

光刻机光瞳整形衍射光学元件远场多参数检测方法

胡中华^{1,2} 朱菁¹ 杨宝喜^{1,2} 彭雪峰¹ 曾爱军^{1,2} 黄惠杰^{1,2}

(¹ 中科院上海光学与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 光刻机光瞳整形普遍采用衍射光学元件(DOE)来产生各种照明模式。针对其光学特性的检测需求,提出了一种光刻机光瞳整形 DOE 远场多参数检测方法。该方法通过对远场光强分布进行转换,可同时获得 DOE 远场衍射图样的极平衡性、极张角、极方位角、半孔径角和径向光强分布等多种光学特性参数。实验中,对国外加工的产生四极照明模式的 DOE 进行了远场多参数检测与分析,结果表明该方法可以满足光刻机光瞳整形 DOE 的检测要求。

关键词 测量; 光学检测; 衍射光学元件; 多参数检测; 经纬坐标变换

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0908001

Far-Field Multi-Parameter Measurement of Diffractive Optical Element for Pupil Shaping in Lithography System

Hu Zhonghua^{1,2} Zhu Jing¹ Yang Baoxi^{1,2} Pen Xuefeng¹
Zeng Aijun^{1,2} Huang Huijie^{1,2}

¹ *Laboratory of Information Optics and Optoelectronic 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 Diffractive optical element (DOE) is widely used to generate various illumination modes for pupil shaping in the lithography system. A far-field multi-parameter measuring method for the DOE is proposed according to its testing requirements of optical performance. The multi-parameters of optical performance, such as the pole balance, the pole opening angle, the pole azimuth angle, the semi-aperture angle, and the radial intensity distribution are obtained simultaneously by converting the far-field intensity distribution. The multi-parameter measurement and analysis of DOE made abroad are done experimentally. And the experimental results indicate that this measuring method can be applied to the testing of DOE for pupil shaping in the lithography system.

Key words measurement; optical testing; diffractive optical element; multi-parameter measurement; latitude-longitude coordinate transform

OCIS codes 050.1970; 110.2960; 110.2970; 350.4600

1 引 言

在光刻过程中,需要针对不同的掩模结构采用不同的照明模式,即通过光瞳整形产生环形照明、二极照明、四极照明等照明模式,以增强光刻分辨力、改善焦深、提高成像对比度,从而得到更好的光刻性能^[1-3]。常用的照明模式有传统照明模式、环形照明模式、二极照明模式和四极照明模式等。在投影光刻机中,普遍采用衍射光学元件(DOE)来实现各

种照明模式,主要得益于 DOE 能够在保持较高衍射效率的基础上产生特定光强分布的照明模式^[4-5]。随着掩模板图形的日益复杂化和光刻特征尺寸的不断减小,光刻机对光瞳整形 DOE 实际的光学性能提出了更高的要求。DOE 远场衍射图样的极平衡性、极张角、极方位角、半孔径角、径向能量分布等多种参数都会影响光刻机最终的光刻性能。因此 DOE 在加工完成之后,对反映其实际光学特

收稿日期: 2013-03-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-22

基金项目: 国家国际科技合作项目(2011DFR10010)、国家科技重大专项课题(2011ZX02402)

作者简介: 胡中华(1984—),男,博士研究生,主要从事高数值孔径光学光刻技术方面的研究。

E-mail: huzhonghua@siom.ac.cn

导师简介: 黄惠杰(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事光散射测量技术、光学生物传感技术、光学检测技术和光学光刻技术等方面的研究。E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人)

性的多种参数进行检测是非常必要的。

由于测试条件的限制及深紫外测量的复杂性,国内对投影光刻机中 DOE 光学性能的检测及分析尚无报道。国外 Childers 等^[6-7]提供了一些针对投影光刻机中 DOE 远场图样的检测方案,通过一个傅里叶透镜得到衍射图样,利用边缘检测等图像处理方法对反映其光学特性的多种参数进行分析计算,该方法容易计算极方位角、极张角、半孔径角,但是不容易分析极平衡性和径向光强分布的均匀性。本文提出了一种光刻机光瞳整形 DOE 多参数检测方法,通过光强转换可以同时获得极平衡性、极张角、极方位角、半孔径角和径向光强分布等光学特性参数。

2 原 理

2.1 DOE 检测参数定义

在深紫外投影光刻机照明系统中,光瞳整形技术和光束均匀化技术是两种核心光学技术。光瞳整形技术用来实现各种具有较高光瞳均匀性的各种照明模式,光束均匀化技术用来进一步提高均匀性以满足掩模面均匀照明的要求。由于投影光刻机照明系统照明均匀性极高,因此在光瞳整形时应尽可能地提高光瞳均匀性。光刻机中几种常用照明模式如图 1 所示,(a)~(d)分别是常用的传统照明模式、环形照明模式、二极照明模式和四极照明模式。不同照明模式的采用是为了适应掩模板图形日益复杂化、集成电路线宽不断减小的要求。

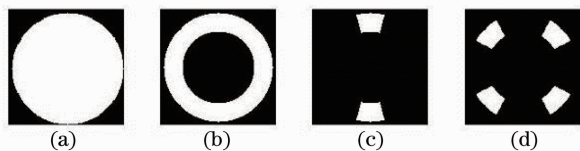


图 1 照明模式示意图。(a) 传统照明;(b) 环形照明;
(c) 二极照明;(d) 四极照明

Fig.1 Illustration of illumination modes. (a) Circular;
(b) annular; (c) dipole; (d) quadrupole

在以上几种常用的照明模式中,由于四极照明模式最复杂,涉及的检测参数最多,而其他三种照明模式的检测参数只是四极照明模式检测参数的一部分,不妨以四极照明模式为例来阐述多参数检测方法。在进行四极照明模式的多参数分析之前,首先对四极照明模式的几何参数进行定义。如图 2 所示,在 x - y 坐标系下, σ_o 为外环半径, σ_i 为内环半径, σ_o 与 σ_i 分别与 DOE 的外半孔径角 α_o 和内半孔径角 α_i 相对应。 φ 为极张角, ϵ 为极方位角。

主要检测极平衡性(PB, A_{PB})、极张角 φ 、极方位

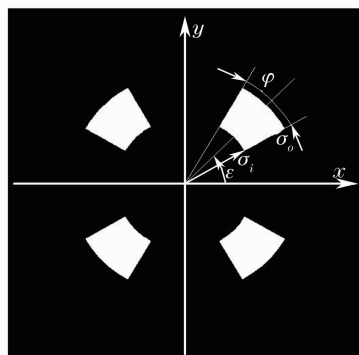


图 2 四极照明模式参数定义

Fig.2 Definition of the quadrupole illumination mode 角 ϵ , 半孔径角 α_o 和 α_i , 以及径向光强分布的均匀性等光学特性参数。极平衡性 A_{PB} 定义为

$$A_{PB} = \left[1 - \frac{(E_1 + E_3) - (E_2 + E_4)}{(E_1 + E_3) + (E_2 + E_4)} \right] \times 100\%, \quad (1)$$

式中 E_1, E_2, E_3, E_4 分别是第一象限到第四象限每一个极的能量。极张角 φ 是某一极中扇形圆弧对应的圆心角,即扇形圆弧两端的半径与正 x 轴的夹角之差。极方位角 ϵ 是某一极中扇形圆弧两端的半径与正 x 轴夹角的平均值。极平衡性、极张角、极方位角等特性参数反映了照明模式光强分布的对称性。半孔径角 α_o 和 α_i 由外环半径 σ_o 、内环半径 σ_i 和观察屏到 DOE 的距离 z 共同决定,其大小为

$$\alpha_o = \arcsin(\sigma_o/z), \quad (2)$$

$$\alpha_i = \arcsin(\sigma_i/z). \quad (3)$$

径向光强分布是远场光强分布沿着半径方向的一维平均光强分布,其均匀性可以用一维平均光强分布顶部区域 (I_{top}) 的均方根误差 (RMS, X_{RMS}) 来表示,具体定义为

$$X_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [I_{top}(i) - \text{mean}(I_{top})]^2} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 $\text{mean}(\cdot)$ 表示平均值。 N 为一维平均光强分布顶部区域的点数, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

2.2 DOE 多参数检测原理

由于 DOE 是产生远场衍射图样,在检测时需要采用一个傅里叶透镜将远场图样变换到近场以便 CCD 采集。DOE 的多参数检测原理如图 3 所示,沿着光路前进的方向依次为激光器、衰减片 A、扩束镜(BE)、光阑、待测 DOE、傅里叶透镜、CCD 相机和计算机。激光器产生的激光经过衰减片进行能量衰减,由扩束镜进行扩束、准直,光阑调整入射到 DOE 上的光斑大小,待测 DOE 和 CCD 光敏面分别放置

在傅里叶透镜的前、后焦面上,当激光入射到 DOE 表面后则在 CCD 上产生衍射图样。利用计算机对 CCD 获取的图像进行图像处理和数据分析就能得到极平衡性、极张角、极方位角、半孔径角和径向光强分布等多种光学特性参数。

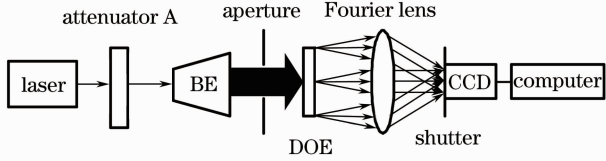


图 3 DOE 检测原理图

Fig. 3 Schematic of DOE test principle

在多种参数计算过程中,将直角坐标系 $x-y$ 下的光强分布 $I(x, y)$ 转化成经纬坐标系 $\alpha\theta$ 下的光强分布 $I(\alpha, \theta)$,直角坐标 (x, y) 与经纬坐标 (α, θ) 的对应关系为

$$x = f \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

$$y = f \cdot \sin \alpha \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

式中 f 是傅里叶透镜到 DOE 的距离或傅里叶透镜

到远场观察平面的距离, α 为半孔径角, θ 为方位角。图像处理和数据分析的原理如图 4 所示,图 4(a)是 CCD 检测得到的直角坐标系 $x-y$ 下四极衍射图样的远场光强分布 $I(x, y)$,将 $I(x, y)$ 转换成经纬坐标系 $\alpha\theta$ 下远场光强分布 $I(\alpha, \theta)$ 就得到图 4(b),其中横坐标半孔径角 α 的有效取值范围为 $\arcsin(\sigma_o/f) - \arcsin(\sigma_o/f)$,纵坐标方位角 θ 的取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。图 4(b)可以方便地计算出每一个极的能量,根据极平衡性的定义可快速计算出极平衡性。在图 4(b)中,沿着 θ 方向取平均就能得到角向光强分布图,如图 4(c)所示,沿着 α 方向取平均就能得到径向光强分布图,如图 4(d)所示。在图 4(c)中,采用线性插值的方法可以求出相对强度值为 0.5 时相应的 θ 角,这样就可以求出极张角和极方位角,极张角 φ 为某一极光斑相邻 2 个 θ 角的差值,极方位角 ε 为某一极光斑相邻 2 个 θ 角的平均值。在图 4(d)中,同理采用线性插值的方法可以求出相对强度值为 0.5 时相应的半孔径角 α_o 和 α_i ,并计算顶部区域光强分布的均方根误差。

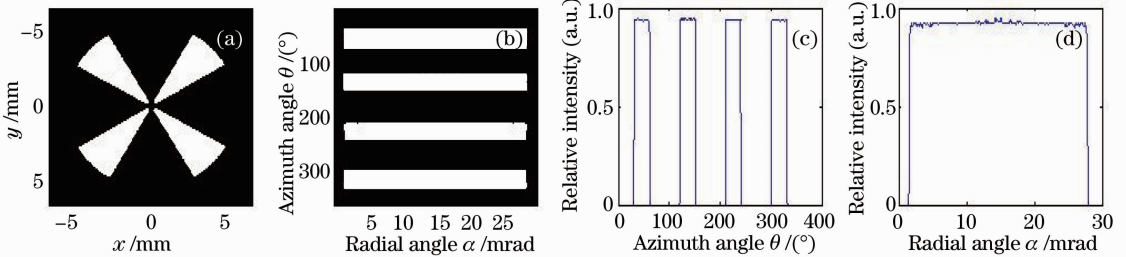


图 4 多参数分析原理图。(a) 直角坐标下的光强分布 $I(x, y)$; (b) 经纬坐标下的光强分布 $I(\alpha, \theta)$; (c) 角向光强分布; (d) 径向光强分布

Fig. 4 Diagram of multi-parameter analysis. (a) Intensity distribution of cartesian $I(x, y)$;

(b) intensity distribution of latitude-longitude $I(\alpha, \theta)$; (c) azimuth intensity distribution; (d) radial intensity distribution

3 实 验

实验中,光源为准分子激光器,其工作波长为 193 nm,与 DOE 的设计波长相同。由于紫外光在普通玻璃透射率极低,因此检测装置中所有光学元件的材料均采用康宁 HPFS[®] ArF Grade 融石英,在 193 nm 处其透射率大于 99.5%/cm。准分子激光首先经过衰减和扩束之后入射到待测 DOE 上,在傅里叶透镜的后焦面上得到衍射图样。光阑使得入射到 DOE 上的光斑尺寸比 DOE 的物理尺寸稍小,尽可能地减少由于额外光线被聚焦到 CCD 上而形成的噪声。傅里叶透镜用来变换远场衍射图样,焦距为 201.1 mm。CCD 的型号为美国 Princeton Instruments 公司的 PIXIS 1024BUV,其光敏面大

小为 13.3 mm × 13.3 mm,像素数为 1024 pixel × 1024 pixel,像素大小为 13 μm × 13 μm。由于准分子激光器单脉冲能量大,最大单脉冲能量达到 5 mJ,因此需要用快门来控制曝光时间,与能量衰减单元一起防止 CCD 饱和。在检测过程中为了让 CCD 采集到一幅对比度较好的衍射图样,需要较多地衰减入射光能量,曝光时间控制在 5 μs 以下。采集到衍射图样之后,就可以通过图像处理和数据分析得到极平衡性、极张角、极方位角、半孔径角和径向光强分布等特性参数。

待测 DOE 产生的是四极照明模式,国外加工,大小为 25 mm × 25 mm。其设计参数为:外环半径 σ_o 对应的半孔径角为 27.5 mrad,内环半径 σ_i 对应

的半孔径角为 1.5 mrad, 即 α 的取值范围为 1.5~27.5 mrad。 θ 的取值范围为 $0^\circ\sim 360^\circ$, 极张角 $\varphi = 30^\circ\pm 1^\circ$, 极方位角 $\epsilon = 45^\circ\pm 1^\circ$ 。

CCD 采集得到的四极衍射图样如图 5 所示, 该图像具有好的对比度, 但是图像中心有一个明显的零级亮斑, 这是由 DOE 加工过程中的刻蚀误差引起的。在实际的光刻机照明系统中通常是采用一个光阑将 DOE 产生的中心零级亮斑遮挡, 以免影响掩模面的照明均匀性。因此在进行图像分析时, 可以去除图像中心的零级亮斑而不影响多参数检测结果。

首先去除图 5 中的中心亮斑, 并对直角坐标系下的远场光强分布进行转换就得到图 6 中极坐标系下的远场光强分布, 然后分析计算各种特性参数。从图 6 可以看出, 每一个长条状“光斑”都代表某一极的光强分布。首先求出每一极的总光强, 然后根据(1)式极平衡性的定义求得 $A_{PB} = 99.2\%$, 接近设计值 99.7%。

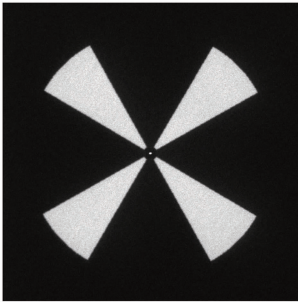


图 5 实际检测到的一种四极衍射图样
Fig. 5 Actual test pattern of quadrupole diffractive pattern

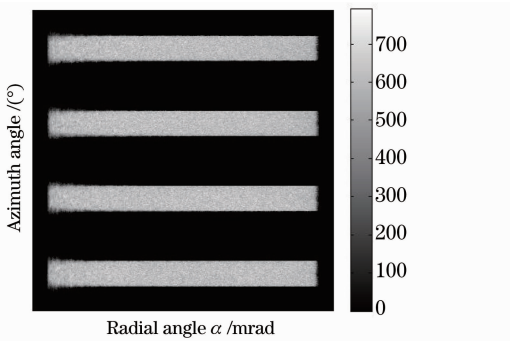


图 6 经纬坐标下远场光强分布
Fig. 6 Far-field intensity distribution in latitude-longitude coordinates

图 7 是角向光强分布图, 描述了方位角 θ 与平均相对光强的关系, 根据图 7 可以计算极张角和极方位角。以相对强度值为 0.5 画一条直线, 采用线性插值算法得到 4 个象限中 8 个方位角值分别为 29.6° 、 60.0° 、 120.9° 、 150.5° 、 210.6° 、 240.2° 、

300.2° 、 330.7° 。取每个象限的 2 个角度差值可以得到 4 个极张角分别为 30.4° 、 29.6° 、 29.6° 、 30.5° 。与设计值相比, 极张角误差为 $\pm 0.5^\circ$ 。取每个象限的 2 个角度的平均值可以得到 4 个极方位角分别为 44.8° 、 135.7° 、 225.4° 、 315.5° 。与设计值相比, 极方位角误差为 $\pm 0.7^\circ$ 。

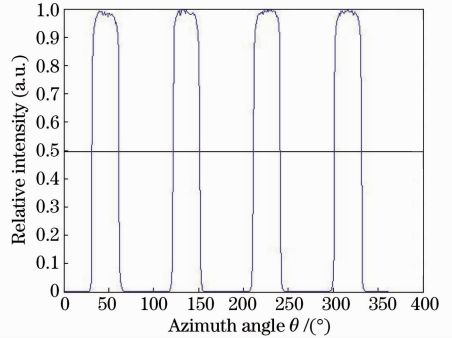


图 7 一维角向光强分布
Fig. 7 One-dimensional intensity distribution along the azimuth angle θ

图 8 是径向光强分布图, 描述了半孔径角 α (对应半径方向) 与平均相对光强的关系, 由此可以得到半孔径角 α , 并计算径向相对光强分布的均匀性。以相对强度值为 0.5 画一条直线, 采用线性插值算法得到半孔径角 α_0 和 α_i 分别为 1.5 mrad 和 27.6 mrad, 与设计值相差 0.1 mrad。计算得到顶部区域(相对强度大于 0.9)相对光强分布的均方根误差为 1.68%。

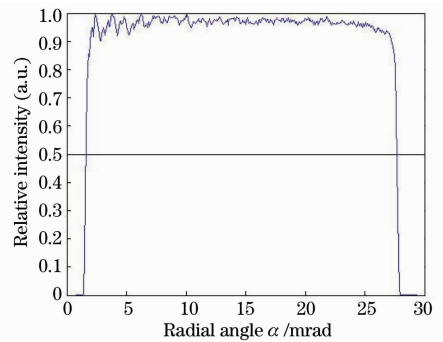


图 8 一维径向光强分布
Fig. 8 One-dimensional intensity distribution along the radial angle α

由于没有标准的 DOE 检测装置来做对比分析, 论文中的检测结果只与设计值进行对比分析。在光刻机中, 光瞳整形 DOE 允许极张角、极方位角公差为 $\pm 1^\circ$, 极平衡性小于 1.5%, 径向光强分布顶部均匀性小于 2.5%。尽管检测值与设计值存在一定的偏差, 但是该 DOE 还是满足使用要求的。

4 结 论

提出了一种光刻机光瞳整形衍射光学元件的远场多参数检测方法,该方法通过光强分布的经纬坐标系转换获得衍射图样的极平衡性、极张角、极方位角、半孔径角和径向光强分布均匀性等多种光学特性参数。实验中,利用该方法对一种产生四极照明模式的 DOE 衍射图样进行了检测,图像处理与数据分析后得到多种光学特性参数。由于目前测量条件的限制和紫外测量的复杂性,该 DOE 测量值与设计值存在一定的误差,但仍然满足光刻机光瞳整形的要求。

参 考 文 献

- 1 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *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.
- 2 Wang Jun, Jin Chunshui, Wang Liping, *et al.*. Study on the off-axis illumination for extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1211003.
王君, 金春水, 王丽萍, 等. 极紫外光刻离轴照明技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1211003.
- 3 Xing Shasha, Wu Rengmao, Li Haifeng, *et al.*. Freeform-surface design of off-axis illumination in projection lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0322002.
邢莎莎, 吴仍茂, 李海峰, 等. 应用于投影光刻离轴照明的自由曲面设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0322002.
- 4 Zhang Wei, Gong Yan. Vector analysis of diffractive optical elements for off-axis illumination of projection lithographic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1005002.
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件的矢量分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1005002.
- 5 Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2081—2086.
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2081—2086.
- 6 John E Childers, Tom Baker, Marc D Himel, *et al.*. Advanced testing requirements of diffractive optical elements for off-axis illumination in photolithography [C]. *SPIE*, 2009, 7430: 74300S.
- 7 Marc D Himel, Robert E Hutchins, Jamey C Colvin. Design and fabrication of customized illumination patterns for low-kl lithography: a diffractive approach [C]. *SPIE*, 2001, 4346: 1436—1442.

栏目编辑:何卓铭