

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 光刻物镜波像差绝对检测技术综述

王青蓝, 全海洋, 胡松, 刘俊伯, 侯溪

#### 引用本文:

王青蓝, 全海洋, 胡松, 等. 光刻物镜波像差绝对检测技术综述[J]. 光电工程, 2023, 50(5): 220001.

Wang Q L, Quan H Y, Hu S, et al. Review of absolute measurement of wavefront aberration in lithography objective[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220001.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220001>

收稿日期: 2022-02-16; 修改日期: 2022-05-23; 录用日期: 2022-05-27

### 相关论文

#### 光刻投影物镜畸变检测中的位移测量误差分析

杜婧, 刘俊伯, 全海洋, 胡松

光电工程 2023, 50(2): 220226 doi: 10.12086/oe.2023.220226

#### 基于自适应非线性粒子群算法的光刻光源优化方法

王建, 刘俊伯, 胡松

光电工程 2021, 48(9): 210167 doi: 10.12086/oe.2021.210167

#### 超高精度面形干涉检测技术进展

侯溪, 张帅, 胡小川, 全海洋, 吴高峰, 贾辛, 何一苇, 陈强, 伍凡

光电工程 2020, 47(8): 200209 doi: 10.12086/oe.2020.200209

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220001

# 光刻物镜波像差绝对检测技术综述

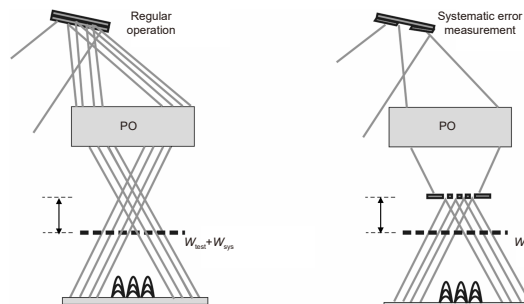
王青蓝<sup>1,2</sup>, 全海洋<sup>1</sup>, 胡松<sup>1\*</sup>,  
刘俊伯<sup>1</sup>, 侯溪<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 光刻物镜是光刻机核心部件, 其波像差大小决定着光刻机的分辨率和套刻精度。随着光刻机性能的逐步提升, 光刻物镜波像差要求已经降低到 0.5 nm (RMS) 以下, 这对波像差的检测是一个极大的挑战。现行的光刻物镜波像差检测方法 (如哈特曼法, 剪切干涉法和点衍射法等) 的检测精度往往受限于其系统误差, 而绝对检测技术是一种能够将系统误差分离出来的技术, 最终突破精度极限。本文回顾了光刻物镜系统波像差检测方法和波前绝对检测技术, 详细梳理了绝对检测技术在不同波像差检测方法中的应用和研究进展, 重点总结了绝对检测技术在不同波像差检测方法中的技术难点, 同时结合这些难点, 展望了光刻物镜波像差绝对检测技术的未来发展趋势。

**关键词:** 光刻物镜系统; 光学检测; 波像差; 绝对检测

中图分类号: TH743

文献标志码: A



王青蓝, 全海洋, 胡松, 等. 光刻物镜波像差绝对检测技术综述 [J]. 光电工程, 2023, 50(5): 220001

Wang Q L, Quan H Y, Hu S, et al. Review of absolute measurement of wavefront aberration in lithography objective[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220001

## Review of absolute measurement of wavefront aberration in lithography objective

Wang Qinglan<sup>1,2</sup>, Quan Haiyang<sup>1</sup>, Hu Song<sup>1\*</sup>, Liu Junbo<sup>1</sup>, Hou Xi<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The lithography objective is the core component of the lithography machine, and its wave aberration determines the resolution and overlay accuracy of the lithography machine. With the gradual improvement of the performance of the lithography machine, the wave aberration requirement of the lithography objective lens has been reduced to below 0.5 nm (RMS), which is a great challenge to the detection of the wave aberration. The detection accuracy of current lithography objective wave aberration detection methods (such as Hartmann method, shear interference method and point diffraction method, etc.) is often limited by its systematic error, and absolute detection technology is a method that can separate the systematic error. The technology that came out finally broke the limit of precision. This paper reviews the wave aberration detection method and surface absolute detection technology of lithography objective lens system, combs the application and research progress of absolute detection technology in wave aberration detection in detail, and summarizes the application of absolute detection technology

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-05-23; 录用日期: 2022-05-27

\*通信作者: 胡松, Husong@ioe.ac.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

in different wave aberration detection methods. At the same time, combined with these difficulties, the future development trend of the absolute detection technology of wave aberration of lithography objective lens is prospected.

**Keywords:** lithography objective system; optical test; wave aberration; absolute test

## 1 引言

光刻工艺是半导体器件制备过程中的核心步骤,其原理是通过光学曝光将掩模上的电路信息投影到晶圆上<sup>[1]</sup>。作为光刻机的三大关键部件之一,光刻物镜的成像质量对关键特征线宽的缩小起到至关重要的作用<sup>[2]</sup>。光刻物镜的波像差检测精度是衡量其成像质量的重要指标,先进的光刻机对波像差检测精度已达到亚纳米级别<sup>[3]</sup>。

波像差检测在光刻物镜的研发和制造中起到不可或缺的作用。国外三大光刻机制造厂商 ASML、Canon 和 Nikon 掌握着大量波像差检测技术<sup>[4-9]</sup>,但最新的高精度检测技术并未对外公开,高端的光刻机也不对华出售,企图对我国形成技术壁垒。国际上其他团队开始研究将全息技术应用到精确测量波前像差<sup>[10]</sup>以及标定传感器以达到高精度波前检测的目的<sup>[11-13]</sup>。近年来,国内团队在波像差检测领域也取得了一定的进展。中国科学院上海光学精密机械研究所(简称中科院上海光机所)王向朝团队在基于空间像的波像差检测提升精度和速度方面做了大量的研究<sup>[14-16]</sup>,在使用剪切干涉法测波像差提高精度和效率方面取得了一定成果<sup>[17-19]</sup>。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称“长春光机所”)在光刻物镜波像差剪切干涉检测提高精度和抑制系统误差方面也有一些进展<sup>[20-23]</sup>,其他团队开始探索结合深度学习的方法重建高精度的波前<sup>[24-25]</sup>。然而,与国际上最先进的波像差检测技术相比,我国在理论和应用上仍存在差距。波像差绝对检测能将系统误差从相对测量结果中分离,可实现超高的检测精度<sup>[26-28]</sup>,受到了越来越多国内外研究人员的重视。开展高精度的光刻物镜波像差绝对检测研究,对提升我国光刻机产业的技术水平、打破技术封锁具有重要意义。

本文首先介绍了几种波像差检测方法,受到系统误差等因素的影响,这些检测方法的精度较低,随后介绍了波前的绝对检测技术,重点介绍绝对检测技术在不同波像差检测方法中的应用,并阐述了误差来源、误

差消除原理和检测精度。最后总结绝对检测技术在不同波像差检测方法中的不足和进一步发展所面临的难点,展望了光刻物镜波像差绝对检测技术的发展趋势。

## 2 光刻物镜波像差检测方法

波像差检测的实质是对波前相位的检测,通过与参考波前相位的对比得到波像差。光刻物镜波像差检测方法有传统干涉法、哈特曼法、剪切干涉法和点衍射法,四种方法的检测特点如图 1 所示。传统干涉法使用的是传统干涉仪,需要参考光路,能够实现高精度的检测,适用于离线检测。哈特曼法和剪切干涉法测得波前斜率,两种方法都适用于在线检测,但不能直接测得波前信息,需要从波前斜率中提取相位值,最终重建波前。由于计算过程十分复杂,早期只能用来做定性分析,随着计算机技术的发展,逐步成为备受青睐的波前检测方法。点衍射法测得波前曲率,属于共路干涉。但是随着工作光的波长不断减小,检测用的针孔尺寸越来越小,透过针孔光通量变少会导致条纹对比度降低,影响最终的检测精度<sup>[29-33]</sup>。本节将详细介绍这几种光刻物镜波像差检测方法。

### 2.1 传统干涉法

传统干涉仪主要为 Twyman-Green 型干涉仪和 Fizeau 型干涉仪两大类,都要求有一个由高精度标准光学面产生的参考波前与待测波前干涉,因此检测精度受到参考表面精度的直接影响。Twyman-Green 干涉仪检测物镜波像差的原理如图 2 所示<sup>[34]</sup>,光源准直后形成一个平面波,经分束器分为参考光和测量光,两束光分别携带参考镜和测试物镜的信息,在观察平面上形成最终的干涉图。Fizeau 型干涉仪的工作原理与 Twyman-Green 型干涉仪类似,都是通过参考光和测量光形成干涉,经过数据分析得到待测物镜的波前信息,如图 3 所示<sup>[35]</sup>。

### 2.2 哈特曼法

哈特曼检测法由哈特曼<sup>[36]</sup>于 1900 年提出,其原理是将一个小孔阵列光栅(Hartmann 光栅)放置在被

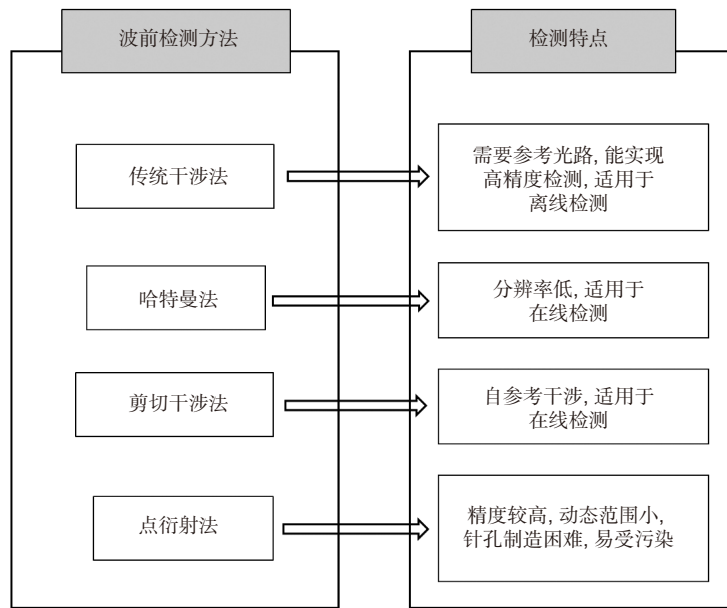


图 1 波像差检测方法

Fig. 1 Wave aberration detection method

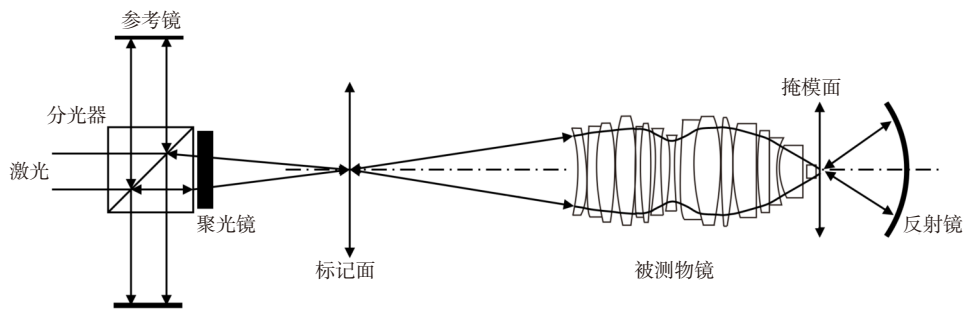


图 2 Twyman-Green 干涉仪检测光刻物镜原理<sup>[34]</sup>

Fig. 2 Principle of Twyman-Green interferometer detection lithography objective<sup>[34]</sup>

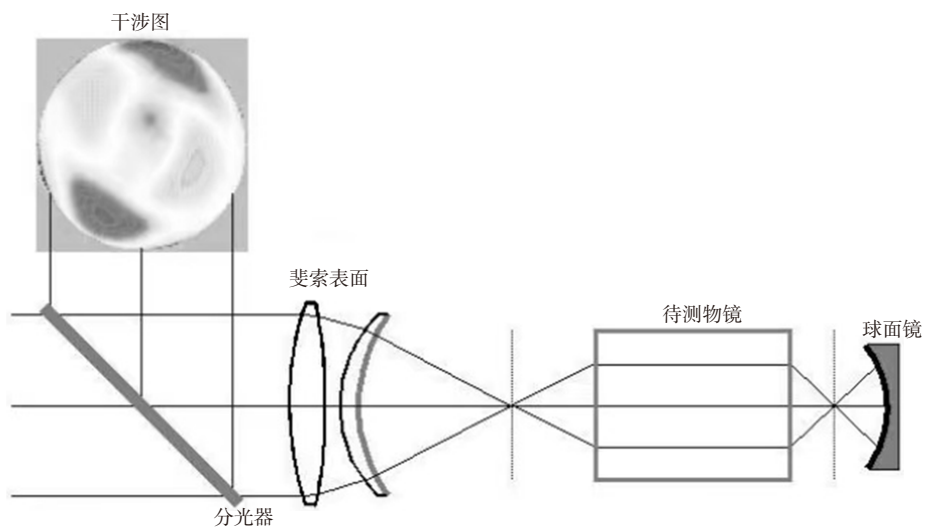


图 3 Fizeau 干涉仪检测光刻物镜原理<sup>[35]</sup>

Fig. 3 The principle of Fizeau interferometer detection lithography objective<sup>[35]</sup>

测系统的出瞳位置, 待测波前被 Hartmann 光栅分割后到达探测器平面。用探测器采集被分割的光束阵列, 从水平和垂直两个方向测量这些子光束阵列的位置相对参考位置的偏离量  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 从而计算得到待测波前相对于水平和垂直方向的斜率, 利用斜率信息重构待测波前。

哈特曼检测法的局限之处是 Hartmann 光栅上的小孔占整块板的比例有限, 只有少部分光从小孔阵列透过, 大部分光源被不透明部分阻挡, 光能的利用率很低。1971 年, Shack 和 Platt<sup>[37]</sup> 在哈特曼检测法的基础上提出利用透镜阵列替代小孔阵列用于分割待测的光束, 改进的哈特曼检测法原理如图 4 所示, 由于每束光是在探测器上单独聚焦, 相对于哈特曼检测法具有更高的光能利用效率<sup>[38]</sup>。

日本 Nikon 团队基于哈特曼传感器提出了 P-PMI 技术, 可以用于光刻物镜波像差检测。其检测原理如图 5 所示, 待测物镜的物面放置一个满足衍射极限的针孔, 光波经过待测物镜后, 会携带像差信息进入测量系统。由于待测物镜的像差影响, 穿过微透镜阵列的各个波前会在 CCD 上发生位置偏移, 根据算法解

出该偏移信息则能得到待测物镜波像差<sup>[39]</sup>。

### 2.3 剪切干涉法

相对于传统的干涉仪, 剪切干涉仪不需要参考表面, 而是通过光学元件将一个波前分成两个有微小偏移相同的波前实现干涉。剪切干涉法根据工作原理可以分为径向剪切干涉法、旋转剪切干涉法、反转剪切干涉法和横向剪切干涉法四种<sup>[40]</sup>, 在波像差检测中最常使用的方法是横向剪切干涉法。横向剪切干涉法通过掩模、光栅和分光器件等光学元件, 使被测波前相对于原始波前产生了一个横向的位移, 在两个波前重叠的部分产生干涉, 横向剪切干涉法可以实现对平面波前和球面波前的剪切, 原理如图 6 所示。使用 CCD 探测这两个位移前后波前的干涉图, 通过算法实现原始波前重建。

剪切干涉仪的结构相对简单, 不会受参考镜的精度影响, 抗震动性较强, 因此检测精度较高。基于剪切干涉仪, 发展出了多种高精度检测方法, 如 ASML 的 ILIAS 剪切干涉检测技术。ILIAS 技术基于 Ronchi 剪切干涉原理, 测物镜波像差的过程如图 7 所示, 通过在十字标记级匹配一组源光栅和在掩模级匹

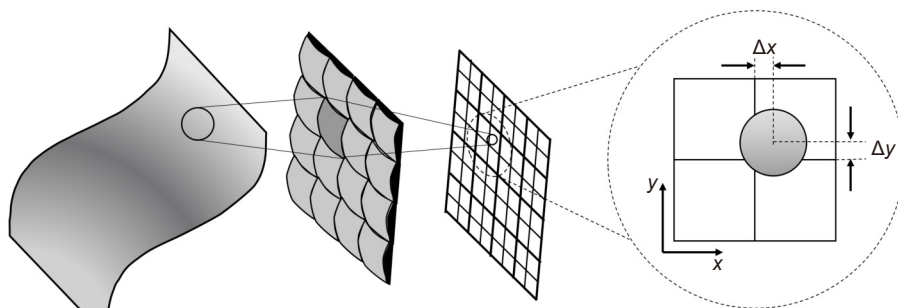


图 4 夏克-哈特曼波前传感技术原理示意图<sup>[38]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of the principle of Shack-Hartmann wavefront sensing technology<sup>[38]</sup>

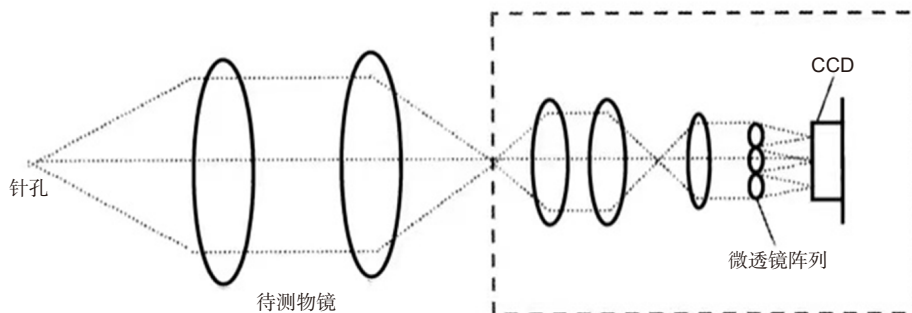


图 5 基于哈特曼传感器的 P-PMI 技术<sup>[39]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the principle of Shack-Hartmann wavefront sensing technology<sup>[39]</sup>

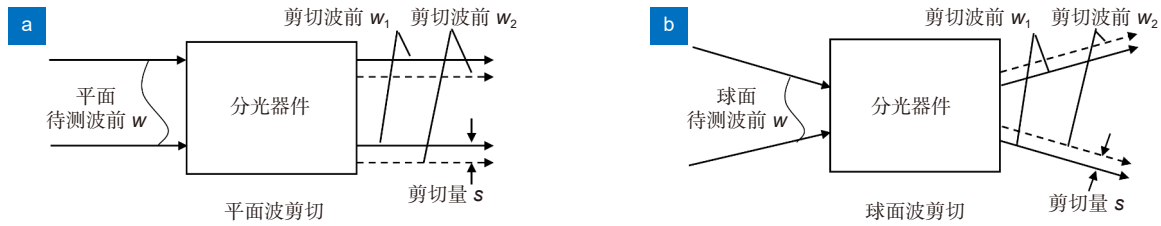


图 6 横向剪切干涉法原理图<sup>[41]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of transverse shear interferometry<sup>[41]</sup>

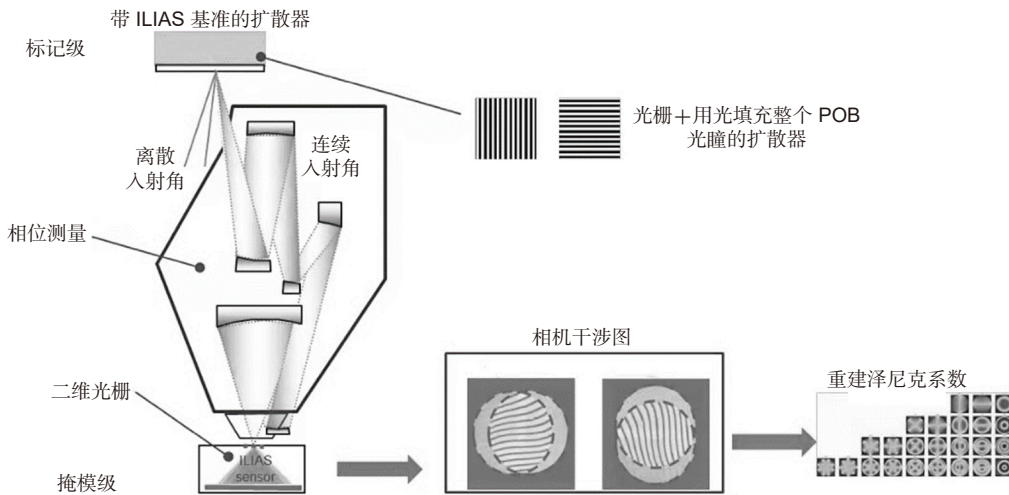


图 7 基于 Ronchi 剪切干涉原理的 ILIAS 技术<sup>[42]</sup>

Fig. 7 ILIAS technology based on Ronchi shear interference principle<sup>[42]</sup>

配一个二维传感器光栅，分别得到  $X$ ,  $Y$  方向的干涉图，根据相应算法重建波前像差<sup>[42]</sup>。

### 2.4 点衍射法

点衍射干涉仪的构想最早由 Linnik 提出<sup>[43]</sup>，1972 年点衍射干涉仪重新受到 Smartt 等<sup>[44]</sup>的重视，并提出用点衍射干涉仪检测光学系统。1996 年，Medeck 等<sup>[45]</sup>提出相移点衍射干涉仪 (PS/PDI)，可以通过相移显著提高其测量精度。如图 8 所示，第一个掩模为针孔，光束入射后被滤波并产生无像差的球面波，再经

过二元光栅后被分成 0 级和 1 级衍射光，这些光波通过待测物镜后携带光刻物镜的像差，到达第二个掩模。第二个掩模由一个针孔和一个窗口组成，0 级光通过上面的针孔后衍射成为球面参考波，作为测试波的 1 级光通过衍射板上的窗口后仍携带物镜波像差信息，两者在探测器平面上形成干涉条纹，由 CCD 相机探测<sup>[46]</sup>。

在 PS/PDI 中，光栅在检测波和参考波中引入可变的相位差，将光栅沿垂直栅线的方向移动一个周期，

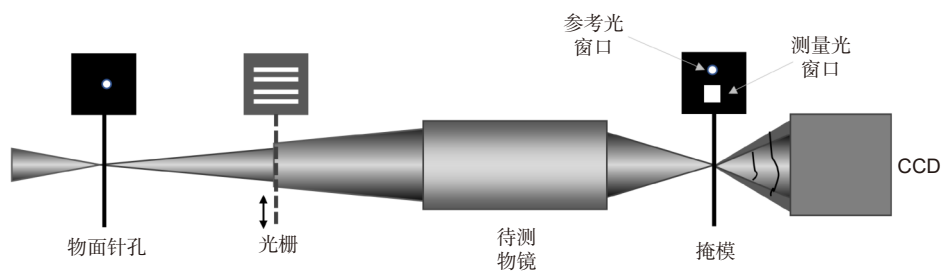


图 8 相移点衍射干涉仪结构<sup>[45]</sup>

Fig. 8 Phase-shifted point diffraction interferometer structure<sup>[45]</sup>

可使 1 级衍射光的相位产生一个光栅周期的变化, 而 0 级衍射光的相位保持不变。根据光栅移动距离和衍射光相位变化之间的关系, 可实现多步相移检测<sup>[47]</sup>。

日本 CANON 公司基于线衍射原理研发用于光刻物镜波像差原位检测干涉仪, 具体检测过程如图 9 所示。将一个尺寸小于待测物镜衍射极限的狭缝和一个尺寸远大于待测物镜衍射极限的窗口的组合用于标记像差, 在掩模和工件台各放置一个像差标记组合。照明光先通过掩模上的狭缝形成理想波前, 经待测物镜携带物镜的波像差信息, 再成像于工件台的窗口下的 CCD, 此束光为测量光; 照明光依次通过掩模上的窗口、待测物镜和工件台的狭缝, 会形成理想波前, 此束光作为参考光。把 CCD 上形成的 X、Y 两个方向的干涉图解调, 最终重建测试波前, 得到待测物镜的波像差信息<sup>[7]</sup>。

### 3 绝对检测方法

绝对检测方法首先运用在高端光学元件面形检测中, 从测量的结果里消去参考面形误差、环境带来的随机误差和检测仪器自带的系统误差等, 从而提高测量的绝对精度<sup>[48]</sup>。随着研究的深入, 科研人员发现将绝对检测手段与光刻物镜系统波像差检测技术相结合, 可将系统误差从相对测量中分离出来, 达到高精度的检测水平和复现精度, 能够满足日益提高的波像差检测精度的需求。经典的绝对检测方法有三平(球)面法、双球面法、旋转平移法、旋转平均法和随机球法, 如图 10 所示, 接下来将对五种绝对检测方法进

行详细的介绍。

#### 3.1 三平(球)面法

三平面法及其变形方法是最经典、最为常用的绝对检测方法<sup>[49]</sup>。三平面法由 Schulz 和 Schwider 于 1967 年提出<sup>[50]</sup>。如图 11 所示, 在笛卡尔坐标系下, 三个精度相近的平面分别表示为  $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $C(x, y)$ , 其中两个平面作为参考平面, 用于对第三个平面的绝对检测。使用 Fizeau 干涉仪测量三次, 每次测量都要使其中一个参考面绕  $y$  轴翻转, 测量结果为

$$D(x, y) = A(x, y) + B(-x, y), \quad (1)$$

$$E(x, y) = C(x, y) + B(-x, y), \quad (2)$$

$$F(x, y) = C(x, y) + A(-x, y). \quad (3)$$

未知数个数多于方程个数, 令  $x=0$ , 解出  $y$  轴上的面形分布:

$$A(0, y) = \frac{D(0, y) - E(0, y) + F(0, y)}{2}, \quad (4)$$

$$B(0, y) = \frac{D(0, y) + E(0, y) - F(0, y)}{2}, \quad (5)$$

$$C(0, y) = \frac{-D(0, y) + E(0, y) + F(0, y)}{2}. \quad (6)$$

将一个面旋转角度  $\theta$  后, 用同样的方法可解出与  $y$  轴夹角为  $\theta$  的一根线上的面形, 重复多次即可近似得到整个面的绝对形貌。

1971 年, Harris 等<sup>[51]</sup>将三平面法引入到球面检测领域, 发展成三球面法。三平(球)面法每次测量只能得到一条线上的面形, 需要旋转多个角度测量才能近似得到一个完整面的数据, 而且除了被测量面外, 还

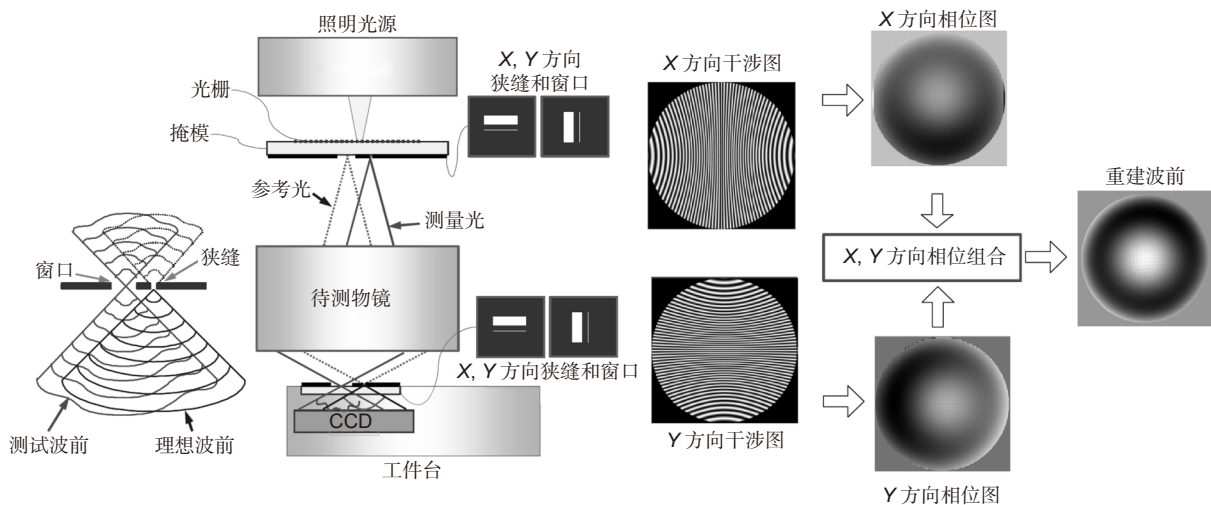


图 9 基于线衍射干涉原理的 i-PMI 技术<sup>[7]</sup>

Fig. 9 i-PMI technology based on the principle of line diffraction interference<sup>[7]</sup>

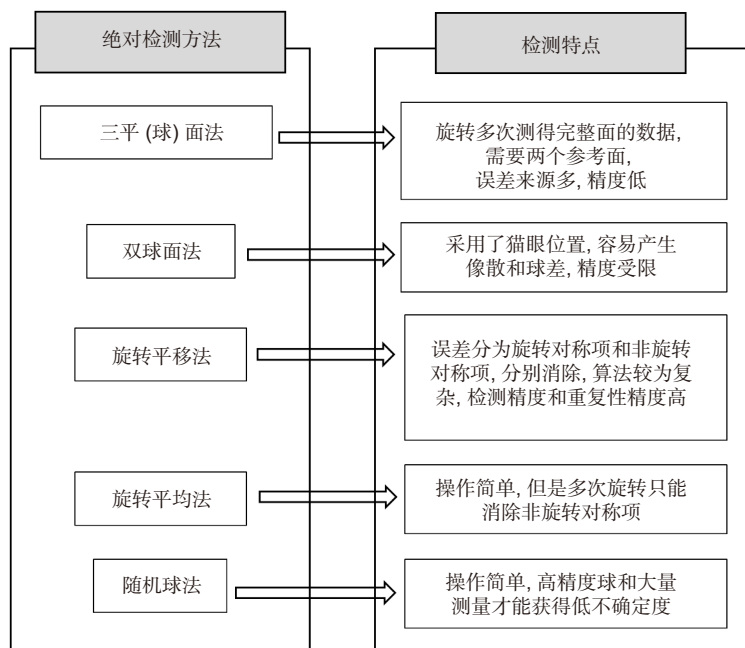


图 10 绝对检测方法

Fig. 10 Absolute detection method

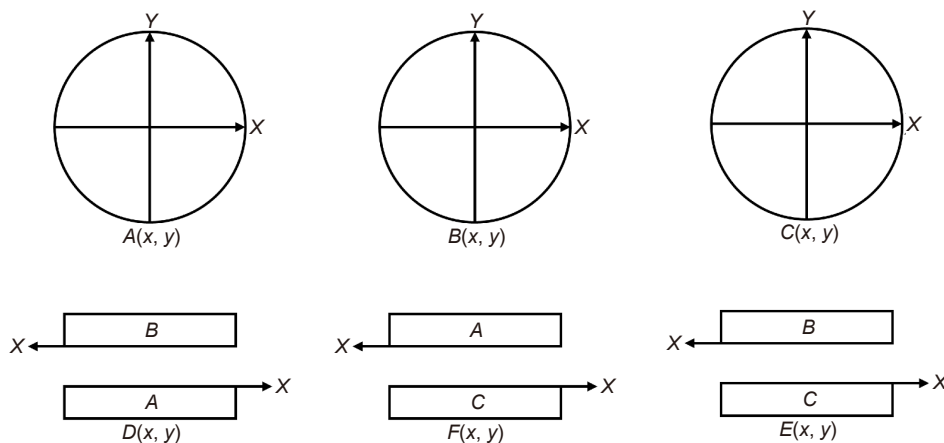


图 11 经典三平面组合测量示意图<sup>[49]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of classic three-plane combination measurement<sup>[49]</sup>

需要额外的两个参考面。因此，测量误差的来源多而且复杂，其检测精度受到限制，学者更青睐于检测对象更少、步骤更简单的双球面绝对检测。

### 3.2 双球面法

球面波前绝对检测的经典方法为 1976 年 Jensen 提出的基于三位置的双球面法<sup>[52]</sup>，该方法至少需要将测试表面做一次平移和一次旋转。三个位置分别是包含 0°的初始位置、180°旋转角度和猫眼位置，如图 12 所示。利用两个被测球面在不同位置进行检测，由获

取的检测数据分析可以重构被测面的绝对面形，在理论上三位置双球面法可以消除由参考镜带来的系统误差。1994 年 Selberg<sup>[53]</sup>提出了基于五位置的双球面法，在三位置的基础上增加了 90°旋转角度测量和 270°旋转角度测量，消除了旋转轴和光轴之间未对准的影响。这些测量方式都受制于猫眼位置的调整误差，测量精度受到了很大的制约。

由于双球面法猫眼位置的测量很容易产生像散和球差，经过近几十年的发展，逐渐开发出了不需要测



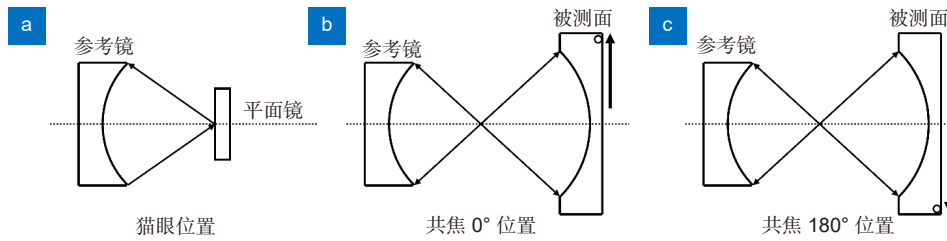


图 12 基于三位置的双球面绝对检测示意图<sup>[52]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of absolute detection of double spheres based on three positions<sup>[52]</sup>

量猫眼位置的旋转平移法<sup>[48,54-59]</sup>。

### 3.3 旋转平移法

Schulz 和 Schwider<sup>[59]</sup> 在 1976 年第一次提出将旋转平移的方法运用于绝对检测当中, 实现过程是将被测面面形的误差分成旋转对称和非旋转对称两个部分, 分别消除。旋转平移法的原理图如图 13 所示, 被测面中心与参考面中心重合, 使参考面和待测面共焦。将被测球面绕光轴等角度旋转  $N$  次, 则其旋转非对称面形误差可从  $N$  次测量的数据中计算出来。保持待测面的中心位置不变, 通过平移参考面得到待测球面的旋转对称误差。

旋转平移法检测精度高, 且操作简单, 因此许多学者做了进一步的研究<sup>[56,61-68]</sup>。Su 等<sup>[56]</sup> 研究了多位置测量的移位旋转法, 改进的方法包含四个位置的测量, 即原位测量、待测表面旋转后的测量、待测表面横向、纵向移动后的测量, 更多的测量数据被用于计算, 提高了重复性精度。

### 3.4 旋转平均法

旋转平移法只有在待测镜同时可以旋转和平移的情况下才能使用, 这比较适合反射波前的测试。Evans 和 Kestner<sup>[69]</sup> 提出了旋转平均的绝对检测方法, 可同时用于反射波前和透射波前的检测。如图 14 所示, 将被测波前相对参考波前绕光轴等角度旋转  $N$  次, 假设每次旋转角度为  $\varphi = 2\pi/N$ ,  $N$  次测量波前信息为

$$\begin{cases} W_1 = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta) \\ W_2 = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta + \varphi) \\ \vdots \\ W_N = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta + (N-1)\varphi) \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $R$  为参考波前误差,  $T$  为被测波前误差。波前误差<sup>[26]</sup> 可以分为旋转对称项 ( $T_{\text{sym}}$ ) 和非旋转对称项 ( $T_{\text{asy}}$ ), 则  $N$  次测量结果的平均值表示为

$$\bar{W} = R(\rho, \theta) + T_{\text{sym}}(\rho) + \frac{1}{N} [T_{\text{asy}}(\rho, \theta) + T_{\text{asy}}(\rho, \theta + \varphi) + \dots + T_{\text{asy}}(\rho, \theta + (N-1)\varphi)]. \quad (8)$$

对于非旋转对称项, 记为  $T_{\text{asy}}^*$ , 用 Zernike 多项式

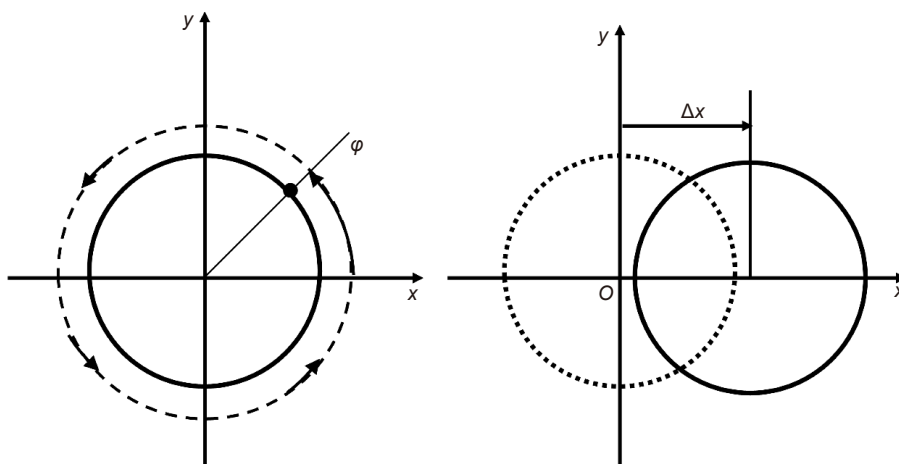


图 13 旋转平移法原理示意图<sup>[60]</sup>

Fig. 13 Schematic diagram of rotation and translation method<sup>[60]</sup>

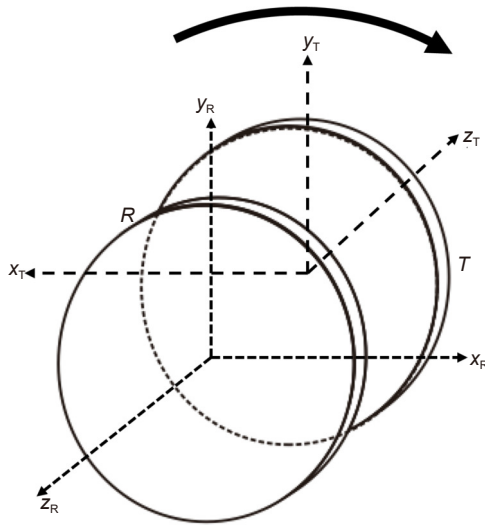


图 14 旋转平均法原理示意图<sup>[70]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of the principle of rotating average method<sup>[70]</sup>

展开并整理:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{asy}}^* &= \frac{1}{N} [T_{\text{asy}}(\rho, \theta) + T_{\text{asy}}(\rho, \theta + \varphi) + \dots \\
 &\quad + T_{\text{asy}}(\rho, \theta + (N-1)\varphi)] \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{m,l} R_l^m [\cos m\theta(x_l^m A + x_l^{-m} B) \\
 &\quad + \sin m\theta(x_l^{-m} A + x_l^m B)], \quad (9)
 \end{aligned}$$

其中:  $A = \sum_{n=0}^{N-1} \cos nm\varphi, B = \sum_{n=1}^{N-1} \sin nm\varphi$ .

当  $m \neq kN$  ( $k$  为整数) 时,  $A = B = 0, T_{\text{asy}}^* = 0$ ; 当  $m = kN$  时,  $A = N, B = 0$ , 则有:

$$T_{\text{asy}}^* = \sum_{m=kN,l} R_l^m [x_l^m \cos m\theta + x_l^{-m} \sin m\theta] = T_{\text{asy}}^{kN\theta}, \quad (10)$$

其中:  $T_{\text{asy}}^{kN\theta}$  表示角向因子  $m = kN$  旋转非对称项波前误差, 所以  $\bar{W}$  可表示为

$$\bar{W} = R + T_{\text{sym}} + T_{\text{asy}}^{kN\theta}. \quad (11)$$

因此, 被测面的旋转非对称波前信息可由下式求得:

$$W_1 - \bar{W} = T_{\text{asym}} - T_{\text{asy}}^{kN\theta}. \quad (12)$$

然而, 由式 (12) 可知, 旋转平均法得到的被测波前信息缺失了辐角为  $kN\theta$  的部分, 有学者使用 Zernike 多项式拟合和附加的剪切旋转测量来获得<sup>[58]</sup>.

### 3.5 随机球法

随机球法绝对检测的思想是对高质量面形的小球进行多次随机测量, 得到多次检测的数据的平均数,

用来消除被测小球的面形误差以及来自外部噪声的干扰, 最终可以得到需要标定的参考镜面形误差。随机球法由 Parks 于 1978 年提出<sup>[71]</sup>, 随机球法绝对检测如图 15 所示, 通过对小球不同方向的随机区域进行测量, 实现对标准镜头参考面面形绝对标定。对于理想干涉仪系统, 测量波前误差  $W_n$  由参考面反射的波前误差  $W^R$  和由球反射的波前误差  $W_n^B$  之间的叠加:

$$W_n = W^R + W_n^B, \quad (13)$$

在球的不同方向对参考面进行测量, 并平均:

$$\begin{aligned}
 \bar{W} &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (W^R + W_n^B) \\
 &= W^R + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n^B, \quad (14)
 \end{aligned}$$

因

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n^B \right) = 0, \quad (15)$$

所以随机球的误差被消除, 测量结果收敛于参考误差。

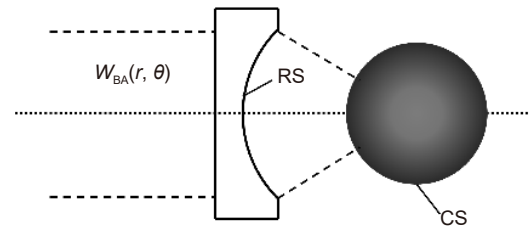


图 15 随机球法原理示意图<sup>[72]</sup>

Fig. 15 Schematic diagram of the principle of random ball method<sup>[72]</sup>

在随机球法中, 测量次数过少, 则不能完全消除参考面误差; 若测量次数过多, 不仅效率低下, 还会引入额外的随机误差, 且校准精度并非随测量次数的增多而上升。Griesmann 等<sup>[72]</sup> 分析了校准参考波前的精度与测量次数之间的关系, 发现所需的测量次数与干涉仪的测量不确定度有关, 当测量不确定度较低时, 需要进行更多的测量。

## 4 光刻物镜系统波像差绝对检测研究进展

光刻物镜系统成像质量直接影响光刻加工的精度, 而波像差检测精度是衡量光刻物镜系统成像质量的重要指标, 因此对光刻物镜系统的波像差检测精度提出了更高的要求。传统波像差检测技术结合可以抑制或

消除系统误差的绝对检测技术, 逐渐发展成光刻物镜波像差绝对检测技术。光刻物镜绝对检测方法分别以传统干涉仪、哈特曼干涉仪、光栅剪切干涉仪和点衍射干涉仪为基础, 具体分类如图 16 所示。传统干涉法适用于光刻物镜波像差离线检测, 可细分为基于双球面法波像差绝对检测和基于随机球法的波像差绝对检测。光刻物镜波像差原位检测技术包含基于哈特曼法的波像差绝对检测、基于剪切干涉的波像差绝对检测和基于点衍射的波像差绝对检测。本节将详细介绍光刻物镜波像差绝对检测方法, 阐述其误差来源以及误差消除的原理。

#### 4.1 基于传统干涉仪的波像差绝对检测技术

##### 4.1.1 基于双球面法的波像差绝对检测

结合双球面法和平移相减法, 可以进行球面透射波前的绝对检测<sup>[73]</sup>, 这种方法有望用于光刻物镜的绝

对检测上。在如图 17 所示的测试中, 用 Fizeau 干涉仪测量得到的相对波前可表示为

$$O(x, y) = W(x, y) + R_1(x, y) + R_2(x, y), \quad (16)$$

式中:  $O(x, y)$  为待测波前的相对检测结果,  $W(x, y)$  为待测透镜的真实波前,  $R_1(x, y)$  为含前标准球面镜波前误差的前端误差,  $R_2(x, y)$  为后置标准平面反射镜的面形误差。

第一次测量时, 先把平面反射镜与被测透镜视为一个球面反射镜, 设其波前为  $Q(x, y)$ , 则式 (16) 变为

$$O(x, y) = Q(x, y) + R_1(x, y). \quad (17)$$

此时可以采用双球面三位置法, 得到球面反射镜的波前误差。第二次测量时, 再把被测透镜与前置标准球面镜视为一个平面镜, 可以利用两平面绝对检测法测出后置平面反射镜波前  $R_2(x, y)$ 。如图 18 所示, 先后检测出初始位置波前和平移后的波前, 再将两个

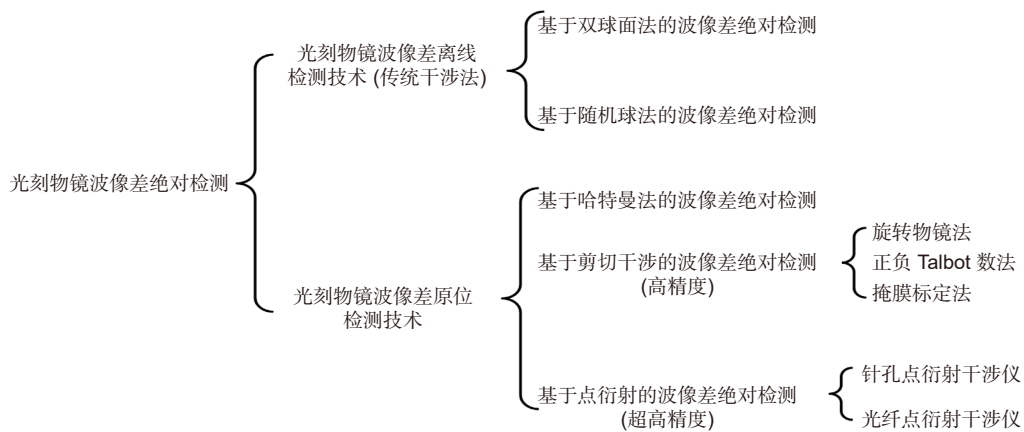


图 16 光刻物镜波像差绝对检测技术

Fig. 16 Wavefront aberration of lithography objective absolute detection technology

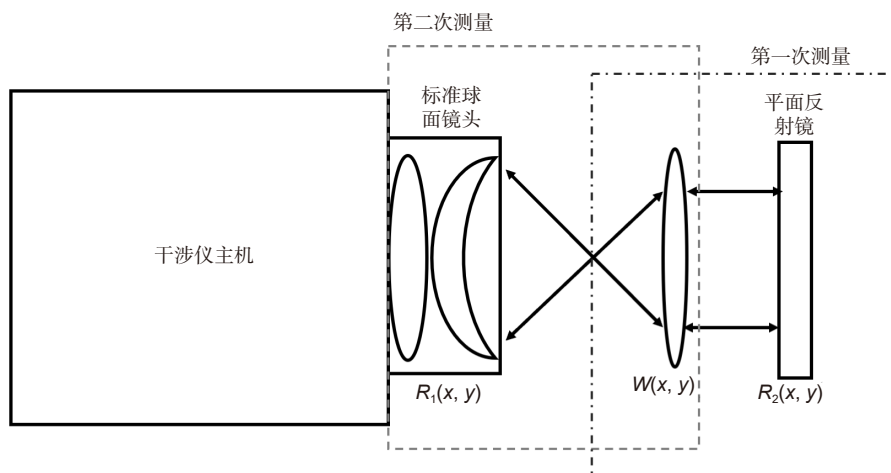


图 17 Fizeau 干涉仪测量示意图<sup>[73]</sup>

Fig. 17 Schematic diagram of Fizeau interferometer measurement<sup>[73]</sup>

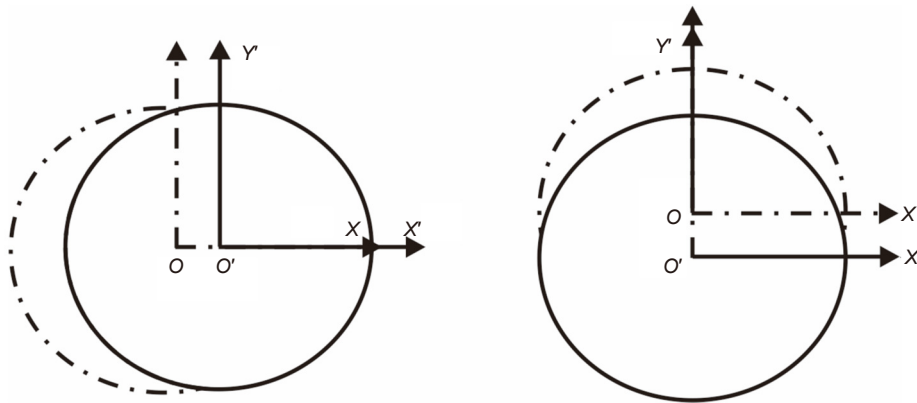


图 18 平移相减示意图<sup>[73]</sup>

Fig. 18 Schematic diagram of translation and subtraction<sup>[73]</sup>

波前相减, 可消除由前端标准平面镜和干涉仪内部的系统误差。真实的待测透镜波前可以表示为

$$W(x, y) = Q(x, y) - R_2(x, y). \quad (18)$$

基于双球面的波像差绝对检测技术, 可以有效减小干涉仪中前标准球面镜和后置反射镜对测量结果的影响。在 4 寸 Zygo GPI Fizeau 型移项干涉仪上进行方法的验证, 结合高精度的平移旋转机构, 最终双球面三位置法得到的待测球面波前精度为 17 mλ RMS (10.8 nm)。

猫眼法属于双球面法的一种, 利用猫眼法可对透射波前进行绝对检测, 可提高菲索干涉仪的透射波前绝对检测精度<sup>[74]</sup>。如图 19 所示, 干涉仪透射波前经

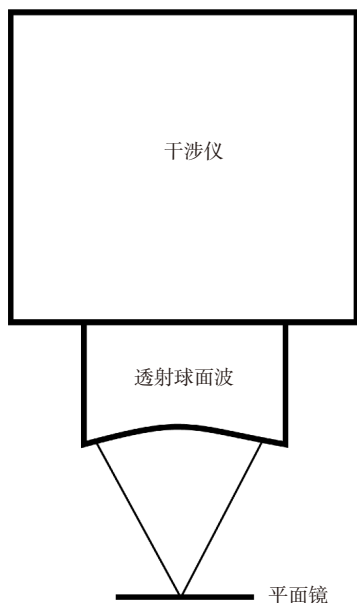


图 19 球面干涉仪猫眼位置测量示意图<sup>[74]</sup>

Fig. 19 Cat's-eye test configuration of spherical interferometer<sup>[74]</sup>

过球面标准镜后形成球面波, 其中一部分光被标准镜的球面反射后原路返回到干涉仪, 形成参考波。透射过参考镜的波前为被测波前, 被放置于猫眼位置的平面镜反射后返回到干涉仪。与参考波前相比, 被测波前旋转了 180°。

第一次测量为原位测量, 参考波前表示为

$$W_R = 2W_g + 2nS_R, \quad (19)$$

式中:  $W_g$  为干涉仪透射波前,  $S_R$  为参考面形,  $n$  为标准镜的折射率。被测波前表示为

$$W_T = [W_g + (n - 1)S_R]_{(\text{rot } 180^\circ)} + W_g + (n - 1)S_R, \quad (20)$$

式中:  $(\text{rot } 180^\circ)$  表示旋转角度。因此, 猫眼位置干涉仪测量得到的波前为

$$\begin{aligned} W_0 &= \frac{1}{2}(W_R - W_T) \\ &= \frac{1}{2}[(W_g - W_{g(\text{rot } 180^\circ)}) + (nS_R - nS_{R(\text{rot } 180^\circ)}) + S_R \\ &\quad + S_{R(\text{rot } 180^\circ)}]. \end{aligned} \quad (21)$$

标准镜的精度一般很高, 其参考面形  $S_R$  可忽略, 因此:

$$W_0 = \frac{1}{2}(W_g - W_{g(\text{rot } 180^\circ)}). \quad (22)$$

Z 轴为干涉仪光轴,  $XOY$  平面与其垂直, 将反射镜绕 X 轴、Y 轴旋转一定的角度后, 在干涉仪中将得到另外两组数据:

$$W_1 = \frac{1}{2}(W_g - W_{g(\text{rot } 180^\circ, x)}), \quad (23)$$

$$W_2 = \frac{1}{2}(W_g - W_{g(\text{rot } 180^\circ, y)}). \quad (24)$$

联立方程 (22)~(24), 可计算出干涉仪透射波前。

由于存在离焦和倾斜误差, 这种方法无法测得波

前的 Power 值, 所以在实验过程中均将 Power 值去除。使用此方法, 用 Zygo 干涉仪对球面标准镜 (4 inch (1 inch=2.54 cm), F=1.5, 面形等级 5 nm RMS) 进行透射波前检测, 精度约为 31 mλ RMS (19.8 nm)。为了进一步验证该方法的有效性, 对球面标准镜 (4 inch, F=0.65, 面形等级 5 nm RMS) 测量透射波前, 精度约为 32 mλ RMS (20.4 nm)。两次测量的结果数值相差不大, 但是二维形状相差较大, 利用 F=1.5 标准镜得到的干涉仪自身波前和利用 F=0.65 标准镜得到的干涉仪自身波前做差, 结果为 24 mλ RMS (15.3 nm)。此方法误差较大的原因有环境误差、平移量误差、相减对准误差和参考面标定误差, 且无法准确测得 Power 值, 需要进行进一步的研究。

中科院上海光机所王朝向团队提出一种测量高 NA 物镜波前像差的新方法, 采用带有平面镜的猫眼反光镜来反射波前, 将平面镜至少向三个不同的方向倾斜一定的倾斜角, 以收集被测波前像差的充分信息, 测量装置如图 20 所示。对每组倾斜角度和方向建立特定的网格组合 Zernike 多项式, 以拟合相应的返回波前, 根据返回波前重构出波前像差。

测量精度受倾斜角、倾斜角误差、NA、平面镜

离焦量、探测器分辨率等随机噪声的影响, 其中倾角误差是测量误差的主要来源。当相对倾斜角误差小于 0.5% 和 0.1% 时, 相对测量误差分别在 5% 和 1% 以内<sup>[75]</sup>。使用 Zygo 干涉仪分别对 0.14 NA、0.65 NA 和 0.9 NA 物镜进行波像差检测, 物镜具体参数表 1 所示。

不同物镜检测结果的相对 RMS 误差如表 2 所示, 实验验证了该方法的可行性。综上, 该方法可实现高精度、低成本的高分辨率物镜的波像差测量。

#### 4.1.2 基于随机球法的波像差绝对检测

Bergner 等<sup>[76]</sup>提出了基于随机球法的透镜波像差检测方法, 可用于光刻物镜的绝对检测。该方法使用 Mach-Zehnder 干涉仪, 如图 21 所示, 测量系统中使用了球透镜校准干涉仪误差。为了分离干涉仪的系统误差, 先将待测物镜系统拆除, 只测量球透镜的误差, 因此, 每次测量的波前都是干涉仪系统误差、球透镜引起的波前像差和噪声的组合, 即:

$$W_i = W_{INT} + W_{i,BALL}(\rho, \theta) + W_{BALLspherical}(\rho) + W_{i,noise}, \quad (25)$$

式中:  $W_{INT}$  为干涉仪系统误差,  $W_{i,BALL}(\rho, \theta)$  为球透镜的球形误差和不均匀性引起的误差,  $W_{BALLspherical}(\rho)$  为球透镜的固有球差,  $W_{i,noise}$  为随机误差。

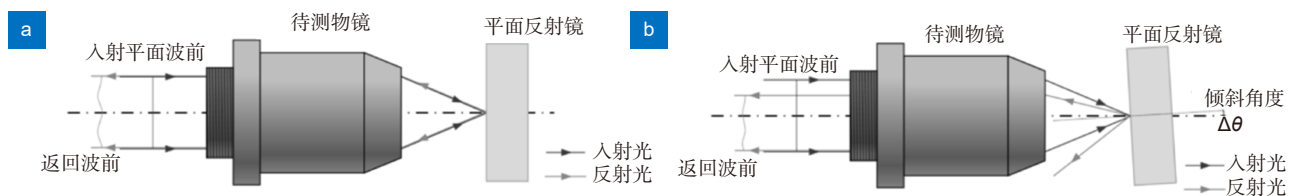


图 20 用平面镜测量物镜的波前像差<sup>[75]</sup>。(a) 没有倾斜; (b) 倾角  $\Delta\theta$ 。

Fig. 20 Wavefront aberration measurement of the objective lens using a plane mirror<sup>[75]</sup>. (a) Without tilt; (b) With tilt angle  $\Delta\theta$ .

表 1 物镜具体参数

Table 1 Objective lens specific parameters

物镜	NA	有效焦距/mm	入瞳直径	工作距离/mm
A	0.14	40	11.2 mm/373pixels	34
B	0.65	4.5	5.9 mm/197pixels	0.6
C	0.9	1.8	3.3 mm/110pixels	1.0

表 2 不同物镜测试结果的相对 RMS 误差

Table 2 Relative RMS error of different objective lenses test results

物镜	最大/%	最小/%	平均/%
A	18.6	8.5	13.9
B	21.4	8.9	16.4
C	23.3	13.7	19.7

根据随机球法绝对检测的思想,  $W_{i,BALL}$  和  $W_{i,noise}$  会被多次测量并平均后去除, 则干涉仪误差为

$$W_{INT} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_i) - W_{BALLspherical}(\rho). \quad (26)$$

如果球透镜是球面的、均匀的且以光轴为中心, 则它只会对测量波前产生球差。球透镜的固有球差是孔径、半径和折射率的函数, 可通过仿真来确定, 因此干涉仪的系统误差得以标定。

若球透镜、待测物镜的光轴未对准干涉仪的光轴, 将产生像散误差, 必须采取措施以保证检测精度, 一种方案是在分光镜上方安装辅助反射镜<sup>[77]</sup>。如图 21 所示, 辅助反射镜仅在球透镜和待测物镜安装对准时使用, 在实际测量中关闭。首先需确保球透镜(光圈)与干涉仪共光轴, 安装球镜并移除待测物镜, 在参考光束和通过球镜的光束之间获得干涉条纹, 调整安装位置, 直到倾斜最小时将球镜固定; 确保球透镜安装正确后, 再安装物镜, 以同样的方法调整, 使得待测物镜与干涉仪共光轴。实验中使用 NA 为 0.135 的球透镜, 随机旋转 65 次可以实现波像差的自标定波像差不确定度达到 50 mλ RMS。

#### 4.2 基于哈特曼法的波像差绝对检测技术

Nikon 团队将夏克-哈特曼法应用于光刻投影物镜的波像差绝对检测 (P-PMI), 使用微透镜阵列将待测波前划分为若干个子波, 在 CCD 上成像获取波前斜

率, 再用波前斜率重构整个波前, 从而计算出投影物镜的波像差<sup>[39]</sup>。微透镜阵列是系统误差的主要来源, 为提高检测精度, 使用标定针孔标定系统误差, 如图 22 所示<sup>[78]</sup>。

图 22(a) 为 P-PMI 的配置, 物面针孔的尺寸比标定针孔的尺寸小, 包含待测物镜波像差和系统误差信息的波前直接透过标定针孔, 探测器测定的像差为

$$W_{T1} = W_{PL} + W_{SH}, \quad (27)$$

其中:  $W_{PL}$  为待测物镜信息,  $W_{SH}$  为系统误差。

图 22(b) 为系统误差标定的配置, 物面针孔尺寸比标定针孔的尺寸大, 因而其成像也大于标定针孔, 此时探测器上的成像信息仅包含系统误差

$$W_{T2} = W_{SH}, \quad (28)$$

因此, 待测物镜的波像差为

$$W_{PL} = W_{T1} - W_{T2}. \quad (29)$$

P-PMI 有较好的重复性精度, 5 h 内进行两次测量的重复性精度达到 0.1 mλ RMS, 并且不同的传感器测量结果偏差仅为 0.6 mλ RMS, 同时, P-PMI 的检测精度较高, 可达到 19 mλ RMS<sup>[39]</sup>。在后续的研究中, Nikon 开发出有校准功能的集成投影光学测试仪 (iPot), 精度进一步提高, 可满足 50 nm 以下 L&S 图案的要求<sup>[78]</sup>。iPot 的精度已不满足先进的光刻物镜波像差检测要求, 并且未见关于 P-PMI 更多的后续研究报道。近年来, 其他研究者在夏克-哈特曼法的高

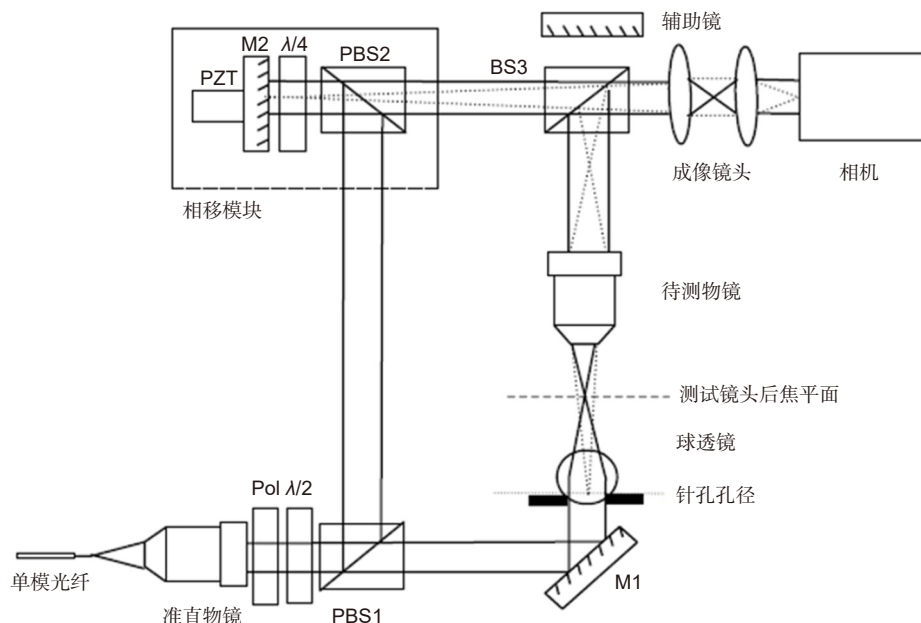
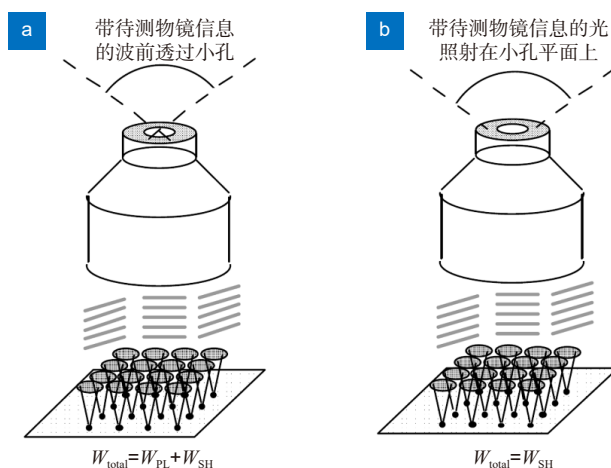


图 21 基于随机球法的绝对检测原理示意图<sup>[76]</sup>

Fig. 21 Schematic diagram of absolute detection principle based on random sphere method<sup>[76]</sup>

图 22 夏克-哈特曼波前测量自标定原理<sup>[76]</sup>Fig. 22 Principle of self-calibration of Shack-Hartmann wavefront measurement<sup>[76]</sup>

精度检测中取得了一些进展。传统的夏克-哈特曼法检测的是波前斜率，精度已不足以检测极紫外光刻 (EUV) 物镜的波像差。Li 等将相位恢复算法应用于夏克-哈特曼法中，改进后的波像差测量误差优于 1 mλ RMS，可满足 EUV 光刻物镜的波像差测量要求<sup>[79]</sup>。

### 4.3 基于剪切干涉的波像差绝对检测

光栅横向剪切干涉仪经典结构如图 23 所示，由上到下依次为针孔掩模、待测光刻物镜系统、光栅、滤波掩模、CCD 相机。针孔的作用与 PDI 相同，都是产生标准球面波前，光栅起到分光器的作用。无像差光波通过待测物镜后，携带像差信息，然后被光栅衍射。掩模放置于像平面上，其上有两个窗口，作为空间滤波器，只有±1 级衍射光能通过，包含 0 级和其他级的衍射光被掩模阻挡。带有光刻物镜系统波像差信息的±1 级衍射光在 CCD 平面上干涉成像。

对于典型光栅横向剪切干涉仪而言，系统误差主要有几何光程差、探测器倾斜误差、光栅倾斜误差、衍射误差等，在诸多的误差项中，最重要的是几何光程误差和探测器倾斜误差<sup>[81-82]</sup>。几何光程差随数值孔径 NA、衍射光汇聚点间距  $d$  的增加而增大，随剪切率的减小而增大<sup>[83]</sup>。若可计算不同衍射光汇聚点之间的距离和探测器倾斜角，则几何光程差和探测器倾斜引起的系统误差可以根据光线追踪确定<sup>[84]</sup>。

系统误差分为恒定系统误差和非恒定系统误差，恒定系统误差可以在两次测量中相减去除，非恒定误差在每次测量中都有变化，难以准确测量。通常来说，在总误差中，恒定系统误差占主要部分，非恒定误差往往比较小。绝对检测在光栅横向剪切中主要用来去

除恒定的系统误差，并且尽可能减小非恒定系统误差。下面将介绍几种基于剪切干涉的光刻物镜波像差绝对检测技术。

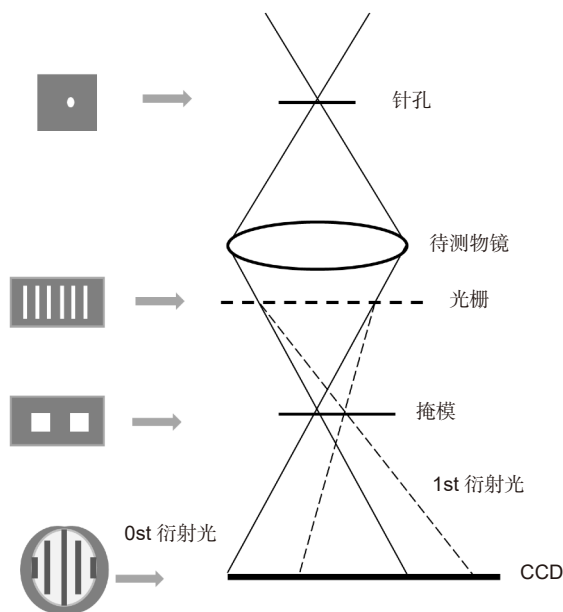
#### 4.3.1 旋转物镜法

光栅横向剪切的波像差测量一般采用旋转待测光刻物镜的方法<sup>[58,85-87]</sup>，通常有单次旋转法和多次旋转法两种测量方法<sup>[88]</sup>。使用单次旋转法时，因为最小误差的旋转角度由变分误差的差异决定，且难以预测，所以该方法精度不稳定。使用多次旋转平均法测量时，可以平均随机误差，但需要更多的旋转测量以获得必要的信息。此外，多次旋转平均法丢失的  $kN\theta$  信息还需使用其他手段补偿<sup>[57]</sup>。

应用旋转物镜法时，需要用到大的旋转平台测试不同位置的镜头波像差，旋转测试时要获取准确的旋转角度较为困难。现有的解决方法是用最小二乘法确定其真实方位角信息，以消除旋转不准确引起的测试误差<sup>[89-90]</sup>。同时，对于大型光学器件而言，旋转平台可能带来较大的偏心导致系统误差非恒定。Zhang 等<sup>[91]</sup>提出旋转误差免疫算法，该算法的旋转角度取决于非恒定系统误差的敏感度函数：

$$\frac{(e_n^m)^2 + (e_n^{-m})^2}{(v_n^m)^2 + (v_n^{-m})^2} = \frac{1}{2(1 - \cos(m\varphi))}. \quad (30)$$

当  $\cos(m\varphi)$  接近 1 时，误差敏感性很大，此时的旋转角为病理角；当  $\cos(m\varphi)$  接近 -1 时，误差敏感度最小，此时的旋转角度为最佳角度。病理角和最佳角完全由角阶数决定，当旋转角度为最佳角时，因旋转偏心导致的系统误差得以抑制。基于误差免疫算法，Zhang 等<sup>[91]</sup>提出三步平均法和以 45° 为基点的加权三

图 23 光栅横向剪切干涉仪经典结构<sup>[80]</sup>Fig. 23 Classical structure of grating transverse shearing interferometer<sup>[80]</sup>

步平均法。首先使用图像处理技术计算三个绕光轴旋转位置的系统误差，再取三个位置对应的系统误差的平均值作为系统误差，最后在测试结果中减去系统误差。2018年，研究人员又提出了一种新的两步误差免疫算法以标定系统误差，首先均匀测量8个旋转角度的数据，以确定具有最小偏心的原始位置，再根据非稳定系统误差的敏感度函数，选取偏心最小旋转角度测量，使非稳定系统误差得到抑制<sup>[92]</sup>。

旋转物镜法在不同旋转角度时的精度不稳定，适当的旋转角度可以有效减小因旋转偏心引起的非稳定系统误差。旋转物镜法结合误差免疫算法，可以得到很高的检测精度，旋转角度分别为90°、135°、180°时的精度见表3，可见误差免疫算法的精度仍随转动角度变化。在文献[92]中，以最小偏心角度为初始位置后再使用误差免疫算法，检测精度进一步提高(PV: 24 mλ; RMS: 2.5 mλ)，达到了亚纳米级别的精度。旋转物镜法可实现很高的检测精度，但算法比较复杂，对操作也有较高的要求。

表 3 不同旋转角度的检测精度

Table 3 Detection accuracy of different rotation angles

旋转角度/(°)	PV/mλ	RMS/mλ
90	29	3.2
135	42	7.7
180	57	12.3

#### 4.3.2 正负 Talbot 数法

光栅位于像面的不同位置时，Talbot 数满足以下公式：

$$\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z} = \frac{\lambda}{2Nd^2}, \quad (31)$$

其中： $Z_0$ 为光栅到像面的距离， $Z$ 为光栅到探测器平面的距离， $d$ 为直径。

待测物镜像差引起的干涉条纹畸变会随 Talbot 数变化而变化，但干涉仪系统误差导致的干涉条纹畸变不会因 Talbot 变化，因此可以将光栅安放在 Talbot 相反的位置来标定系统误差<sup>[93]</sup>，如图 24 所示。当光栅位于像面上方时，如图 25 所示，测到的像差为

$$W_{\text{up}} = W + \varepsilon, \quad (32)$$

式中： $W$ 为光刻物镜波像差， $\varepsilon$ 为系统误差。反转剪切方向，且光栅位于像面下方时，系统误差不会改变，而待测物镜引起的波像差会反向，因此测得的像差为

$$W_{\text{down}} = -W + \varepsilon. \quad (33)$$

可通过以上两式相减分离系统误差，最终光刻物镜的波像差为

$$W = \frac{W_{\text{up}} - W_{\text{down}}}{2}. \quad (34)$$

用正负 Talbot 数法测得的波像差具有超高的精度，文献[93]中给出其精度可达 7 mλ RMS (0.1 nm)，已达到 EUV 光刻物镜的检测要求。正负 Talbot 数法的



设备相对较少, 操作步骤较少, 且算法简单, 还可以原位检测, 具有较好的可实现性。

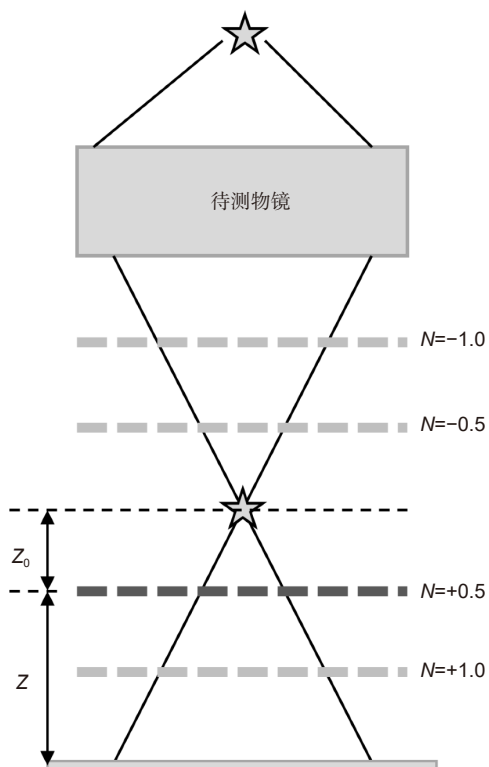


图 24 Talbot 数法示意图<sup>[93]</sup>  
Fig. 24 Schematic diagram of Talbot order method<sup>[93]</sup>

### 4.3.3 掩模标定法

常规的光栅剪切干涉测量如图 26(a) 所示, 采用相干光源照明, 光束经过待测物镜后被光栅衍射, 在探测器平面上干涉。干涉波前被探测器记录, 波前信

息包含待测物镜的波像差和干涉仪的系统误差:

$$T_1 = W_{\text{test}} + W_{\text{sys}} \quad (35)$$

掩模标定法原理如图 26 所示, 掩模放置于像面上, 用于分离系统误差。周期性的非相干光在通过标定掩模和光栅后, 在探测器平面产生干涉条纹, 探测器记录到的信息仅包含系统误差:

$$T_2 = W_{\text{sys}} \quad (36)$$

因此, 待测光刻物镜的波像差为

$$W = T_1 - T_2 \quad (37)$$

标定掩模法的检测精度与正负 Talbot 数法相当, 但低于旋转物镜法。文献 [93] 中给出的精度达 7 mλ RMS (0.1 nm), 可进行 EUV 光刻物镜的绝对检测。相对于旋转物镜法, 标定掩模法的操作更方便, 算法也更简单, 且可进行原位检测, 是较理想的光刻物镜波像差检测方法。

Canon 公司使用 Talbot 干涉仪对旋转物镜法、正负 Talbot 数法和掩模标定法进行了实验对比, 三种标定方法的波像差标定结果优于 22 mλ RMS (0.3 nm), 正负 Talbot 数法与掩模标定法的波像差残差为 17 mλ RMS (0.23 nm), 具体内容如图 27 所示<sup>[93]</sup>。

### 4.4 基于点衍射的波像差绝对检测

2007 年, Zhu 等<sup>[94]</sup>首次报道了用点衍射干涉仪对光刻物镜的绝对检测方法。该方法需要测量两次, 如图 28 所示, 首先使用带有针孔-窗口掩模的常规 PDI 测量包含干涉仪系统误差和物镜像差的波前信息, 包含了通过一个窗口后的物镜真实波像与第一个针孔

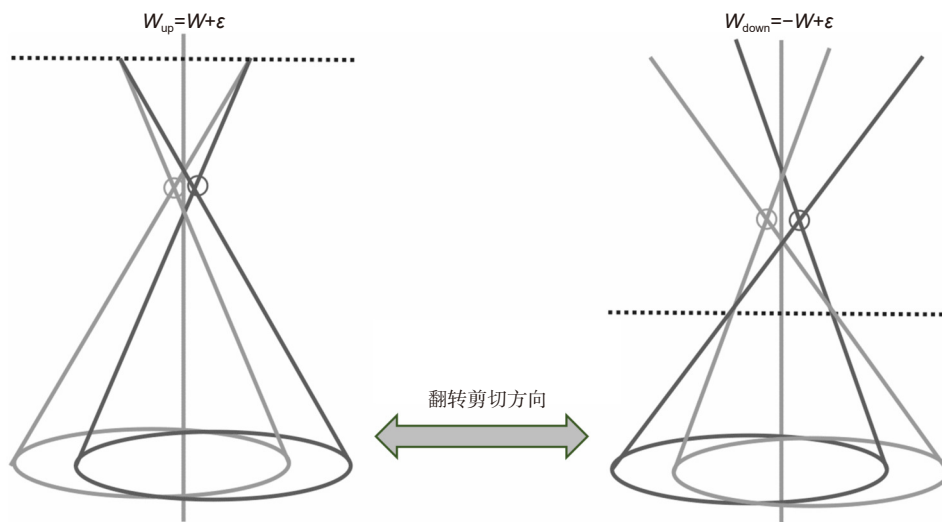


图 25 Talbot 数法标定系统误差示意图<sup>[93]</sup>  
Fig. 25 Schematic diagram of system error calibration by Talbot number method<sup>[93]</sup>

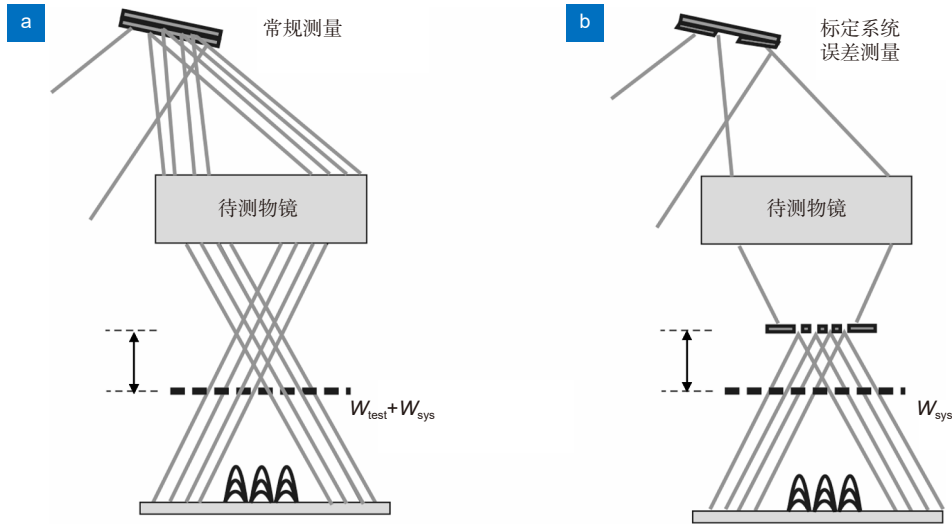


图 26 标定掩模法示意图<sup>[93]</sup>

Fig. 26 Schematic diagram of calibration mask method<sup>[93]</sup>

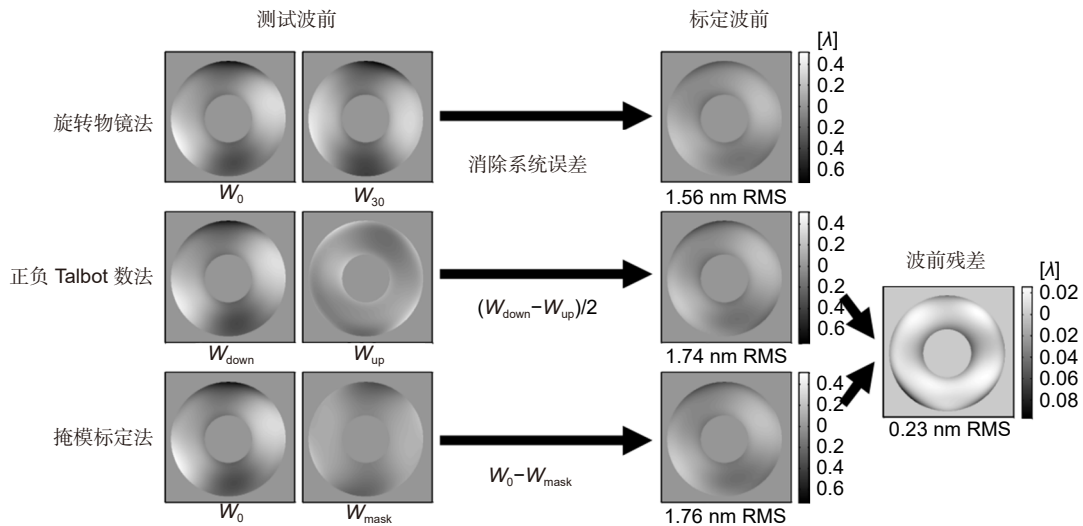


图 27 三种标定方法的实验结果<sup>[93]</sup>

Fig. 27 Experimental results of three calibration methods<sup>[93]</sup>

产生球差之和、系统误差和第二个针孔产生球差。

$$T_1 = (W_{T1} + W_{R1}) + W_{sys1} - W_{R0} \quad (38)$$

再在相同的条件下，将 PDI 中的针孔-窗口掩模换成窗口-窗口掩模，进行相同的测量，其波前信息包含了通过一个窗口后的物镜真实波像与由针孔产生球差之和、系统误差以及通过另一个窗口后的物镜真实波像与第一个针孔产生球差之和。

$$T_2 = (W_{T1} + W_{R1}) + W_{sys1} - (W_{T0} + W_{R0}) \quad (39)$$

式 (38) 和式 (39) 相减，干涉仪系统误差被去除，即可得出待测物镜的真实波面：

$$W_3 = T_1 - T_2 = W_{T0} \quad (40)$$

相移点衍射干涉仪 (PS/PDI) 主要的系统误差来源为测试波和参考波的横向错位和探测器倾斜<sup>[95]</sup>，经过公式推导，发现测试波和参考波的横向错位不仅引入线性载波 Z1，还引入了系统的几何彗差 Z6；探测器倾斜不仅引入离焦 Z3，还引入了像散 Z4 和 Z5。因几何彗差和像散都具备随着二元光栅栅线方向旋转的特性，刘克等<sup>[95]</sup> 提出利用旋转光栅法标定 PS/PDI 检测的系统误差。如图 29 所示，使光栅在正交的两个方向上移动并测量相应的波前，利用泽尼克多项式在单位圆内的正交性和奇偶对称性，标定 PS/PDI 系统的几何彗差和探测器倾斜引起的像散。

1996 年，Sommargren<sup>[96]</sup> 首次实现了光纤点衍射

干涉仪, 使用光纤得到了理想的点衍射球面波。但单模光纤纤芯的直径仅为  $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ , 无法测量大数值孔径的光刻物镜波像差。2010年, Matsuura 等<sup>[97]</sup>开发了一种带有两条光纤的移相点衍射干涉仪, 用于大孔径透镜波像差的测量。与针孔式点衍射干涉仪相比, 光纤点衍射干涉仪使用光纤代替第一个掩模的针孔, 可独立控制参考波和测试波的光强, 因而能获得更高的干涉对比度。

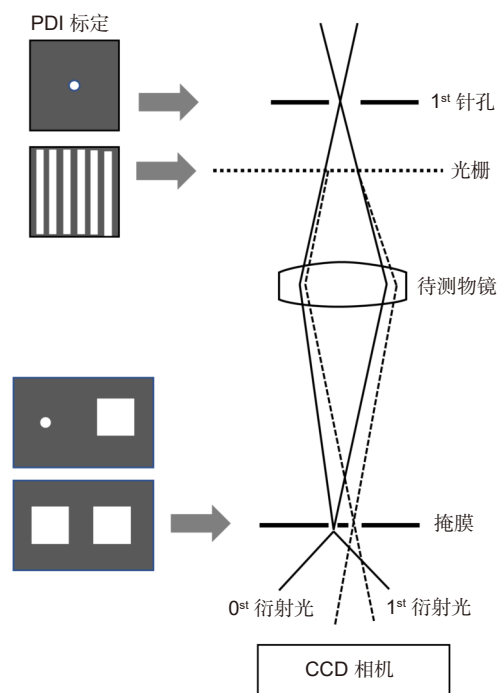


图 28 基于点衍射法的绝对检测<sup>[94]</sup>  
Fig. 28 Absolute detection based on spot diffraction<sup>[94]</sup>

点衍射干涉仪根据衍射的原理产生几乎理想的球面波前, 减小了系统误差的影响, 可实现亚纳米级的检测精度<sup>[98]</sup>。中国科学院上海光机所王向朝团队<sup>[99]</sup>提出了一种基于光纤点衍射测量技术的绝对检测方法, 如图 30 所示, 两个光纤的端面分别在物面的不同位

置入射, 产生两个无像差的球形波面, 其中一个为测量波面, 另一个为参考波面, 两个光波通过待测光刻物镜后到达掩模上。若其中一束光波通过掩模上的针孔, 另一束光波通过窗口, 形成点衍射模式; 若两束光波都通过窗口, 则形成系统误差测量模式。点衍射模式下, 测量结果包含由测量光束和点衍射光束之间的几何光路误差、光纤误差和针孔误差引起的系统误差。在系统误差测量模式下, 测量结果包含几何光路误差、两个光纤误差和针孔误差引起的系统误差。通过 FDTD 算法模拟计算出光纤误差和针孔误差, 因此, 被测光学器件的波前像差可以通过取两个测量结果之间的差值来精确获得。标定系统误差后精度进一步提高, 达到  $0.45\ \text{m}\lambda\ \text{RMS}$ 。

## 5 总结与展望

光刻机是芯片制造中不可或缺的设备, 其发展凝聚了各行业的顶尖技术。作为光刻机最核心的部件之一, 光刻物镜是影响光刻成像质量的主要因素。随着芯片制程的不断减小, 对光刻物镜的成像分辨率要求越来越高。波像差检测不仅能反映光刻物镜的成像质量, 还对光刻物镜的装调提供了指导意义。检测仪器自带的系统误差和环境带来的随机误差限制了波像差检测精度的提升, 通过绝对检测的方法将误差从测量数据中分离是提升检测精度的关键。

本文首先介绍了经典的光刻物镜波像差检测技术: 传统干涉法、哈特曼法、剪切干涉法和点衍射法。传统干涉法检测的是参考波前和待测波前之间的干涉图像, 因此检测精度受到参考镜的影响。哈特曼法可同时获得波前的强度信息和相位信息, 对光源相干性要求不高, 成本较低, 缺点是空间分辨率较低, 在不改变微透镜阵列时灵敏度不可调。剪切干涉法不需要参考波前, 检测精度不受参考镜的影响, 但成本相对较

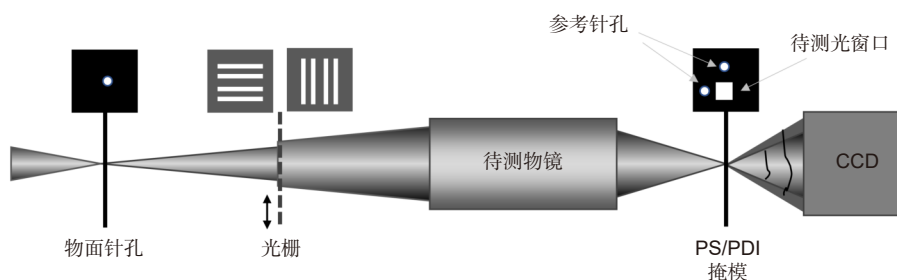


图 29 旋转光栅法标定 PS/PDI 检测的系统误差<sup>[95]</sup>  
Fig. 29 System error calibration of PS/PDI detection by rotating grating method<sup>[95]</sup>

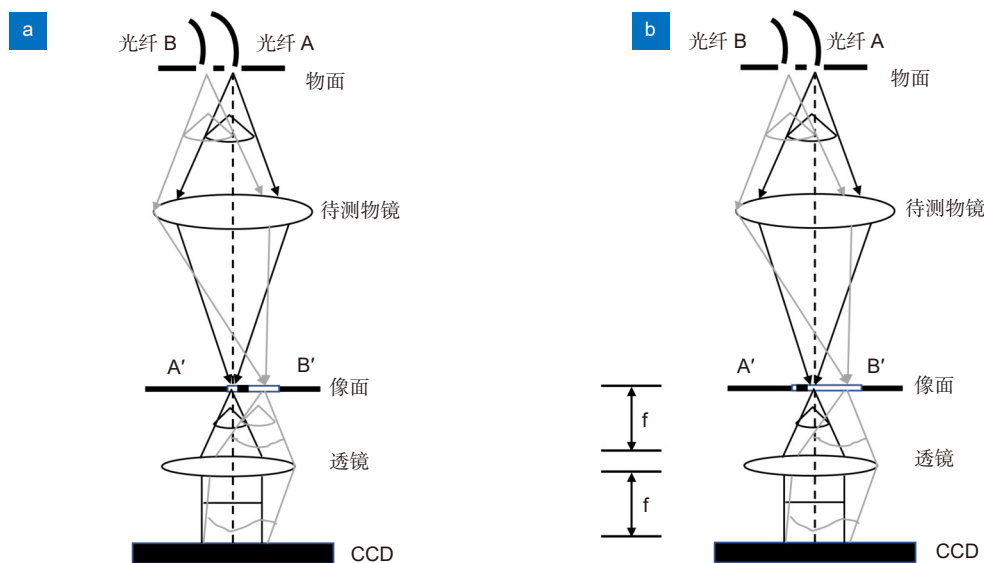


图 30 基于光纤点衍射测量技术的绝对检测<sup>[99]</sup>

Fig. 30 Absolute detection based on optical fiber point diffraction measurement technology<sup>[99]</sup>

高。点衍射法通过衍射产生球面波之间的干涉图还原波像差，理论上具有很高的精度，然而随着针孔尺寸的缩小，很难获得较为理想的波前。经典的光刻物镜波像差检测技术已无法满足如今高精度光刻机的物镜波像差检测要求，目前在用的检测手段大都是在此基础上的改进技术，但鲜有公开。

本文还介绍了适用于球面镜的绝对检测方法，即三球面法、双球面法、旋转平移法、旋转平均法和随机球法。三球面法是从三平面法发展而来，每次测量只能得到一条线上的面形，需要旋转多个角度才能测得一个完整的面性，双球面法测量步骤简单，但猫眼位置的测量容易产生像散和球面误差。旋转平移法分别通过旋转和平移消除旋转对称误差和非旋转对称误差，精度较高且操作简单，但只有待测镜可同时旋转和平移时才能使用。旋转平均法常用于透射波前的检测，但只有在共光轴的情况下才能使用。随机球法通

过多次随机测量和平均算法获得参考误差，操作简单但测量次数较多。这些绝对检测方法的对象多为单个镜片或简单组合镜头，通过不同的手段消除或抑制系统误差，显著提高了检测精度。光刻物镜是非常复杂的光学系统，由许多镜片组合而成，先进的物镜系统甚至采用了离轴设计，因此这些绝对检测方法通常不能直接用于光刻物镜的波像差检测。经典的绝对检测方法的误差消除思想可用于光刻物镜的检测中，将绝对检测思想与传统波像差检测技术相结合，有望发展成高精度的光刻物镜绝对检测技术。

使用绝对检测技术后，光刻物镜波像差检测精度提升明显，表 4 给出了这些技术各自的特点和适用性。基于传统干涉仪的波像差绝对检测精度较低，在光刻线宽越来越窄的趋势下，已不能满足先进光刻机物镜波像差检测的要求。基于哈特曼法的绝对检测技术的精度较低，但该技术提出的时间较早，目前未见该

表 4 四种不同光刻物镜波像差绝对检测对比

Table 4 Comparison of absolute detection of wave aberration of four different lithography objectives

		采集图像数量	可实现性	精度
传统干涉法	双球面法	少	一般	一般
	随机球法	多	复杂	低
基于哈特曼法的绝对检测		少	简单	一般
光栅横向剪切	旋转物镜法	较多	一般	较高
	Talbot数法	少	简单	高
	掩模标定法	少	复杂	高
基于点衍射的绝对检测		少	复杂	高

方向新的进展, 有进一步提高精度的空间。基于剪切干涉的旋转物镜法经过众多学者的发展, 结合误差免疫算法, 检测精度很高, 可满足 EUV 光刻物镜波像差检测要求。基于剪切干涉的正负 Talbot 数法和掩模标定法也可进行 EUV 光刻物镜波像差检测, 精度低于旋转物镜法, 但操作和算法更简单。基于点衍射干涉的波像差绝对检测技术的检测精度最高, 使用双光纤的相移点衍射干涉仪的波像差检测精度可达 0.14 mλ。目前最先进的光刻机采用的是极紫外光, 其光刻投影物镜通常由多个离轴反射镜组成, 无论是离线检测还是原位检测都不能使用旋转物镜的方法来标定误差, 因此基于传统干涉仪的绝对检测技术和基于光栅剪切的旋转物镜绝对检测技术不能用于离轴反射式光刻物镜的波像差检测。

EUV 光刻机的唯一制造商 ASML 公司目前正在研制下一代高数值孔径 EUV 光刻机 (High-NA EUV), High-NA EUV 面临着众多技术挑战, 以致于其交付时间一再延期。其中最大的技术挑战之一就是超高精度波像差检测技术。波像差绝对检测除了上述提到的技术难点外, 数值孔径的增加进一步对波像差检测带来极大挑战。此时, 传统绝对检测技术已难以胜任, 结合绝对检测技术, 设计一套基于模型的波像差绝对检测方法是一种解决方案, 同时这也是下一代光刻物镜波像差绝对检测技术的未来发展趋势和重要研究方向。

## 参考文献

- [1] Yao M H, Hu S, Xing T W. *Optical Projection Exposure Micro-Nano Processing Technology*[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006.  
姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006.
- [2] De Boeij W P, Pieterella R, Bouchoms I, et al. Extending immersion lithography down to 1x nm production nodes[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8683**: 86831L.
- [3] Quan H Y. Uncertainty evaluation for interferometric testing of absolute surface figure error[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [4] Poultney S K. Methods for measuring a wavefront of an optical system: 7602503[P]. 2009-10-13.
- [5] Latypov A, Poultney S K, Vladimirov Y. Method and system for wavefront measurements of an optical system: 7768653[P]. 2010-08-03.
- [6] Sugisaki K, Okada M, Otaki K, et al. EUV wavefront measurement of six-mirror optics using EWMS[J]. *Proc SPIE*, 2008, **6921**: 69212U.
- [7] Ohsaki Y, Mori T, Koga S, et al. A new on-machine measurement system to measure wavefront aberrations of projection optics with hyper-NA[J]. *Proc SPIE*, 2006, **6154**: 615424.
- [8] Polo A, Bociort F, Pereira S F, et al. Wavefront measurement for EUV lithography system through Hartmann sensor[J]. *Proc SPIE*, 2011, **7971**: 79712R.
- [9] Zhu Y C, Odate S, Sugaya A, et al. Method for designing phase-calculation algorithms for two-dimensional grating phase-shifting interferometry[J]. *Appl Opt*, 2011, **50**(18): 2815-2822.
- [10] Krasin G, Stsepuro N, Gritsenko I, et al. Holographic method for precise measurement of wavefront aberrations[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11774**: 1177407.
- [11] Bautsch J, Schake M, Ehret G, et al. Traceable calibration of Shack-Hartmann wavefront sensors employing spherical wavefronts[J]. *Opt Eng*, 2020, **59**(8): 084104.
- [12] Dubey N, Kumar R, Rosen J. COACH-based Shack-Hartmann wavefront sensor with an array of phase coded masks[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(20): 31859-31874.
- [13] Fuerst M E, Csencsics E, Berlakovich N, et al. Automated measurement of highly divergent optical wavefronts with a scanning shack-hartmann sensor[J]. *IEEE Trans Instrument Measur*, 2020, **70**: 7001909.
- [14] Zhu B E, Wang X Z, Li S K, et al. High-order aberration measurement method for hyper-NA lithographic projection lens[J]. *Acta Opt Sin*, 2017, **37**(4): 0412003.  
诸波尔, 王向朝, 李思坤, 等. 超高NA光刻投影物镜高阶波像差检测方法[J]. *光学学报*, 2017, **37**(4): 0412003.
- [15] Li P, Tang F, Wang X Z. Relationship between shear ratio and reconstruction accuracy in lateral shearing interferometry[J]. *Opt Eng*, 2020, **59**(3): 034113.
- [16] Yang J S, Wang X Z, Li S K, et al. *In situ* aberration measurement method based on a phase-shift rings target[J]. *Acta Opt Sin*, 2014, **34**(2): 0211004.  
杨济硕, 王向朝, 李思坤, 等. 基于相位环空间像主成分分析的投影物镜波像差检测方法[J]. *光学学报*, 2014, **34**(2): 0211004.
- [17] Li P, Tang F, Wang X Z. FFT wavefront reconstruction algorithm with periodical extension for lateral shearing interferometry[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11552**: 1155203.
- [18] Li P, Tang F, Wang X Z. Comparison of processing speed of typical wavefront reconstruction methods for lateral shearing interferometry[J]. *Appl Opt*, 2020, **60**(2): 312-325.
- [19] Peng C Z, Tang F, Wang X Z, et al. Calibration method of shear amount based on the optical layout of point source microscope for lateral shearing interferometric wavefront sensor[J]. *Opt Eng*, 2020, **59**(9): 094106.
- [20] Zhao L. Imaging performance compensation strategy and compensation technology of lithography lens[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.  
赵磊. 投影光刻物镜像质补偿策略与补偿技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2017.
- [21] Fang C. Research on lateral shearing interferometry in measurement of wavefront aberration of lithography lens[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.  
方超. 光刻物镜系统波像差横向剪切干涉测量研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [22] Fang C, Xiang Y, Qi K Q. Grating lateral shearing interferometry for suppressing zero-order crosstalk[J]. *Chin J Lasers*, 2018, **45**(5): 0504002.  
方超, 向阳, 齐克奇. 抑制零级串扰的光栅横向剪切干涉测量[J]. *中国激光*, 2018, **45**(5): 0504002.

- [23] Chao F, Yang X, Qi K Q. A general method of designing phase-shifting algorithms for grating lateral shearing interferometry[J]. *Front Inform Technol Electron Eng*, 2018, **19**(6): 809–814.
- [24] Gu H, Zhao Z Y, Zhang Z G, et al. High-precision wavefront reconstruction from Shack-Hartmann wavefront sensor data by a deep convolutional neural network[J]. *Measur Sci Technol*, 2021, **32**(8): 085101.
- [25] Hu S W, Hu L J, Gong W, et al. Deep learning based wavefront sensor for complex wavefront detection in adaptive optical microscopes[J]. *Front Inform Technol Electron Eng*, 2021, **22**(10): 1277–1288.
- [26] Quan H Y, Hou X, Wu F, et al. Absolute measurement of optical flats based on basic iterative methods[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(12): 16305–16319.
- [27] Zhang S, Quan H Y, Hou X, et al. Absolute testing of planarity and inhomogeneity with modified six-step method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(7): 210047.  
张帅, 全海洋, 侯溪, 等. 基于改进六步翻转法的平行平板面形及均匀性绝对检测方法[J]. *光电工程*, 2021, **48**(7): 210047.
- [28] Hou X, Zhang S, Hu X C, et al. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(8): 200209.  
侯溪, 张帅, 胡小川, 等. 超高精度面形干涉检测技术进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 200209.
- [29] Neal R M, Wyant J C. Polarization phase-shifting point-diffraction interferometer[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(15): 3463–3476.
- [30] Bueno J M, Acosta E, Schwarz C, et al. Wavefront measurements of phase plates combining a point-diffraction interferometer and a Hartmann-Shack sensor[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(3): 450–456.
- [31] Zhou X, Guo R H, Zhu W H, et al. Dynamic wavefront measurement with a pinhole linear polarizer point-diffraction interferometer[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(29): 8040–8047.
- [32] Yu C S, Xiang Y. Research progress of pinhole mask technique of point diffraction interferometer[J]. *Laser Optoelectr Progr*, 2013, **50**(3): 030004.  
于长淦, 向阳. 点衍射干涉仪小孔掩模技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(3): 030004.
- [33] Sun Y, Shen H, Li X, et al. Wavelength-tuning point diffraction interferometer resisting inconsistent light intensity and environmental vibration: application to high-precision measurement of a large-aperture spherical surface[J]. *Appl Opt*, 2019, **58**(5): 1253–1260.
- [34] Xu W C. Optical design and imaging performance compensation for the lithographic lens[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.  
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计与像质补偿[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2011.
- [35] Dirksen P, Braat J J M, Janssen A J E M, et al. Aerial image based lens metrology for wafer steppers[J]. *Proc SPIE*, 2006, **6154**: 61540X.
- [36] Hartmann J. Bemerkungen über den bau und die justirung von spektrographen[J]. *Zt Instrumentenk*, 1900, **20**: 47.
- [37] Shack P, Platt B. Production and use of a Lenticular hartmann screen[J]. *J Opt Soc Am*, 1971, **61**(5): 656–661.
- [38] Campbell H I, Greenaway A H. Wavefront sensing: from historical roots to the State-of-the-Art[J]. *Eas Publicat Ser*, 2006, **22**: 165–185.
- [39] Fujii T, Kougo J, Mizuno Y, et al. Portable phase measuring interferometer using Shack-Hartmann method[J]. *Proc SPIE*, 2003, **5038**: 726–732.
- [40] Schreiber H, Bruning J H. Phase shifting interferometry[M]// Malacara D. *Optical Shop Testing*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [41] Chen X J. Study on the influence of intensity distribution on wavefront reconstruction by quadri-wave lateral shearing interferometers[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.  
陈小君. 近场光强分布对四波横向剪切干涉波前复原的影响研究[D]. 成都: 中国科学院大学, 2019.
- [42] Van De Kerkhof M, Jan Voogd R, Schasfoort A, et al. Diffuser concepts for in-situ wavefront measurements of EUV projection optics[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10583**: 105830S.
- [43] Linnik V P. Simple interferometer for the investigation of optical systems[J]. *Proc Acad Sci USSR*, 1933, **1**: 208–210.
- [44] Smart R N, Strong J. Point-diffraction interferometer[J]. *Opt J Soc Am*, 1972, **62**: 737.
- [45] Medeck H, Tejni E, Goldberg K A, et al. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(19): 1526–1528.
- [46] Li Y, Yang Y Y, Wang C, et al. Point diffraction in terference detection technology[J]. *Chin Opt*, 2017, **10**(4): 391–414.  
李瑶, 杨甬英, 王晨, 等. 点衍射干涉检测技术[J]. *中国光学*, 2017, **10**(4): 391–414.
- [47] Yang Y Y, Ling T. *Novel Common-Path Interferometers*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2020.  
杨甬英, 凌瞳. 新型共路干涉仪[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2020.
- [48] Freischlad K R. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(10): 1637–1648.
- [49] Schulz G, Schwider J. IV interferometric testing of smooth surfaces[J]. *Progr Opt*, 1976, **13**: 93–167.
- [50] Schulz G, Schwider J, Hiller C, et al. Establishing an optical flatness standard[J]. *Appl Opt*, 1971, **10**(4): 929–934.
- [51] Harris J S. The universal Fizeau interferometer[D]. Reading: University of Reading, 1971.
- [52] Jensen A E. Absolute calibration method for laser Twyman-Green wave front testing interferometers[J]. *Opt J Soc Am*, 1973, **63**: 1313A.
- [53] Selberg L A. Absolute testing of spherical surfaces[J]. *Opt Fabricat Test OSA Techn Digest Ser*, 1994, **13**: 181–184.
- [54] Bloemhof E E. Absolute surface metrology by differencing spatially shifted maps from a phase-shifting interferometer[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**(14): 2346–2348.
- [55] Soons J A, Griesmann U. Absolute interferometric tests of spherical surfaces based on rotational and translational shears[J]. *Proc SPIE*, 2012, **8493**: 84930G.
- [56] Su D Q, Miao E L, Sui Y X, et al. Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(15): 3198–3200.
- [57] Wang W B, Liu P F, Xing Y L, et al. Error correction for rotationally asymmetric surface deviation testing based on rotational shears[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(26): 7428–7433.
- [58] Wang W B, Zhang M Q, Yan S W, et al. Absolute spherical surface metrology by differencing rotation maps[J]. *Appl Opt*, 2015, **54**(20): 6186–6189.
- [59] Keenan P B. Pseudo-shear interferometry[J]. *Proc SPIE*, 1983, **429**: 2–7.

- [60] Quan H Y, Hou X, Wu G F, et al. Absolute interferometric testing of an ultra-precise flat substrate with a liquid mirror[J]. *Proc SPIE*, 2019, **11032**: 110320J.
- [61] Song W H, Hou X, Wu F, et al. Experimental study on absolute measurement of spherical surfaces with shift-rotation method based on Zernike polynomials[J]. *Proc SPIE*, 2015, **9446**: 94463F.
- [62] Song W H, Hou X, Wu F, et al. Absolute interferometric shift-rotation method with pixel-level spatial frequency resolution[J]. *Opt Lasers Eng*, 2014, **54**: 68–72.
- [63] Song W H, Li S F, Hou X, et al. Absolute calibration for Fizeau interferometer with the global optimized shift-rotation method[J]. *Opt Lasers Eng*, 2014, **54**: 49–54.
- [64] Song W H, Wu F, Hou X, et al. Optimized absolute testing method of shift-rotation[J]. *Appl Opt*, 2013, **52**(28): 7028–7032.
- [65] Yan F T, Fan B, Hou X, et al. Absolute subaperture testing by multiangle averaging and Zernike polynomial fitting method[J]. *Opt Eng*, 2013, **52**(8): 085101.
- [66] Song W H, Wu F, Hou X, et al. Absolute measurement of flats with the method of shift-rotation[J]. *Opt Rev*, 2013, **20**(5): 374–377.
- [67] Song W H, Wu F, Hou X, et al. Absolute calibration of a spherical reference surface for a Fizeau interferometer with the shift-rotation method of iterative algorithm[J]. *Opt Eng*, 2013, **52**(3): 033601.
- [68] Song W H, Wu F, Hou X. Experimental study on absolute test of spherical surfaces with shift-rotation method[J]. *Proc SPIE*, 2012, **8417**: 84172A.
- [69] Evans C J, Kestner R N. Test optics error removal[J]. *Appl Opt*, 1996, **35**(7): 1015–1021.
- [70] Zhang Y W. Research on rotational absolute testing of the optical surface[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.  
张艳微. 光学面形的旋转绝对检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2014.
- [71] Creath K, Wyant J C. Absolute measurement of surface roughness[J]. *Appl Opt*, 1990, **29**(26): 3823–3827.
- [72] Griesmann U, Wang Q D, Soons J, et al. A simple ball averager for reference sphere calibrations[J]. *Proc SPIE*, 2005, **5869**: 58690S.
- [73] Ma H. Absolute detection method of wavefront error of spherical lens[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2014.  
马骅. 球面透镜波前误差的绝对检测方法[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2014.
- [74] Su D Q, Miao E L, Qu Y, et al. Absolute testing of interferometer wavefront using cat's-eye test[J]. *Chin J Lasers*, 2015, **42**(12): 1208002.  
苏东奇, 苗二龙, 曲艺, 等. 猫眼法绝对测量干涉仪出射波前[J]. *中国激光*, 2015, **42**(12): 1208002.
- [75] Li P, Tang F, Wang X Z, et al. High NA objective lens wavefront aberration measurement using a cat-eye retroreflector and Zernike polynomial[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(20): 31812–31835.
- [76] Bergner B C, Davies A. Self-calibration for transmitted wavefront measurements[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(1): 18–24.
- [77] Bergner B C, Davies A. Self-calibration technique for transmitted wavefront measurements[J]. *Proc SPIE*, 2003, **5180**: 236–243.
- [78] Fujii T, Suzuki K, Mizuno Y, et al. Integrated projecting optics tester for inspection of immersion ArF scanner[J]. *Proc SPIE*, 2006, **6152**: 615237.
- [79] Li J, Gong Y, Chen H F, et al. Wave-front reconstruction with Hartmann–Shack sensor using a phase-retrieval method[J]. *Opt Commun*, 2015, **336**: 127–133.
- [80] Miyakawa R H. Wavefront metrology for High Resolution optical systems[D]. Berkeley: University of California, 2011.
- [81] Goldberg K A. Extreme ultraviolet interferometry[D]. Berkeley: University of California, 1997.
- [82] Li J, Wang X C, Tang F, et al. Systematic error elimination method for wave aberration detection by grating shear interferometer: CN103674493A[P]. 2014-03-26.  
李杰, 王向朝, 唐锋, 等. 光栅剪切干涉仪波像差检测的系统误差的消除方法: CN103674493A[P]. 2014-03-26.
- [83] Li J, Tang F, Wang X C, et al. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. *Chin J Lasers*, 2014, **41**(5): 0508006.  
李杰, 唐锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. *中国激光*, 2014, **41**(5): 0508006.
- [84] Li J, Tang F, Wang X Z, et al. Calibration of system errors in lateral shearing interferometer for EUV-wavefront metrology[J]. *Proc SPIE*, 2015, **9422**: 942220.
- [85] Creath K, Wyant J C. Testing spherical surfaces: A fast, quasi-absolute technique[J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(22): 4350–4354.
- [86] Parks R E. Removal of test optics errors[J]. *Proc SPIE*, 1978, **153**: 56–63.
- [87] Song W H, Wu F, Hou X. Method to test rotationally asymmetric surface deviation with high accuracy[J]. *Appl Opt*, 2012, **51**(22): 5567–5572.
- [88] Song W H, Xi H, Fan W, et al. Comparative analysis of absolute methods to test rotationally asymmetric surface deviation[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8789**: 87890Z.
- [89] Kim S W, Rhee H G. Self-calibration of high frequency errors of test optics by arbitrary N-step rotation[J]. *Int J Precis Eng Manufact*, 2000, **1**(2): 115–123.
- [90] Rhee H G, Lee Y W, Kim S W. Azimuthal position error correction algorithm for absolute test of large optical surfaces[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(20): 9169–9177.
- [91] Zhang Y W, Su D Q, Li L, et al. Error-immune algorithm for absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation[J]. *J Opt Soc Korea*, 2014, **18**(4): 335–340.
- [92] Zhang L, Qi K Q, Xiang Y. Two-step algorithm for removing the rotationally asymmetric systemic errors on grating lateral shearing interferometer[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(11): 14267–14277.
- [93] Otaki K, Kohara N, Sugisaki K, et al. Ultra high-precision wavefront metrology using EUV low brightness source[M]// Osten W. Fringe 2013. Berlin: Springer, 2014: 385–392.
- [94] Zhu Y C, Sugisaki K, Okada M, et al. Wavefront measurement interferometry at the operational wavelength of extreme-ultraviolet lithography[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(27): 6783–6792.
- [95] Liu K, Li Y Q. A new calibration method of systematic errors in phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Acta Opt Sin*, 2010, **30**(10): 2923–2927.  
刘克, 李艳秋. 一种新的相移点衍射干涉仪系统误差标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2923–2927.
- [96] Sommargren G E. Phase shifting diffraction interferometry for measuring extreme ultraviolet optics[R]. Boston, MA:

Lawrence Livermore National Laboratory, 1996.

- [97] Matsuura T, Udaka K, Oshikane Y, et al. Spherical concave mirror measurement by phase-shifting point diffraction interferometer with two optical fibers[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A Accelerat Spectro Detect Assoc Equip*, 2010, **616**(2-3): 233-236.
- [98] Yang Y Y. *Advanced Interferometry and Application*[M].

Hangzhou: Zhejiang University Press, 2017.

- 杨甬英. 先进干涉检测技术与应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2017.
- [99] Feng P, Tang F, Wang X Z, et al. Dual-fiber point diffraction interferometer to measure the wavefront aberration of an imaging system[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(10): 3093-3096.

## 作者简介



王青蓝 (1994-), 女, 在读硕士, 主要从事物镜系统波像差检测方面的研究。

E-mail: lively1231@163.com



【通信作者】胡松 (1965-), 男, 博士, 研究员, 四川省有突出贡献优秀专家, 四川省学术技术带头人后备人选, 博士导师, 国家专家库专家、国家 02 专项调研组和指南编写组专家、集成电路测试仪器与装备产业技术创新联盟专家咨询委专家。主要从事微细加工装备整机及关键技术研究。

E-mail: Husong@ioe.ac.cn



侯溪 (1980-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。首批中科院青年创新促进会会员, 中国光学学会光学测试专业委员会委员, 中国光学工程学会高级会员, 中国机械工程学会极端制造分会高级会员。超精密光学制造与检测团队负责人, 主持完成国家重大科技专项、国家 973 子课题、国家自然科学基金等项目 10 余项。主要从事超精密光学制造与检测技术研究和关键装备研制。

E-mail: houxi@ioe.ac.cn

## 团队介绍

中国科学院光电技术研究所微电子装备总体研究室成立于 1978 年。针对国家重大需求, 研究团队在各类光刻设备所涉及的照明技术、工件台技术、硅片台技术、紫外物镜、对准技术、检焦技术等多项关键领域展开了基础性研究和前沿探索。团队成立至今, 独立完成了国产 g 线投影光刻机、i 线投影光刻机等亚微米投影光刻机、非接触中心自动对准投影光刻机、超分辨光刻装备研制等多类新型光刻设备研发。同时, 研究团队获得国家自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年项目、四川省科技厅项目等二十余项项目资助, 并且在 *Optics Express*、*Optics Letter*、*Optics and Lasers in Engineering* 等国际期刊上发表 SCI 论文 100 余篇。

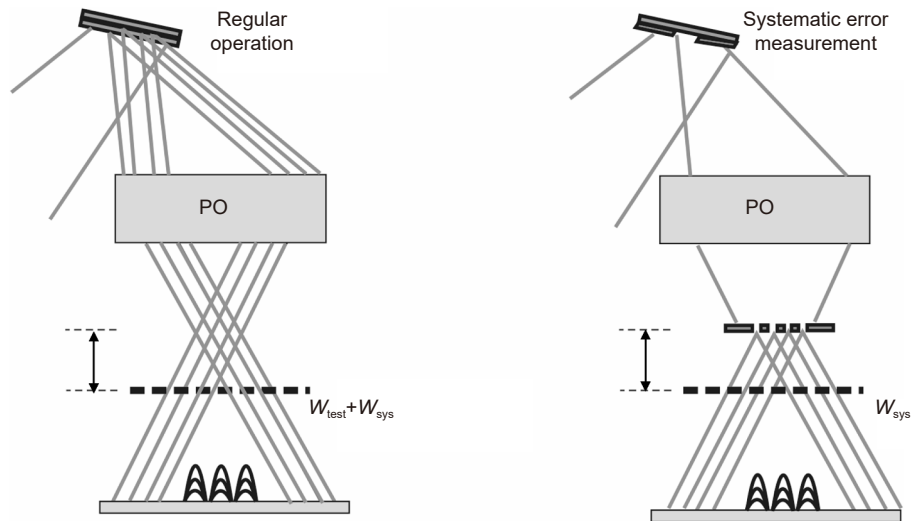


扫描二维码, 获取PDF全文



# Review of absolute measurement of wavefront aberration in lithography objective

Wang Qinglan<sup>1,2</sup>, Quan Haiyang<sup>1</sup>, Hu Song<sup>1\*</sup>, Liu Junbo<sup>1</sup>, Hou Xi<sup>1</sup>



Schematic diagram of calibration mask method

**Overview:** The lithography objective lens system is the core component of the lithography machine, and the detection is the last process in the manufacture of the lithography objective lens system. The detection content includes the surface shape detection of a single lens and the wave aberration detection of the entire lithography objective lens system. In order to detect the surface shape of each surface of the lens, the wavefront is usually detected. The wave aberration of the lithography objective is a comprehensive reflection of the errors of each lens. It is necessary to detect the transmitted wavefront through all the lenses, which is related to the final accuracy of the lithography machine. Accurately detecting the wave aberration of the lithography objective lens system is conducive to improving the lithography processing accuracy of the lithography machine, and also plays an indispensable role in the development and manufacture of the lithography objective lens. As the working light wave becomes smaller, the precision needs to be improved to sub-nanometer precision, which has higher requirements for the detection of the wave aberration of the lithography objective. ASML, Cannon and Nikon hold a lot of technical secrets for lithography machine manufacturing and inspection, as does high-precision wave aberration inspection technology. We cannot know the high-precision detection technology of wave aberration proprietary to these companies, but absolute detection technology is a method that can effectively improve detection accuracy. The detection accuracy of current lithography objective wave aberration detection methods (such as Hartmann method, shear interference method and point diffraction method, etc.) is often limited by its systematic errors. The system error is separated, the wave aberration detection accuracy is further improved, and the accuracy limit is finally broken. Different wave aberration detection techniques are suitable for different absolute detection methods, but some other systematic error calibration ideas can be tried to develop new absolute detection techniques for lithography objective lenses. This paper reviews the wave aberration detection method and surface absolute detection technology of lithography objective lens system, combs the application and research progress of absolute detection technology in wave aberration detection in detail, and summarizes the application of absolute detection technology in different wave aberration detection methods. At the same time, combined with these difficulties, the future development trend of the absolute detection technology of wave aberration of lithography objective lens is prospected.

Wang Q L, Quan H Y, Hu S, et al. Review of absolute measurement of wavefront aberration in lithography objective[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220001; DOI: 10.12086/oe.2023.220001

<sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

\* E-mail: Husong@ioe.ac.cn