

光刻物镜光瞳极平衡性标定方法

芮大为 史振广 袁文全 张巍

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 极平衡作为光刻物镜的一项重要指标,受到多种误差因素综合调制,因此有必要准确区分各种误差源的独立贡献量。提出了一种标定方法,将远心度误差所引入的调制效果进行了解耦,对极平衡指标进行了标定,并与质心标定方法进行对比研究。实现途径是以 Matlab 程序作为载体,调用 Code V 进行远心度运算,对 LightTools 的光瞳强度仿真结果进行重新定位,从而获取远心分离后的极平衡性指标。此外,设计了一个光刻物镜方案作为研究对象,对标定程序进行了仿真验证。结果表明,该标定方法可有效分离远心误差对极平衡的调制作用,程序执行效率较高。

关键词 光学设计; 光刻物镜; 光瞳极平衡; 远心度

中图分类号 O432.1; TN305.7; TB851+.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0916002

Pupil Non-Balance Calibration for Lithographic Lens

Rui Dawei Shi Zhenguang Yuan Wenquan Zhang Wei

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract As one of the critical target of lithographic lens, pupil non-balance is modulated by many factors. It is necessary to distinguish the respective contribution of those factors. In this paper, a method is introduced to calibrate pupil balance by removing telecentricity, and a comparison is made with another approach based on finding centroid. A user defined program, which is written in Matlab with the function of manipulating Code V and LightTools data, is consequently made up to implement the above technique and calculate the real position of pupil intensity in angular plane without telecentricity. Beside, a series of simulation on an optimally designed lithographic lens under off-axis illumination is given to show the verification. It is revealed that this method is functional in calibrating pupil non-balance with a high level of implement efficiency.

Key words optical design; lithographic lens; pupil non-balance; telecentricity

OCIS codes 220.3620; 220.4840; 110.3960

1 引言

对于深紫外光刻物镜,光瞳的极平衡性指标用于评价光源的傅里叶频谱面在各照明模式下曝光强度的对称性与均匀性,其影响因素主要包括:1)材料及膜层的透射率均匀性;2)光学元件装调失配^[1];3)照明系统与物镜匹配过程中的远心误差等。它们对光瞳极平衡性的调制效果也不尽相同:其中因素 1)主要影响各视场点光瞳强度的对比度差异,尤以对轴外视场点的影响最为显著,但对角空间光瞳的旋转对称

性分布不产生任何影响;而因素 2)中的装调失配(尤其是倾斜与偏心失配)将对旋转对称性产生重要影响,表现为光瞳形状的整体偏移;对于因素 3),在照明系统与物镜系统集成过程中,由于照明系统在掩模面的远心度与物镜的物方远心度设计值存在差异,匹配后所引入的像方远心误差将重新定义成像光锥的指向,这将产生与因素 2)相类似的光瞳形状的整体偏移。曝光系统的远心匹配误差与极平衡分别为两个相对独立的评价准则,但业内并无明确界定^[2-5]。极

收稿日期: 2014-06-09; **收到修改稿日期**: 2014-06-27

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 芮大为(1983—),男,硕士,研究实习员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: davyray@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

平衡性指标主要评价由因素 1) 与因素 2) 对光瞳分布的贡献, 而事实上, 远心匹配误差将对所有视场 (FOV) 点的光瞳极平衡性进行二次调制, 使之在原有分布的基础上产生一个附加的光瞳偏心。这样, 因素 2) 与因素 3) 对极平衡性的贡献将耦合在一起而无法分辨, 系统的远心度指标也难以从极平衡性的测量结果中直接反演出来。

光刻物镜的物方远心设计值要与照明系统的远心相匹配才能有效约束整个曝光系统的远心度。物镜名义上为双远心系统, 其物、像方均应具备理想远心^[6], 但受制于物镜设计水平以及照明系统在掩模面的远心输入, 在照明系统与投影物镜的光路匹配过程中将在像方(硅片)引入远心偏差, 通常为毫弧度量级。该远心偏差不仅对成像对比度产生影响, 而且引起光瞳强度质心的偏移, 在系统测试环节将与光瞳强度测量结果发生耦合, 继而干扰光瞳极平衡性指标正确测量。因此, 有必要将被远心所调制的这部分光瞳分布进行解耦, 通过数值处理方法从已耦合的仿真或测量数据中分离远心度和极平衡性指标。

本文在仿真层面, 对光瞳指标的远心偏差予以解耦和标定。针对数值孔径(NA)0.75 物镜设计方案的光瞳仿真结果, 通过 Matlab 外部程序调用光学设计软件 Code V 对光瞳数据进行解耦运算。分别采用远心标定和质心标定两种方法对极平衡指标进行修正与评价, 并对结果进行分析比较。

2 光瞳指标与远心度之间的耦合与解耦

2.1 光瞳极平衡性评价准则

离轴照明模式用于分辨率增强技术^[7], 光瞳极平衡性即是对物镜照明模式特别是离轴照明模式的辐射强度对称性的一个强力约束。合格的投影光刻系统, 其全视场所有视场点均须具备良好的光强一致性, 以保障刻线的对比度及分辨率^[8]。图 1 为光瞳角空间的一种划分方法, 表征硅片上任一视场点辐照度分布, 坐标轴 H 和 V 将角平面划分为四个象限。其中象限 1、4 合为 $H+$ 区域, 2、3 象限合为 $H-$ 区域, 1、2 合为 $V+$ 区域, 3、4 合为 $V-$ 区域。相应的, 可将极平衡划分为 H 方向、 V 方向和四象限 (Quad) 共三个指标, 分别表征光瞳面正负场间及象限间的光强偏差。可定义极平衡性的一种评价方法

$$V_{\text{Non-Blance}} = \max \left[\left| \int_{(i)} I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{(i)} I \right| \right] / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{(i)} I, \quad (1)$$

式中 $\int_{(i)} I$ 是角平面中第 i 个区域的光强积分, i 可根据角平面划分方法对号入座, 例如, 对于 H 方向极平衡性划分为 $H+$ 、 $H-$; 对于 V 方向极平衡性划分为 $V+$ 、 $V-$; 对于 Quad 极平衡性划分为 1、2、3、4。一般, 极平衡性需低于 4%, 对于高 NA 物镜则要求更为严格。

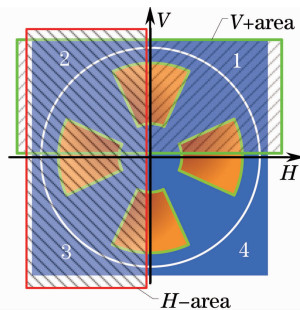


图 1 极平衡性光瞳面划分示意图

Fig. 1 Pupil plane division of nonbalance

2.2 远心调制与解耦

对于曝光系统的远心度, 可从能量质心或成像主光线的层面给出不同的定义, 且不同定义下所对应的远心度在数值上存在一定差异。严格来讲, 以能量质心定义的远心度应更为准确, 但由于研究对象为远心度耦合前后的光强分布的相对变化, 因此以何种方式定义远心度并不影响光瞳指标的解耦与标定。因此, 以视场点成像主光线与系统光轴的夹角定义为该视场点的远心度。

携带照明系统远心度的入射光光束将在掩模面重新定义物镜的物主光线方向, 继而经物镜传递, 重新定义曝光系的像方远心度。图 2 为光学系统子午面内远心度传递示意图, 其中物、像方光锥中心实线分别代表物、像方主光线方向; 虚线代表平行于光轴的理想远心方向。在数值孔径约束下的成像光锥, 将以像点 F'_i 为转动中心产生一个微小的偏转角度 θ'_i , 于是, F'_i 视场点的光强探测方向与实际能量传输方向 (光锥主光线方向) 就发生了偏离, 表现为光瞳偏心。光强的探测方向受到远心度匹配方向的调制, 其角度偏差即为光锥转轴与系统光轴的夹角 θ'_i , 即子午面的像方远心度。

三维情况下, 如图 3 所示, 硅片面上, cone 1' 为理想远心光锥, 其对称轴指向为光强探测方向; cone 2' 为受到远心度调制的实际成像光锥, 其对称轴指向为实际的光强投影方向。两转轴之间的夹角为 θ'_i , 可进一步分解为水平方向的角度变化 ΔH 和垂直方向的角度变化 ΔV 。利用该角度关系对硅片

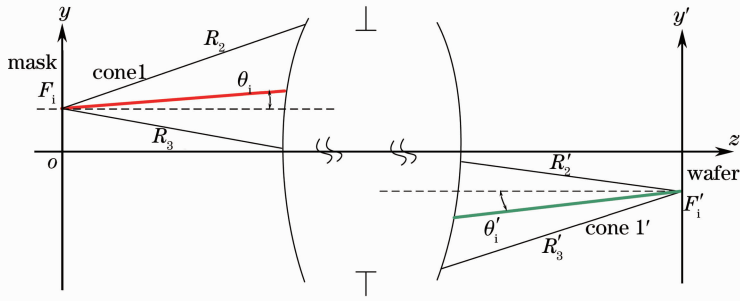


图2 物镜子午面的远心传递

Fig. 2 Telecentricity propagation within lithographic lens in tangential plane

与弧矢方向的远心度分量。已知掩模面共轭视场点坐标 (x', y', z') 及其主光线的方向余弦 (L', M', N') ，则有

$$(\tan \Delta H, \tan \Delta V) = f(L', M', N', x', y', z'), \quad (2)$$

式中 f 是由物镜光学结构与材料折射率所定义的传递方程。 ΔH 和 ΔV 可通过外部自定义程序调用 Code V 执行宏语言命令而求解得到。

对于光强质心 (H_0, V_0) 的标定,可直接从非序列光线追迹的原始结果出发,对数据矩阵进行行列积分:通过列向积分获取横向质心坐标 H_0 ,通过行向积分获取纵向质心坐标 V_0 。

2.3 光瞳极平衡性解耦的程序实现

由照明仿真软件 LightTools 的非序列光线追迹获得光瞳数据矩阵,该矩阵表达的是远心调制后的光瞳信息,需通过自编程序对数据进行解耦,剔除远心误差,再计算获取真正的光瞳极平衡性。采用 Matlab 建立外部循环^[10-11],以“Command”接口建立与 Code V 之间的联系并对其进行调用。该外部程序具有较高的执行效率,其核心价值体现在角分辨率的增强功能上,通过三阶插值的方式充分提高原始光瞳强度矩阵的角分辨率,从而获得期望的计算精度。程序流程图如图4所示。

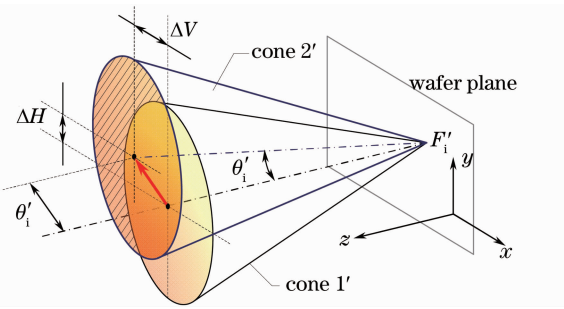


图3 角平面光强偏心示意图

Fig. 3 Intensity decentered projection in $H-V$ plane

面光强数据重新进行取向修正,可剔除远心度的影响,解调得到光瞳数据。

一种极端情况,cone 2' 对应最大孔径角时,光锥边缘将由于孔径光阑的遮挡而受到裁剪,真正参与成像的光束为 cone 1' 和 cone 2' 的交集部分^[9]。事实上,光锥的倾斜不足以产生可观的光瞳裁剪,而且携带照明信息的光瞳填充比受到部分相干因子的调制,不会充满孔径光阑。

可通过两种技术路线获得 ΔH 和 ΔV 。第一种,通过计算像方远心度继而分解为子午方向和弧矢方向的远心分量;第二种:通过辐射强度的质心位置标定直接获取。

光学设计软件CodeV的内建算法可获得子午

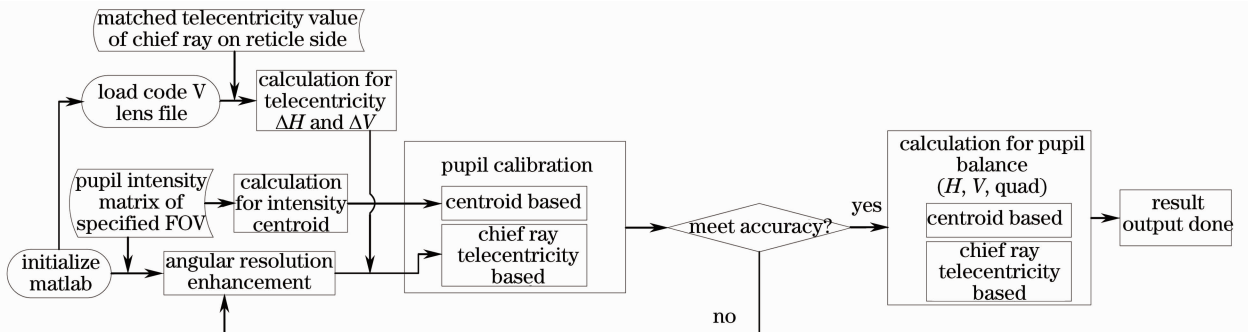


图4 远心解耦流程图

Fig. 4 Flow chart of telecentricity procedure

1) 调用 Code V 计算子午和弧矢方向的像方远心度 ΔH 和 ΔV 。

2) 载入预存的 LightTools 光瞳强度矩阵, 该矩阵表征特定视场点在离轴照明模式下的光瞳分布。通过正交方向的积分获取光强质心坐标 (H_0, V_0) 。

3) 采用三阶插值算法对光瞳矩阵进行角分辨率增强。

4) 将光强网格分别按照远心和质心的标定方法进行数据平移, 分别得到基于质心解耦和远心解耦后的光瞳矩阵, 并对中间结果进行精度判断, 满足精度需求则继续执行; 否则将返回并进一步增强角分辨率。

5) 满足精度判据后, 分别计算基于质心解耦和远心解耦的光瞳极平衡性指标并输出, 程序完毕。

3 仿真实例

以一套 NA0.75 投影光刻物镜的优化设计方案为实例, 分析远心误差对光瞳指标的扰动并予以解耦, 继而验证程序功能。物镜方案如图 5 所示, 像方数值孔径为 0.75, 工作波长为 193.4 nm, 成像倍率 -0.25。像质报表如图 6 所示, 初始像质为全场最大波像差均方根(RMS)为 0.9 nm, 最大质心矫正畸变为 0.7 nm。物方、像方远心度在矩形视场对角线方向的分布曲线如图 7 所示, 其中实线为像方远心度, 虚线代表物方远心度。易见, 在物方远心 1.8 mrad 的输入条件下, 像方远心可约束在 0.3 mrad 以内。

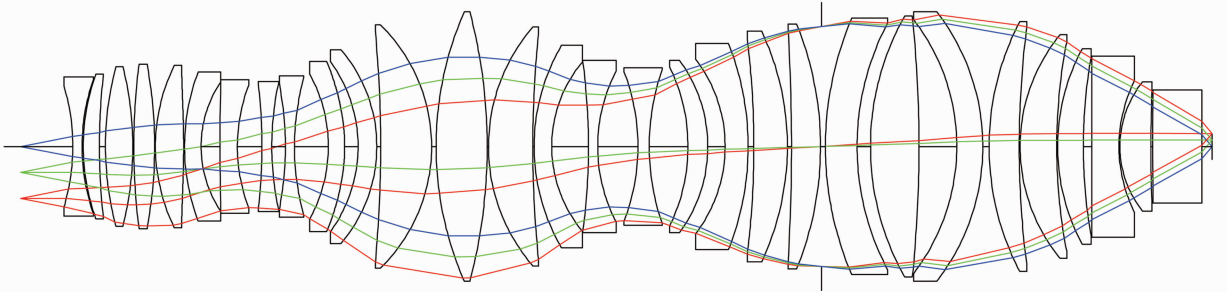


图 5 物镜设计方案

Fig. 5 Designed of lens scheme

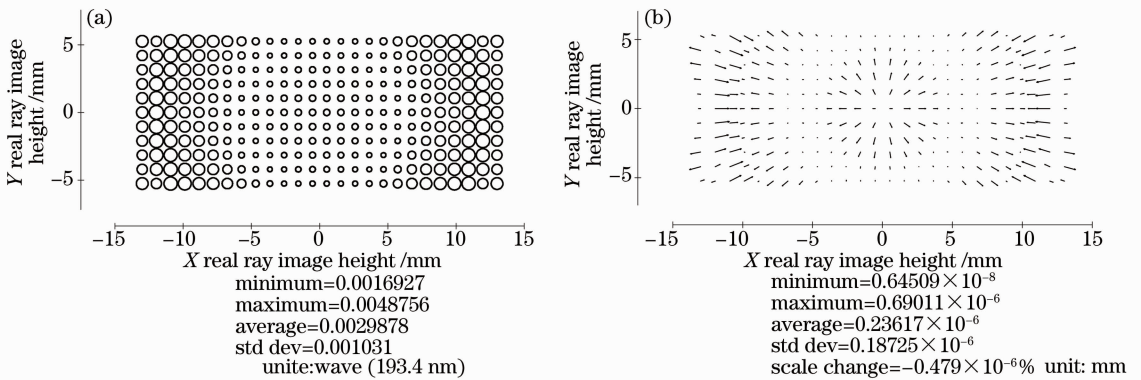


图 6 像质设计结果。(a) 波像差 RMS; (b) 质心畸变

Fig. 6 Designed result of image quality. (a) Wave front error RMS; (b) centroid distortion

参考远心度分布趋势, 采样点选择在远心度极值点附近。由于步进扫描光刻机在扫描状态时要求保证扫描方向的积分辐照度分布均匀, 因此其瞬态曝光辐照度应遵从梯形分布。但考虑扫描视场范围内的积分效应, 将瞬时视场按均匀分布处理。因此

从旋转对称性出发, 并结合图 7 所示的远心度极值点位置, 视场采样点选择在位于半对角线上的 0 视场点 F'_0 、半口径视场点 F'_1 和边缘视场点 F'_2 , 如图 8 (a) 所示。

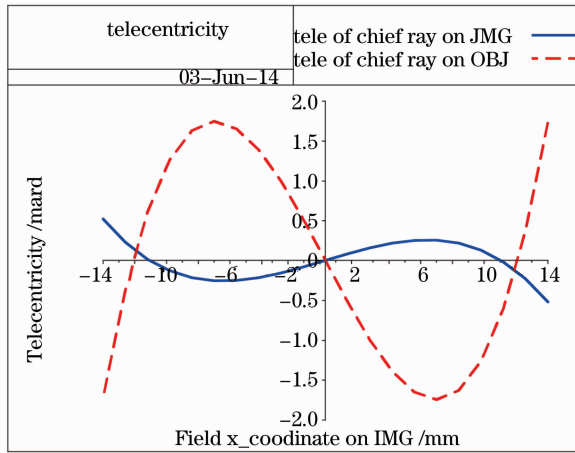


图 7 物方和像方远心度设计值

Fig. 7 Telecentricity designed value respective on object side and image side

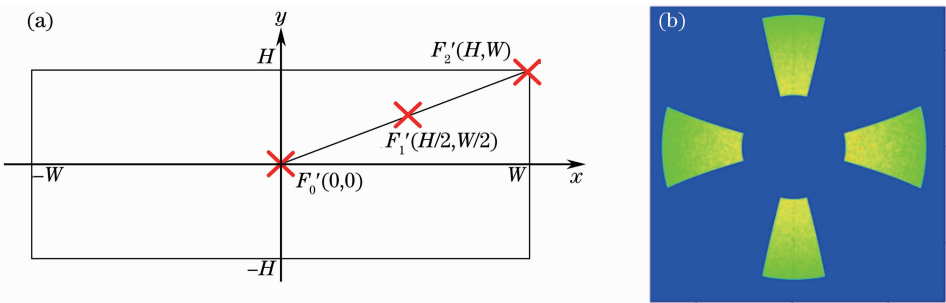


图 8 视场采样与照明模式。(a) 硅片面采样视场点；(b) 四极照明模式光瞳强度分布

Fig. 8 FOV sampling and illumination type. (a) FOV point sampling on wafer; (b) pupil intensity distribution of cross-pole illumination

3.1 非序列追迹对物理实际的仿真

由于光瞳强度矩阵携带光学系统的特征信息，因此在 LightTools 仿真层面需进行周详的规划，使得通过照明仿真所获取的光瞳强度数据能够最大限度反映物理实际。因此，从掩模特性、照明模式及物镜体特性与表面特性等方面进行了较为详尽的设置。

关于掩模图形的空间信息，考虑到二值掩模下即便产生显著的衍射频谱像，也不改变光瞳的分布对称性。同时，衍射效应的引入还会引起背景噪声的增强，反而影响极平衡性的正确判断。因此暂不考虑衍射效应，掩模空载，物方不含空间频率信息。

照明模式选取四极离轴照明，同时为充分彰显 X、Y 两个方向上远心耦合的影响，特采用位于 XY 坐标轴上的四极模式，以增加极平衡指标对光瞳偏心的敏感性。四极模式强度角分布如图 8(b) 所示。

关于物镜的体特性，参考融石英材质的独特属性，对其体吸收、体散射等参量均进行了恰当的取值；对于镜片表面特性，以自定义物理膜系的方式，充分表达透过、反射与散射机制。体特性与表面特性将转化为单视场点光瞳能量的各向异性，同时彰

显不同视场点间的极平衡性差异。

对数据分析原因：轴上视场点质心偏移由于非序列追迹的统计残差导致，边缘视场点的质心偏移是远心误差与透射率不均匀性共同作用的结果。因此，质心标定的方法将远心度与透射率均匀性耦合在一起，不利于指标的区分评价，选择远心度解耦的方法提纯远心度贡献与其他项的贡献。

3.2 光瞳矩阵的解耦

以基于远心标定和质心标定的两条技术路线对光瞳数据进行解耦。远心解耦过程，以物方理想远心作为输入条件，通过 CodeV 序列追迹获得重新定位的像方远心度，分布如图 9(a) 所示，其中幅值变化剧烈的红色曲线表征匹配后的像方远心度。在与图所示 7 的设计值比较后不难发现，当掩模面的照明光束远心度与物镜远心度设计值存在数值为 ΔT_{obj} 的偏差时，像方远心度的匹配值与设计值亦产生偏差，记该差值为 ΔT_{img} ，则有如下关系成立：

$$-\frac{1}{M} = \frac{\Delta T_{img}}{\Delta T_{obj}}, \quad (3)$$

式中 M 为系统倍率。进一步分析变化规律可知，像

方远心度随物方远心度在较大范围内保持线性变化。图 9(b)中,分别表征像方视场点 F'_1 、 F'_2 在相同的物方远心调制下以相同斜率发生变化,说明像方

远心度随物方远心度呈线性变化,且斜率不随空间位置即视场点的不同而发生改变。

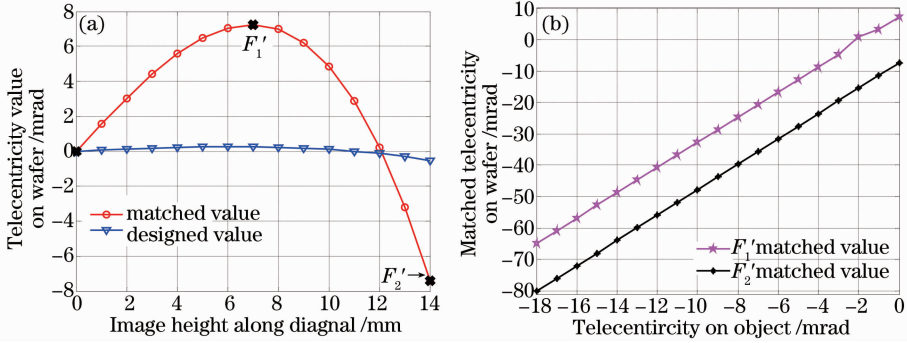


图 9 像方远心度分布。(a) 匹配值与设计值;(b) 远心度变化趋势

Fig. 9 Telecentricity distribution of image side. (a) Matched value and design telecentricity; (b) variation tendency of telecentricity

分别采用计算远心度和搜索质心的方法对光瞳矩阵进行标定,结果如表 1 所示。可见两种方法得到的调整目标 ΔH 和 ΔV 均不尽相同。究其原因主要有两方面:首先,质心标定过程中虽矫正了远心度的偏差,但同时将镜片材料与膜系所引起的单视场光强分布的各向异性也一并予以矫正;另一方面,非序列

追迹光线数量与初始角分辨率之间存在制约,过高的初始分辨率将造成光线密度相对不足,产生高频噪声。采用 2×10^9 非序列光线追迹,确保在增强角空间分辨率的同时降低高频噪声。同时采用角分辨率增强技术,通过三阶插值与平滑滤波,一定程度上缓解了这一矛盾,角分辨率增强后优于 0.17 mrad。

表 1 基于远心度与光强质心的角空间标定值

Table 1 Angular calibration respective based on telecentricity and intensity centroid

Angular calibration		Sampling FOV point on wafer		
		F'_0	F'_1	F'_2
Telecentricity based	ΔH /mrad	0	6.71	-6.96
	ΔV /mrad	0	2.71	-2.81
Centroid based	ΔH /mrad	-0.15	6.95	-16.86
	ΔV /mrad	-0.05	2.58	-6.56

分别依据远心和质心标定的光瞳矩阵对极平衡性指标进行解耦,解耦前的结果及两种解耦方式对应的解耦结果均列于如表 2,辅以柱状图对 H 方

向、 V 方向和 Quad 极平衡性进行直观表达,如图 10 所示。可见,解耦后的极平衡性较原始结果有较大的提升。

表 2 四极照明模式下远心解耦修正后的极平衡性数据

Table 2 Comparison of pupil non-balance with telecentricity coupled and decoupled under cross-pole illumination

Pupil non-balance result		Sampling FOV point			
		F'_0	F'_1	F'_2	
H	Initial status	0.02%	2.43%	4.53%	
	Calibrated	Tele based	0.02%	0.04%	1.96%
		Centroid based	0.04%	0.09%	1.73%
V	Initial status	0.02%	1.15%	1.79%	
	Calibrated	Tele based	0.02%	0.12%	0.70%
		Centroid based	0.02%	0.18%	0.71%
Q	Initial status	0.06%	3.70%	6.47%	
	Calibrated	Tele based	0.06%	0.27%	2.86%
		Centroid based	0.07%	0.39%	2.71%

对于远心解耦方式下的极平衡,轴上视场不受远心度调制,标定前后基本无差异;轴外视场点 F'_1

和 F'_2 的远心度相当,因此解耦前后各项极平衡指标的改变量也基本相同, H 方向极平衡分别提高

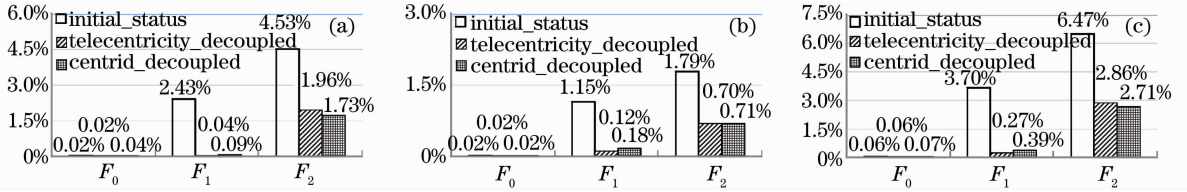


图 10 光瞳极平衡性标定前数据、基于远心解耦的标定数据及基于质心标定数据间的比较。(a) H 方向极平衡性; (b) V 方向极平衡性; (c) Quad 极平衡性

Fig. 10 Pupil non-balance comparison among initial status, telecentricity based calibration and centroid based calibration.

(a) H non-balance; (b) V non-balance; (c) Quad non-balance

2.39%和2.57%, V 方向极平衡分别提高1.03%和1.09%, Q 极平衡分别提高3.43%和3.61%。图11表达 F'_1 和 F'_2 在远心解耦前后光瞳强度在角空间的形貌分布,其中实心曲面表征解耦后的光强,网格面表征解耦前的光强,按从左至右的顺序对光瞳强度进行局部放大,二者间的错位代表远心调制过程中光瞳的偏移量。可见远心度标定方法对极平衡的远心调制成分的分离是行之有效的。视场点间的极

平衡残差的变化趋势表明,从轴上到轴外,光瞳分布的各向异性受到材料与膜层透射率从轴上到轴外的非线性变化的调制。对于质心解耦方式下的极平衡,由于补偿了各种因素下光瞳质心的偏移,因此其解耦结果本应更为理想,但从数据上并未反映出明显优势,结果与远心标定相当。究其原因,与非序列光线的追迹精度与仿真误差存在一定关系。

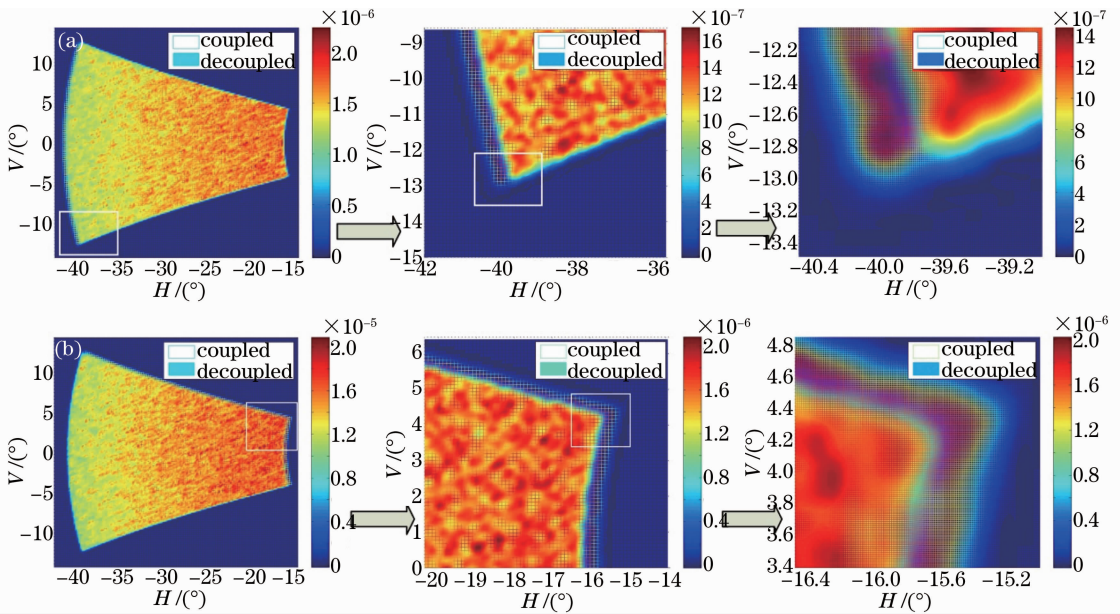


图 11 远心解耦标定前后的光瞳强度分布局部对比。(a) F'_1 光瞳强度; (b) F'_2 光瞳强度

Fig. 11 Comparison of local pupil fill between coupled (mesh) and decoupled (filled). (a) Pupil fill of F'_1 ; (b) pupil fill of F'_2

综上,从光瞳调制机理和指标针对性管控的角度出发,应选择远心标定方法解耦极平衡性指标,该方法可以从作用机理上将极平衡的各向影响因素的独立贡献量清晰地分解出来,有利于针对性的在设计、装调及系统集成各环节中准确把握光瞳的劣化方向与幅值,寻求对应的补偿时机和方法。

4 结 论

照明系统和物镜匹配后的远心对光瞳分布具有显著影响。阐述了将远心调制因素从极平衡指标中解耦出来的必要性,并从作用机理出发,提出两种方法对光刻物镜的光瞳极平衡性指标进行了标定与解耦,修正后的光瞳数据为透射率均匀性与装配误差

的客观表现。将该方法编译为一套程序,并对一个优化设计的物镜方案进行仿真实验。结果表明,本程序具有具备较高的准确性和执行效率。从解耦机制上比较,选择远心解耦的方法评价极平衡更为有合理而有效。该技术路线不仅在仿真层面,对系统测量阶段的指标正确评价也具有指导意义。只有在明确所有因素的独立作用的前提下,才能对各个环节严格把控,提出恰当的补偿策略。

参 考 文 献

- 1 John J Biafore, Chris A Mack, Stewart A Robertson, *et al.*. The causes of horizontal-vertical (H-V) bias in optical lithography: dipole source errors[C]. SPIE, 2007, 6520 : 1-18.
- 2 Stephen P Penwick. Quasi-telecentricity: the effects of unbalanced multipole illumination [C]. SPIE, 2007, 6520: 1-11.
- 3 Hanxiang Bai, Samuel P. Sadoulet. Large-format telecentric lens [C]. SPIE, 2007, 6667: 1-18.
- 4 Jangho Shin, SukJoo Lee, Hochul Kim, *et al.*. Measurement technique of nontelecentricity of pupil-fill and its application to 60 nm NAND flash memory patterns[C]. SPIE, 2005, 5754: 294-302.
- 5 Gregory McIntyre, Chiew-seng Koay, Martin Burkhardt, *et al.*. Modeling and experiments of non-telecentric thick mask effects for EUV lithography[C]. SPIE, 2009, 7271: 1-12.
- 6 Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412004.
潘 兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004.
- 7 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
胡中华, 杨宝喜, 朱 菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 8 Reinhard Voelkel, Uwe Vogler, Andreas Bich, *et al.*. Advanced mask aligner lithography: new illumination system [J]. Opt Express, 2010, 18(20): 20968-20970.
- 9 Warren J Smith. Modern Optical Engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 2008. 215-328.
- 10 Weicai Xu, Wei Huang, Chunlai Liu, *et al.*. Automatic clocking optimization for compensating two-dimensional tolerances [J]. Opt Express, 2013, 21(19): 22145-22152.
- 11 Chunlai Liu, Wei Huang, Zhenguang Shi, *et al.*. Wavefront aberration compensation of projection lens using clocking lens elements[J]. App Opt, 2013, 52(22): 5398-5401.

栏目编辑: 韩 峰