够体现常数项对二阶畸变的补偿效果。

当掩模面安装存在 z 向平移时,根据赛德尔像差理论,光刻投影物镜会引入初级畸变。初级畸变随视场的三次方变化,将初级畸变进行 x 方向和 y 方向分解,其 x, y 方向分量具有畸变系数相同的特点,可以得到初级畸变为:

$$\begin{cases} d_x = d_{svx} (x^2 + y^2) \\ d_y = d_{svy} (x^2 + y^2) \end{cases}, \quad (16)$$

其中 d_{SV} 为初级畸变系数。初级 X 向畸变可以通过三阶 $X1Y2$ 畸变和三阶 X 畸变的线性组合表示, 初级 Y 向畸变可以通过三阶 $X2Y1$ 畸变和三阶 Y 畸变的线性组合表示, 即有:

$$\begin{cases} d_x = \frac{c_{x12}}{2} \left(3 \frac{x}{x_0} \cdot \frac{y^2}{y_0^2} - \frac{x}{x_0} \right) + \frac{c_{x30}}{2} \left(5 \frac{x^3}{x_0^3} - 3 \frac{x}{x_0} \right) = \\ d_s \cdot \frac{x}{x_0} \left(\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} \right) - \frac{14}{15} d_s \cdot \frac{x}{x_0} \\ d_y = \frac{c_{y21}}{2} \left(3 \frac{x^2}{x_0^2} \cdot \frac{y}{y_0} - \frac{y}{y_0} \right) + \frac{c_{y03}}{2} \left(5 \frac{y^3}{y_0^3} - 3 \frac{y}{y_0} \right) = \\ d_s \cdot \frac{y}{y_0} \left(\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} \right) - \frac{14}{15} d_s \cdot \frac{y}{y_0} \end{cases} \quad (17)$$

存在 $\frac{3c_{x12}}{2} = \frac{5c_{x30}}{2} = \frac{3c_{y21}}{2} = \frac{5c_{y03}}{2} = d_s$ 便使式(17)成立。该公式说明掩模面 z 向平移误差引起的初级畸变可以等效为勒让德多项式中的三阶畸变。勒让德多项式可以更灵活地表示三阶畸变, 这也说明三阶畸变可以通过倍率进行补偿。

以上畸变分析表明, 掩模面位置误差主要引入的畸变类型与勒让德多项式有很好的对应关系, 并可以使用勒让德多项式表示畸变。在光刻投影物镜的矩形视场内勒让德表示的畸变具有正交性, 并且包含赛德尔像差中的畸变描述。所以, 为了表征光刻投影物镜矩形视场内的畸变, 有效识别光刻投影物镜的畸变类型, 更好地分析和补偿畸变, 本文采用勒让德多项式表示光刻投影物镜畸变。

3 仿真与结果分析

3.1 光学系统及畸变要求

光刻投影物镜的初始结构来自于Embodiment 5 (Y.Omura, European Patent2000)。镜片数量为21^[15], 工作波长为193.368 nm, 光学系统使用一种光学材料熔石英, 折射率为1.560 119。数值孔径NA为0.75, 静态视场为26 mm×8 mm, 倍率为-0.25, 光学设计的畸变残差为0.3 nm。一般193 nm光刻机要求光刻投影物镜的静态畸变约为6~2 nm。

在分析和测试光刻投影物镜畸变时, 倍率偏差会被当成系统畸变进行分析和测试, 因此需要将倍率偏差从系统畸变中分离出来, 计入到倍率中。由于光学系统两个方向的倍率应该一致, 对称倍率(即倍率偏差)不计入系统畸变, 非对称畸变计入系统畸变。光学系统两个方向的像面旋转类似, 两个方向相同的旋转角度不计入系统畸变,

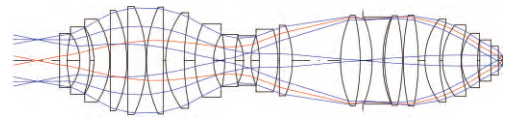


图1 光刻物镜结构示意图

Fig. 1 Layout of lithographic projection lens

非对称旋转计入系统畸变。这类畸变分析可以用一阶线性畸变进行描述:

$$\begin{cases} D_x = c_{x10} \frac{x}{x_0} + c_{x01} \frac{y}{y_0} = \\ \frac{c_{x10} + c_{y01}}{x_0 + y_0} \cdot x + \frac{c_{x10}y_0 - c_{y01}x_0}{x_0 + y_0} \cdot \frac{x}{x_0} + \\ \frac{c_{x01} - c_{y10}}{x_0 + y_0} \cdot y + \frac{c_{x01}x_0 + c_{y10}y_0}{x_0 + y_0} \cdot \frac{y}{y_0} \\ D_y = c_{y01} \frac{y}{y_0} + c_{y10} \frac{x}{x_0} = \\ \frac{c_{x10} + c_{y01}}{x_0 + y_0} \cdot y - \frac{c_{x10}y_0 - c_{y01}x_0}{x_0 + y_0} \cdot \frac{y}{y_0} + \\ \frac{c_{x01} - c_{y10}}{x_0 + y_0} \cdot x + \frac{c_{x01}x_0 + c_{y10}y_0}{x_0 + y_0} \cdot \frac{x}{x_0} \end{cases} \quad (18)$$

那么: 倍率偏差 $\Delta M = \frac{c_{x10} + c_{y01}}{x_0 + y_0}$, 非对称倍率畸变 $d_M = \frac{c_{x10}y_0 - c_{y01}x_0}{x_0 + y_0}$, 旋转角度 $\varphi = \frac{c_{x01} - c_{y10}}{x_0 + y_0}$, 非对称旋转畸变为 $d_\varphi = \frac{c_{x01}x_0 + c_{y10}y_0}{x_0 + y_0}$ 。

将畸变定义为非标定畸变和标定畸变。非标定畸变是指包含平移、旋转、倍率误差的畸变, 标定畸变是指除去平移、旋转、倍率误差的畸变。

3.2 畸变敏感度

对光刻投影物镜的掩模面进行扰动, 分别向 x, y, z 方向平移1 μm , 与 x, y 夹角为1 mrad, 绕 z 轴旋转1 mrad, 通过CodeV软件分析得到光刻投影物镜畸变, 对畸变进行勒让德多项式拟合, 获得勒让德多项式的敏感度系数。敏感度系数如表2和表3所示, 可以看出各扰动量引入的畸变成份和大小, 各变量引入的畸变类型与理论分析基本一致, 更高阶类型畸变的产生主要源于光阑像差。

3.3 公差分析及补偿

对光刻投影物镜的物面同时进行6个维度的随机扰动, x, y, z 方向的平移扰动量在 $[-1 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}]$ 内均匀分布, 绕 x, y, z 轴的旋转扰动量在 $[-0.1 \text{ mrad}, 0.1 \text{ mrad}]$ 内均匀分布, 样本数为500, 分析结果显示: 光刻投影物镜的畸变优于2 113.2 nm的概率为99.87%。利用勒让德多项式分析畸变, 在去除像面平移、旋转、倍率偏差后, 即光刻投影物镜标定后畸变优于10.0 nm的概率为99.87%。

表 2 掩模面安装误差的x方向畸变敏感度系数

Tab. 2 Distortion sensitivities in x direction of reticle alignment errors

c_{xmn}	α	β	φ	t_x	t_y	t_z
/nm	1 mrad	1 mrad	1 mrad	1 μm	1 μm	1 μm
m n						
0 0	0.00	-54.59	0.00	-250.00	0.00	0.00
0 1	0.00	0.00	-5250.00	0.00	0.00	0.00
0 2	0.00	7.07	0.00	0.00	0.00	0.00
0 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0 4	0.00	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
1 0	0.00	-6.50	6.50	0.00	0.00	-2.72
1 1	62.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.42
1 3	-5.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 0	0.00	-75.29	0.00	0.00	0.00	0.00
2 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 2	0.00	13.03	0.00	0.00	0.00	0.00
2 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 4	0.00	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
3 0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.55
3 1	-31.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
3 3	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 0	0.00	43.14	0.00	0.00	0.00	0.00
4 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 2	0.00	-1.54	0.00	0.00	0.00	0.00
4 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 4	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

掩模面x, y方向平移只产生像面平移, 掩模面绕z轴旋转引入像面旋转, 像面平移和旋转不计入畸变, 所以掩模面x, y向平移及绕z轴旋转没有约束, 需要结合光刻工艺等方面给出位置公差。

在光刻机实际工作过程中没有补偿掩膜面与x, y轴的夹角误差, 因此只能通过掩模面安装调节控制精度。这里考虑畸变对掩模面倾斜有较严格的公差要求。

表 3 掩模面安装误差的y方向畸变敏感度系数

Tab. 3 Distortion sensitivities in y direction of reticle alignment errors

c_{ymn}	α	β	φ	t_x	t_y	t_z
/nm	1 mrad	1 mrad	1 mrad	1 μm	1 μm	1 μm
m n						
0 0	11.38	0.00	0.00	0.00	-250.00	0.00
0 1	-2.63	0.00	2.63	0.00	0.00	-0.74
0 2	21.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.11
0 4	-1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 0	0.00	0.00	13000.00	0.00	0.00	0.00
1 1	0.00	-62.79	0.00	0.00	0.00	0.00
1 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 3	0.00	5.08	0.00	0.00	0.00	0.00
1 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 0	-7.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.08
2 2	-14.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
2 4	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3 0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3 1	0.00	31.32	0.00	0.00	0.00	0.00
3 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3 3	0.00	-0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
3 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 0	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
4 2	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 4	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

掩模面z方向平移引入的畸变可以通过镜头中间隔调节机构进行补偿, 并按照补偿能力放宽掩模面z方向的位置公差。

在500个样本中随机抽取1个样本, 光刻投影物镜的未标定畸变如图2所示, 光刻投影物镜的标定畸变如图3所示。利用勒让德多项式敏感度矩阵分析畸变, 通过间隔补偿机构补偿畸变。补偿后光刻投影物镜的畸变可达0.5 nm, 如图4所示。

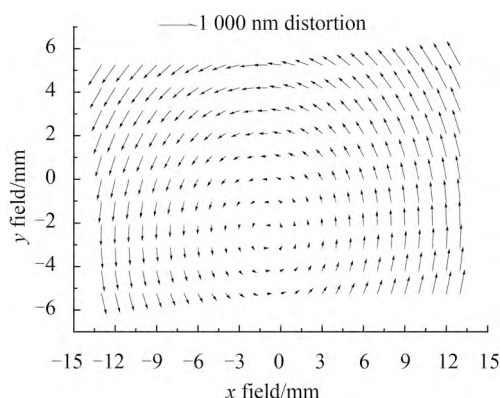


图2 光刻投影物镜的未标定畸变

Fig. 2 The uncalibrated distortion of lithographic projection lens

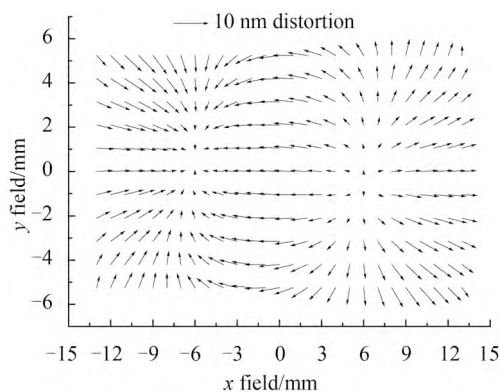


图3 光刻投影物镜的标定畸变

Fig. 3 Distortion calibration of lithographic projection lens

由图5可知, 掩模面位置误差引入的畸变可以控制在2 nm以内, 掩模面 z 方向的位置公差为 $\pm 2.0 \mu\text{m}$, 掩模面与 x 轴的倾斜公差为 $\pm 22.3 \mu\text{rad}$, 掩模面与 y 轴的倾斜公差为 $\pm 55.3 \mu\text{rad}$ 。

参考文献:

- [1] International technology roadmap for semiconductors 2013 edition lithography [EB/OL]. <http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/Litho2013.pdf>.
- [2] DE KLERK J. Performance of a high NA, dual stage 193 nm TWINS-CANTM step & scan system for 80 nm applications[J]. *SPIE*, 2003, 5040: 822-840.
- [3] THIBAUT S, PARENT J, ZHANG H, et al.. Developments in modern panoramic lenses: lens design, controlled distortion and characterization[J]. *SPIE*, 2011, 8197: 81970I.
- [4] 陈杨, 王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与

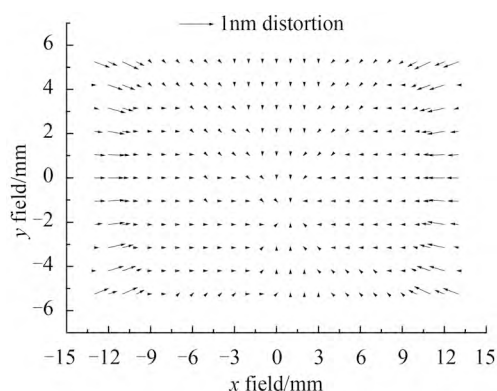


图4 补偿后光刻投影物镜的畸变分布

Fig. 4 Distortion distribution of lithographic projection lens after compensation

4 结论

本文提出利用勒让德多项式表示和分析掩模面引入的光刻投影物镜畸变, 并进行了畸变补偿方法的研究。通过推导光刻投影物镜掩模面安装误差引入的畸变, 以及光刻投影物镜实例分析, 可以看出勒让德多项式丰富了畸变类型, 能有效分析光刻投影物镜的畸变, 并更好地研究光刻投影物镜的畸变补偿方法。实验结果表明, 本文提出的畸变补偿方法将掩模面位置误差引入的畸变控制在2 nm以内, 掩模面的 z 方向的位置公差为 $\pm 2.0 \mu\text{m}$, 掩模面与 x 轴的倾斜公差为 $\pm 22.3 \mu\text{rad}$, 掩模面与 y 轴的倾斜公差为 $\pm 55.3 \mu\text{rad}$ 。

该方法不仅对光刻投影物镜的畸变分析和光刻投影物镜的畸变补偿研究具有指导意义, 还适用于分析光刻投影物镜其他类型误差引入的畸变。

设计[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222003.

CHEN Y, WANG Y M. Design and distortion characteristics analysis of the large-image-field off-axis three-mirror telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0222003. (in Chinese)

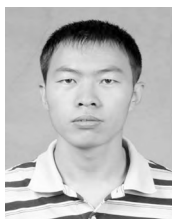
[5] 巩盾, 王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.

GONG D, WANG H. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0722001. (in Chinese)

[6] 周子卿, 赵鹏, 李勃, 等. 基于共线向量的非量测镜头

- 畸变校正[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015001.
- ZHOU Z Q, ZHAO P, LI B, *et al.*. Nonmetric lens distortion calibration based on collinear vectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1015001. (in Chinese)
- [7] 徐嵩, 徐秀霞, 刘树光, 等. 摄像机畸变标定的模型参考逼近方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 0715001.
- XU S, SUN X X, LIU S G, *et al.*. Model reference approaching method of camera distortion calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 0715001. (in Chinese)
- [8] BASS M. *Handbook of Optic* (Vol. 1) [M]. McGraw-Hill, Inc, 1995: 80-100.
- [9] 张蔚, 李恩普, 陈建明. 大视场光学系统畸变曲线拟合[J]. 电光与控制, 2004, 11(4): 57-62.
- ZHANG W, LI E P, CHEN J M. Curved-fitting methods for distortion correction of large-FOV optical system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(4): 57-62. (in Chinese)
- [10] BRAAT J, RENNSPIES P. Effect of lens distortion in optical step-and-scan lithography[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(4): 690-700.
- [11] RICOLFE-VIALA C, SANCHEZ-SALMERON A-J. Lens distortion models evaluation[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(30): 5914-5928.
- [12] TURNER K T, VEERARAGHAVAN S, SINHA J K. Predicting distortions and overlay errors due to wafer deformation during chucking on lithography scanners[J]. *Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2009, 8(4): 043015.
- [13] SHANNON R R. *The Art and Science of Optical Design*[M]. Cambridge University Press, 1997: 24-58.
- [14] STEGUN A, M. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*[M]. New York: Dover, 1972: 771-802.
- [15] OMURA Y. Projection exposure method and apparatus and projection optical system: European Patent 1139138[P]. 2001.

作者简介:



杨 旺 (1984-), 男, 黑龙江绥化人, 博士研究生, 助理研究员, 2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事紫外光学系统设计方面的研究。
E-mail: yangwang@ciomp.ac.cn

导师简介:



黄 玮 (1965-), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2007年于中国科学院长春光机所获得博士学位, 主要从事光学设计方面的研究。
E-mail: huangw@ciomp.ac.cn