



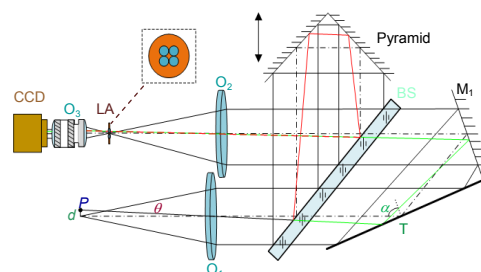
DOI: 10.12086/oe.2019.180516

变倾角移相斜入射动态干涉仪

刘致远¹, 陈磊^{1*}, 朱文华¹,
丁煜¹, 马云², 郑东晖¹

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学先进发射协同创新中心, 江苏 南京 210094



摘要: 为了快速获取不平整度达数微米量级的光学表面面形分布, 提出一种基于变倾角移相的斜入射动态干涉仪方案。基于迈克耳逊干涉仪主光路系统, 采用 2×2 点光源阵列, 通过精确控制各点光源在干涉腔的入射倾角, 引入等间隔移相, 结合透镜阵列实现空间分光, 在单个 CCD 上同时采集四幅移相干涉图, 实现动态测量。在 68° 斜入射角下测量了口径 35 mm 硅片的平整度, 均方根(RMS)值为 $1.631 \mu\text{m}$, 峰谷(PV)值为 $9.082 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 将变倾角同步移相技术引入斜入射干涉系统, 可以克服环境震动的干扰, 在保证高精度的前提下拓宽了可见光干涉仪的测量范围。

关键词: 干涉测量; 斜入射; 动态干涉仪; 表面平整度

中图分类号: O436

文献标志码: A

引用格式: 刘致远, 陈磊, 朱文华, 等. 变倾角移相斜入射动态干涉仪[J]. 光电工程, 2019, 46(8): 180516

Oblique incidence dynamic phase-shifting interferometer based on inclination angle deflection

Liu Zhiyuan¹, Chen Lei^{1*}, Zhu Wenhua¹, Ding Yu¹, Ma Yun², Zheng Donghui¹

¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²Advanced Launch Corporative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract: An oblique incidence dynamic phase-shifting interferometer based on inclination angle deflection is proposed to quickly obtain the surface distribution of optical surface with flatness of micron dimension. A 2×2 point source array is introduced into a Michelson interference system, and the incidence angle of each point source on the interferometer cavity is adjusted precisely to induce equal phase shift. Spatial separation is realized in combination with a lens array. The four phase-shifting interferograms are captured simultaneously on a single CCD, thereby realizing dynamic measurement. The flatness of a 35 mm aperture silicon wafer is measured at oblique incidence angle of 68° , the root mean square (RMS) is $1.631 \mu\text{m}$ and peak-to-valley (PV) is $9.082 \mu\text{m}$. The experimental results indicate that the proposed interferometer overcomes the disturbance of vibration environment and extends the measurement range of interferometer with high precision by introducing the simultaneous phase-shifting interferometry

收稿日期: 2018-10-09; 收到修改稿日期: 2019-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1731115)

作者简介: 刘致远(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: liuzhiyuan@njjust.edu.cn

通信作者: 陈磊(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn

based on inclination angle deflection into the oblique incidence interference system.

Keywords: interferometry; oblique incidence; dynamic interferometer; surface flatness

Citation: Liu Z Y, Chen L, Zhu W H, et al. Oblique incidence dynamic phase-shifting interferometer based on inclination angle deflection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(8): 180516

1 引言

平整度误差达数微米量级的表面,如硅晶圆、蓝宝石基片等,其面形变化超出了通用的斐索或泰曼-格林型干涉仪的测量范围;此外,这类光学元件通常较薄,测量时易受到环境震动的干扰,难以实现在线检测。针对上述问题,本文提出一种动态干涉测量方案,采用斜入射干涉方法拓展干涉仪的测量范围,通过变倾角同步移相干涉术克服环境震动的干扰,以期实现面形误差在 $10\ \mu\text{m}$ 量级的光学表面平整度的在线测量。

斜入射干涉方法包括自准直测量法、棱镜斜入射干涉法和光栅斜入射干涉法等^[1]。自准直测量法^[2]可以扩展干涉仪的测量口径,且易于在斐索干涉仪上实现,但测试光经待测面两次反射,只有在斜入射角大于 60° 时才能拓展测量范围;棱镜式斜入射干涉仪^[3]通过等腰棱镜传递掠入射的准直光至测试面,在其较短的干涉腔内会形成多光束干涉,增大了相位提取的难度;光栅斜入射干涉仪^[4]的特点是测量分辨率由光栅常数决定,其测试光接近掠入射,可测量粗糙面的面形。但该方法无法有效抑制其它级次的衍射光,对光能的利用率较低。

为了在震动或气流扰动等非稳环境下实现在线测量,研究者们已在动态检测方面做出重大努力。Szwaykowski 等人^[5]设计了一种同步移相模块,结合偏振移相器件,通过三个 CCD 同步抓拍三幅移相干涉图,该方案将参考镜倾斜一个角度,参考光和测试光不再共光路,引入了回程(retrace)误差;Millerd 等人^[6]提出一种基于微偏振阵列移相的泰曼型动态干涉仪专利技术,通过偏振移相器件实现同步移相,结合微偏振阵列实现空间分光,从 CCD 的单帧图像提取多幅干涉图。在上述同步移相干涉仪中,采用了偏振移相干涉方案,相关误差分析表明,干涉仪内部光学元件及待测件的应力偏差会影响测量结果^[7-8];朱文华等人^[9]提出了一种基于点源异位同步移相的动态斐索干涉仪,该方案基于斐索干涉仪主光路系统,采用正入射的干涉方法,其动态测量范围不适用于数微米量级的光学表面面形测量。

本文根据变倾角同步移相原理^[10],提出了一种斜入射动态干涉仪方案,适用于测量平整度误差在 $0.1\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 范围变化的光学表面。采用位相光栅产生等光强点光源阵列,精确控制各点光源在干涉腔的入射倾角,结合特定的空间分光成像系统,由单个 CCD 同时采集四幅等间隔移相的干涉图,实现动态测量。此外,通过轴向调节 90° 角镜改变干涉腔长,并调节参考光路中反射镜角度改变斜入射角,可以调节测量灵敏度,以适应不同待测件的测量。

2 理论推导

2.1 变倾角移相干涉原理

斜入射干涉仪的光路结构如图 1 所示^[11],点光源 P 经过物镜 O_1 形成准直光束,由分光镜 BS 分为两束,其中透射光进入测试光路,以 α 角斜入射到待测面 T ,经反射镜 M_1 反射至分光板 BS;由 BS 反射的光束进入参考光路,经 90° 角镜反射在分光镜处与测试光合束,形成相干光束,而后经成像物镜组 O_2 、 O_3 成像于 CCD 靶面,获得干涉图。

图 1 中,在 O_1 焦点内垂轴平移点光源,可以改变准直光束在干涉腔的入射倾角从而实现移相。为简便起见,可以将图 1 所示干涉光路等效为迈克尔逊干涉仪形式,如图 2(a)所示,其双光束等厚干涉模型可以进一步简化为如图 2(b)所示。将点光源 P 垂轴平移 d ,经 O_1 出射的光束与光轴产生倾角 θ ,当 $\theta \ll 1$ 时,根据等厚干涉原理^[12],两束相干光之间的相位差为

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} H \cos\theta \approx \frac{4\pi}{\lambda} H - \frac{2\pi}{\lambda} H\theta^2, \quad (1)$$

其中: H 为干涉腔长, λ 为入射光波长,倾角 $\theta \approx d/f$, d 为点光源垂轴位移量, f 为物镜 O_1 的焦距。

由于倾角 θ 的引入,式(1)右端的移相增量可表示为

$$\delta = \frac{2\pi H}{\lambda f^2} d^2. \quad (2)$$

根据式(2)可以看出,当点光源 P 垂轴位移时,在相干光束之间将引入相移,适当选取垂轴偏移量 d ,可在干涉图中获得等步长的相移量。

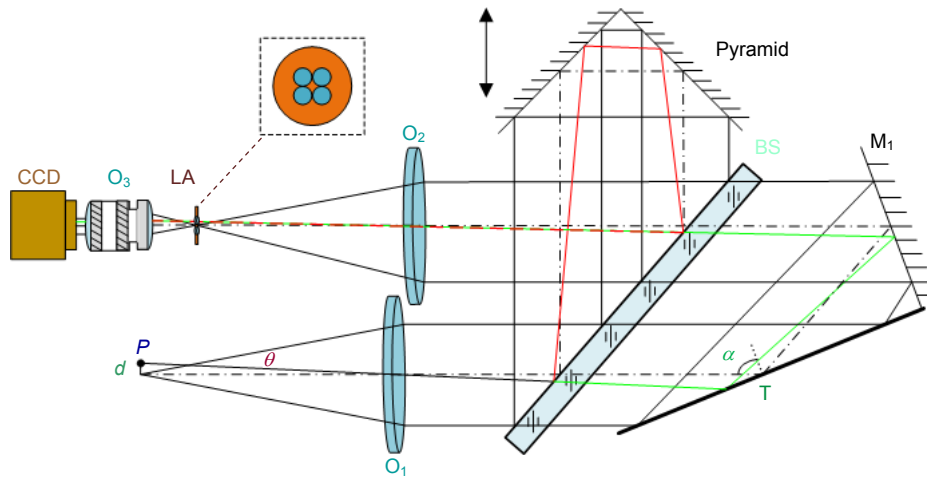


图 1 斜入射干涉仪光路结构图
Fig. 1 Optical layout of the oblique incidence interferometer

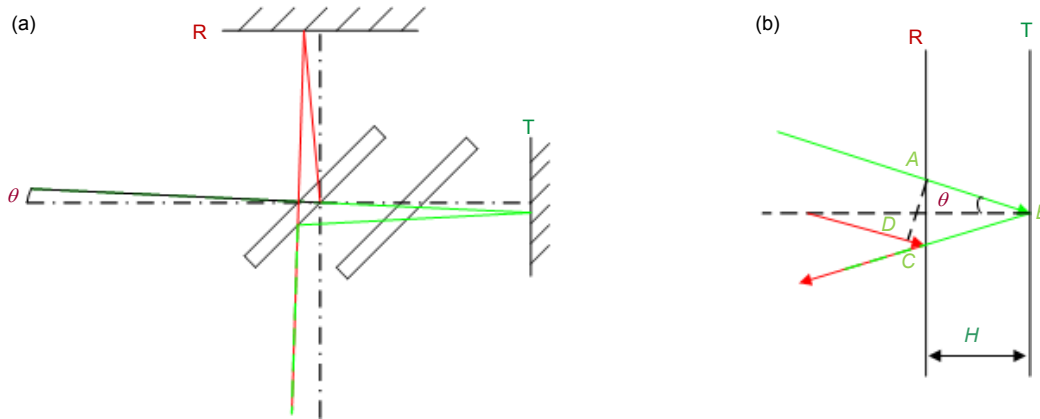


图 2 变倾角移相原理。(a) 等效迈克尔逊干涉仪光路；(b) 等效等厚干涉光路
Fig. 2 Principle of phase shifting based on the variation of inclination. (a) The alternative representation of optical path in the Michelson interferometer; (b) The alternative representation of optical path in an equal-thickness interferometer

2.2 同步移相与空间分光方案

为实现动态测量，需同时获取四幅移相干涉图，即要解决同步移相及空间分光两个问题。图 1 中，将 P 替换为四个点光源构成的光源阵列，并在 O₂ 及 O₃ 间设置 2×2 透镜阵列 (lens array, LA)。光源阵列经干涉仪后产生四组相干光束，各组相干光束分别通过 LA 上对应的单透镜，后经 O₃ 成像到 CCD 不同位置，通过一个 CCD 单次曝光可同时采集四幅移相干涉图。精确控制各点光源在干涉腔的入射倾角，可实现同步移相，而在干涉仪成像光路中引入透镜阵列，可实现空间分光。

如图 3 所示，点光源阵列 P₁~P₄ 设置于正方形的

四个顶点上，其边长为 l，中心为 C(x, y)，O 点为准直物镜 O₁ 的前焦点。当 O 与 C 点不重合时，各点光源的垂轴位移量 d 不同，因而在各自产生干涉图中引入了不同的移相量。为使四幅干涉图实现 π/2 的同步移相，C 点坐标需满足：

$$x = -2y = \pi f^2 / 2Hkl, \quad (3)$$

其中 k=2π/λ 为波数。在四幅干涉图中引入不同的移相量后，还需在 CCD 靶面上实现相互分离且清晰成像。然而由于四组测试光在待测面上是完全重合的，单一的成像系统无法使得干涉图在 CCD 靶面上既分离又清晰成像。在图 1 所示干涉系统中，需在 O₂ 及 O₃ 间设置一个 2×2 透镜阵列 LA。如图 4 所示，四组相干光束经 O₂ 会聚后，分别通过 LA 的各小透镜，经 O₃ 成

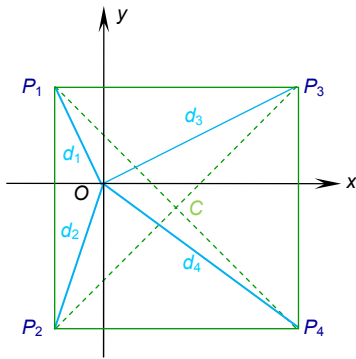


图3 点光源空间位置分布
Fig. 3 The spatial distribution of point sources

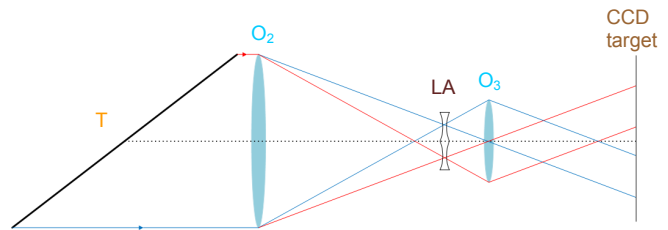


图4 空间分光成像系统
Fig. 4 Spatial splitting imaging system

像到 CCD 靶面。当 O_2 及 O_3 构成双远心成像系统时，能保证成像系统有较大的景深，在斜入射下，实现对整个测试区域的清晰成像。在成像系统中设置 LA，相当于将一个成像系统分成四个空间分离的成像系统，从而满足四幅移相干涉图清晰成像与空间分离的要求。需要指出的是，由于透镜阵列设置在 O_2 焦面处，起场镜的作用，因此不会改变系统的成像放大关系。

3 实验结果

根据图 5 光路搭建原理，其实验装置如图 6 所示。系统采用 He-Ne 激光器生成点光源，由准直物镜 L_1 产生准直光束，经相位光栅 G 衍射，会聚到物镜 L_2 后焦点，通过光阑 S 选出 ± 1 级衍射光，构成四个点光源组成的光源阵列，经物镜 O_1 形成倾角不同的四束准直光，经斜入射干涉仪形成四组相干光束。通过由 O_2 、

透镜阵列 LA、 O_3 组成的空间分光成像系统，由 CCD 同步采集四幅移相干涉图，通过四步移相算法提取相位，进而恢复待测面形。实验系统中，激光器的工作波长为 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ ，CCD 的空间分辨率为 $1624 \text{ pixels} \times 1224 \text{ pixels}$ 。

用该系统测量了口径为 35 mm 的硅片平整度。在测试光路中设置斜入射角为 68° ，并调节折转反射镜 M_1 空间姿态，使其与 T 相互垂直，只有当 M_1 与 T 垂直并构成角镜结构时，才能采集到干涉图。通过调节 90° 角镜轴向位置匹配干涉腔长，使其引入等间隔移相。图 7(a) 为 CCD 单次扫描采集的干涉图，曝光时间为 10 ms。对干涉图进行位置匹配，根据四步移相算法解算相位，并按斜入射角的投影关系恢复面形，如图 7(b) 所示，被测波面的均方根值 RMS 为 $1.631 \mu\text{m}$ ，波面的峰谷值 PV 为 $9.082 \mu\text{m}$ 。

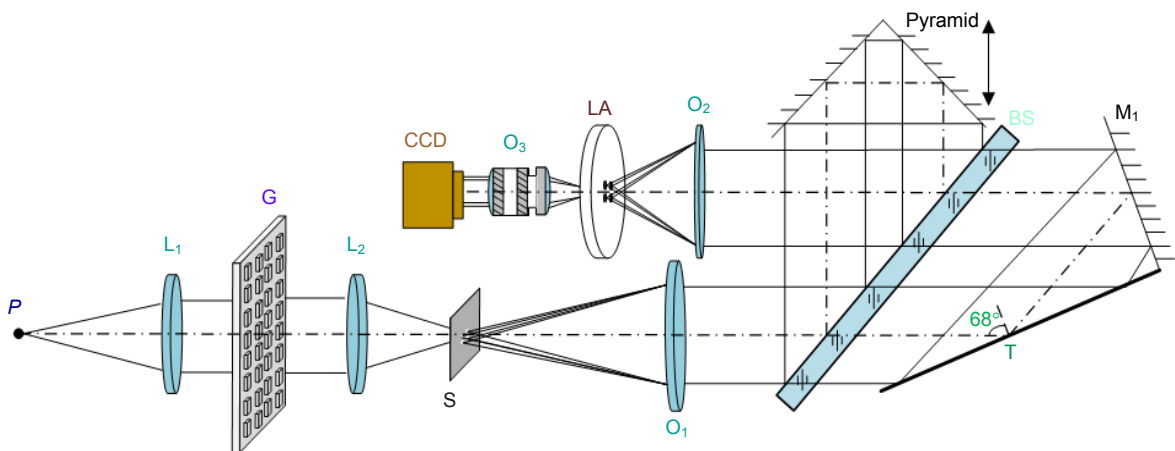


图5 变倾角斜入射干涉仪光路图
Fig. 5 Optical layout of oblique incidence interferometer based on inclination angle deflection



图 6 变倾角斜入射干涉仪实验装置

Fig. 6 Experimental device of oblique incidence interferometer based on inclination angle deflection

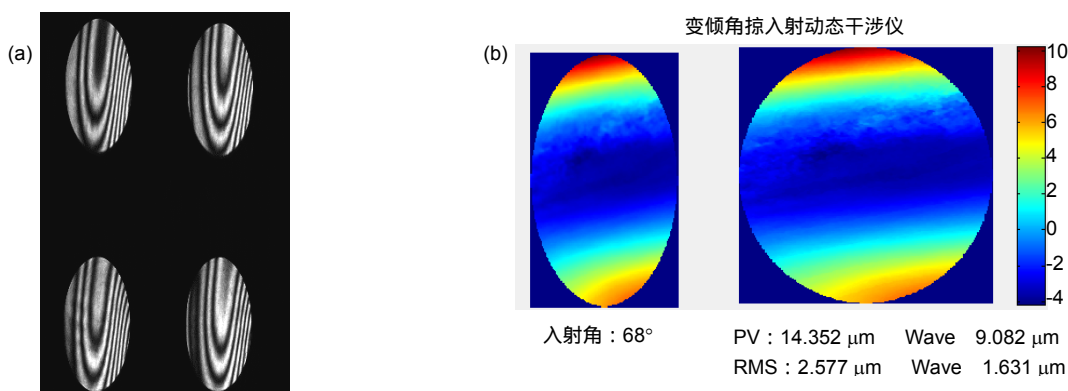


图 7 实验结果。(a) CCD 采集的干涉图; (b) 硅片面形恢复结果

Fig. 7 Experimental results. (a) The interferograms recorded by CCD; (b) The retrieved surface distribution of silicon substrate

4 讨论分析

4.1 测量灵敏度分析

斜入射干涉法的测量灵敏度因子 β 可表示^[2]:

$$\beta = 2\cos\alpha, \quad (4)$$

其中 α 为斜入射角。式(4)表明,斜入射干涉测量灵敏度随着 α 的增加而降低,这就意味着干涉仪可以测量的动态范围增大,动态范围的拓展可以用灵敏度因子的倒数 $1/\beta$ 表示,其与斜入射角关系如图 8 所示。与自准直法中两次反射相比,本方案中测试光单次通过试件,其测量灵敏度是两次反射时的一半,进一步拓展了测量范围。虽然测量范围随 α 的增大而增大,但会影响空间分辨率及表面反射率,故 α 不能一味增大。根据 Fresnel 公式,被测件的反射率随 α 的增加而提高,图 9 给出了未镀膜光学平面反射比与入射角之间的关系。为了提高条纹对比度,需要匹配相干光束的光强。因而在硅片测量中,综合考虑测量灵敏度、试件口径、表面反射率以及空间分辨率等因素,选择了 68° 的斜入射角,将测量范围扩展了 2.7 倍。

4.2 空间分辨率

在斜入射测量下,由于斜入射的投影关系,测试光束主截面内的尺寸被压缩,被测件上的采样点也随之减少,从而降低了采样分辨率,导致获取的波面数据减少,从压缩波面恢复真实面形时会引入系统误差。为了定量分析引入的误差大小,设置实验参数如下:斜入射角为 68° , 4 个点源的间距为 2 mm,准直物镜焦距为 300 mm,光源波长 $\lambda=632.8$ nm,干涉腔长为 $H=50$ mm。在此情况下,将 O 坐标调整为(0.071 mm, -0.142 mm)时,可实现干涉图的相移量依次递增 $\pi/2$ 。根据硅片实际面形,取仿真波面为 $10 \mu\text{m}$ 的像散面,如图 10(a)所示,仿真的同步移相干涉图如图 10(b)所示。通过四步移相算法从仿真干涉图中提取相位,结果如图 10(c)所示,PV 为 $10.482 \mu\text{m}$,RMS 为 $2.217 \mu\text{m}$ 。残差面如图 10(d)所示,PV 为 $0.48 \mu\text{m}$,RMS 为 $0.094 \mu\text{m}$,相对误差小于 5%。为控制测量误差,保证测量结果的准确性,在 68° 斜入射角下适用于面形误差在 $0.1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 范围变化的光学表面平整度的测量。

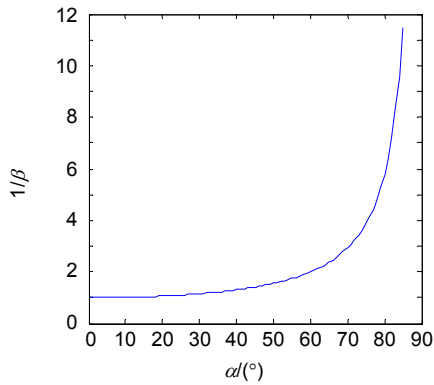


图 8 拓展范围与斜入射角关系

Fig. 8 Expanded measurement range with different oblique incidence angles

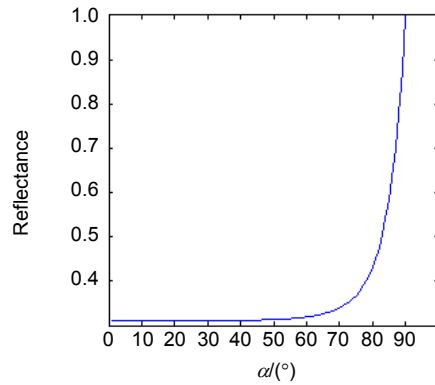


图 9 反射比与斜入射角关系

Fig. 9 Reflectance with different oblique incidence angles

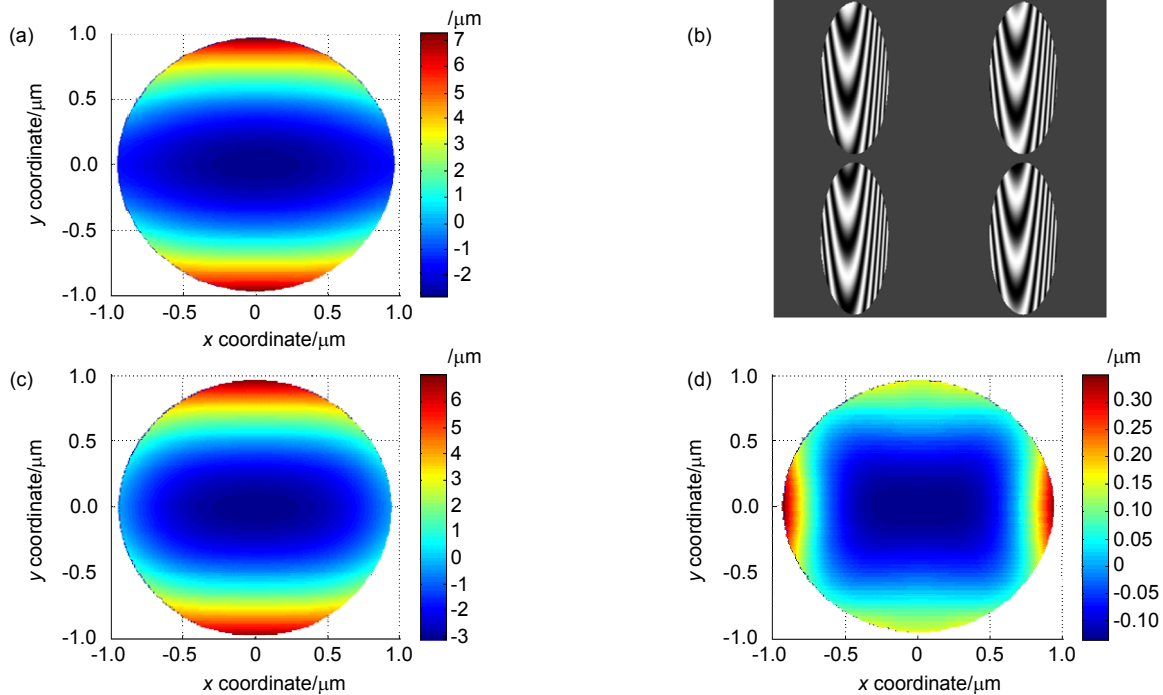


图 10 仿真结果。(a) 原始相位; (b) 同步移相干涉图; (c) 四步移相恢复相位; (d) 残差

Fig. 10 Simulation result. (a) The simultaneous phase shift interferogram; (b) Original phase; (c) Phase derived by four-step phase-shifting method; (d) Residual surface

4.3 出射波前像差引入的系统误差及抑制

根据图 2(b)所示的等厚干涉模型,在变倾角移相下,垂轴平移的点光源经准直后的出射波前以倾角 θ 入射等厚干涉腔,在参考波前与测试波前间引入横向剪切,剪切量为 $2H \sin \theta$ 。当出射准直波前存在像差时,测量结果中将引入一定的系统误差。由于四个点光源的垂轴平移方向、平移量不同,造成每一对相干光束产生的剪切量与剪切方向不同,在用移相算法恢复相位时引入误差。

为了定量分析引入系统误差的大小,设置实验参

数如下:准直物镜焦距为 300 mm,口径为 35 mm,光源波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$,准直波前的像差在 $0.1\lambda \sim 0.3\lambda$,模拟实际的四幅剪切干涉图,采用四步移相算法获取相位。图 11(a)、11(b)和 11(c)给出了在准直波前存在不同像差时,计算得相位残差与干涉腔长的关系,可以看出,初级像差均会引入系统误差,且影响比重基本相同。为了尽可能提高分辨率,根据瑞利准则,由球差所产生的波像差应小于 $\lambda/4$ 。为了控制误差在 $\lambda/100$ 以下,干涉腔长需小于 58 mm,此时可以忽略准直波前像差引入的误差。图 11(d)在腔长为 50 mm,且准直波前包含球差为 $\lambda/4$ 下计算出相位残差与准

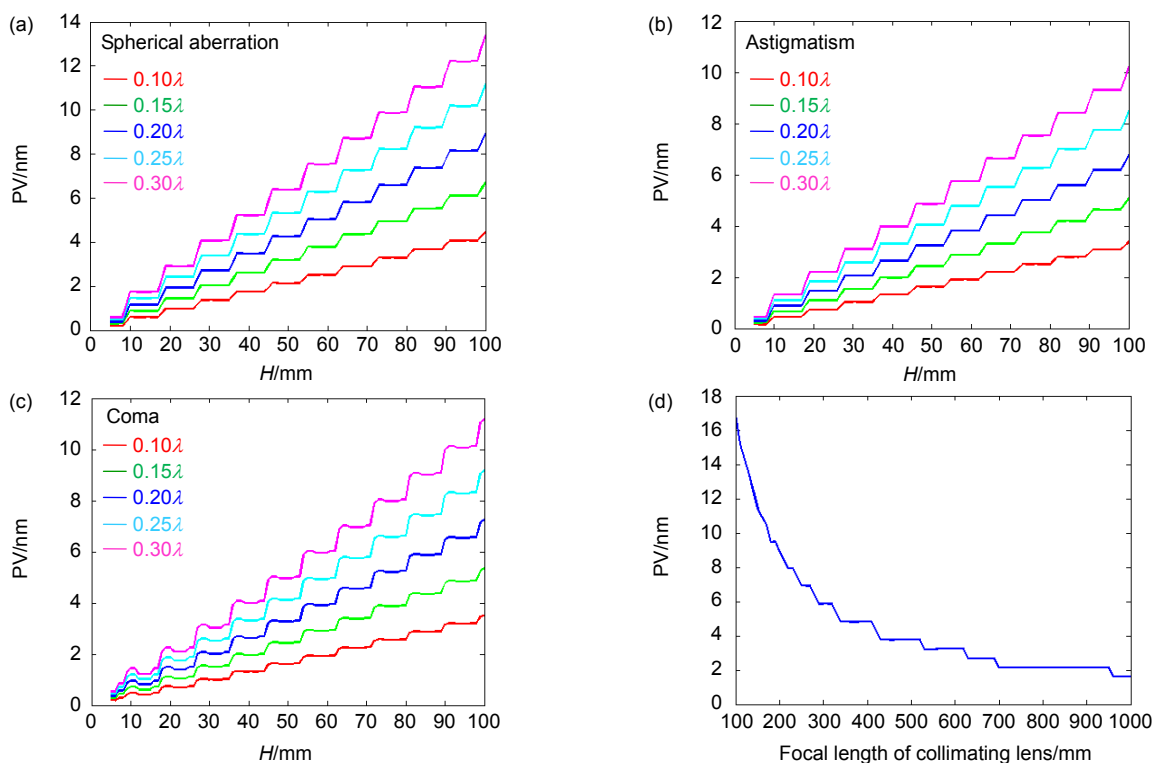


图 11 变倾角移相引入的系统误差。(a) 准直波前中包含球差；(b) 准直波前中包含像散；(c) 准直波前中包含彗差；(d) 与准直物镜焦距的关系

Fig. 11 Calculation error introduced by the light deflection. (a) Collimated wavefront with spherical aberration; (b) Collimated wavefront with astigmatism; (c) Collimated wavefront with coma; (d) Relationship with focal length of collimating lens

直物镜焦距的关系，为了控制误差在 $\lambda/100$ 以下，准直物镜的 F 数应大于 8.5。由以上分析，选择长焦距的准直透镜和匹配适宜的干涉腔长，可以减少准直波前存在像差时引入的误差。

4.4 空间分光系统成像质量

在干涉仪的成像系统中设计了双远心光路结构的成像透镜组，能在斜入射条件下实现整个测试区域的清晰成像。之后为实现空间分光，在成像透镜组中引入了负透镜阵列。但由于各点光源均不位于光轴上，

这使得各负透镜也是离轴的，而离轴成像会引入额外的像差，需要对其成像系统进行精心设计。经过优化设计，空间分光系统的成像质量用 Zemax 光学设计软件给出定量评价^[13]。其光学传递函数 MTF 曲线如图 12 所示，在 24.5 lp/mm 中心视场 MTF 值为 0.8，在 0.19°视场子午光线的 MTF 值为 0.790，弧矢光线的 MTF 值为 0.795，系统在 85 lp/mm 处 MTF>0.3，且接近衍射极限。图 13 中星点的谱线中心基本重合，各个视场光斑大小也较均匀。在 50 mm 量度下 RMS 控制

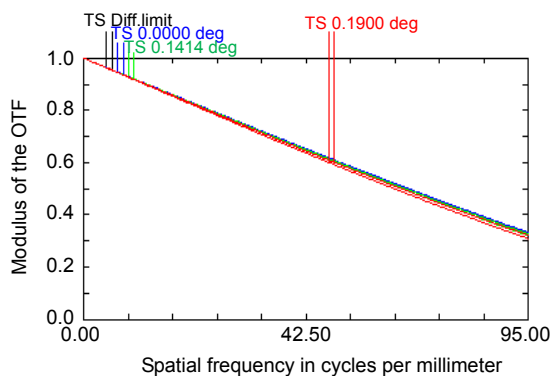


图 12 MTF 数值曲线图
Fig. 12 MTF numerical curve

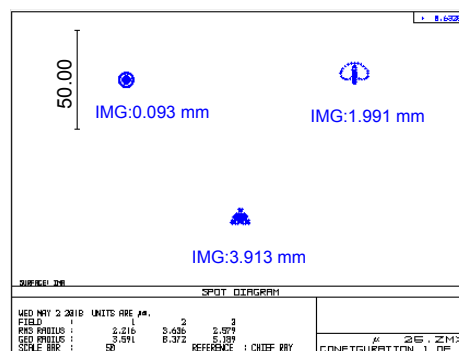


图 13 星点图
Fig. 13 Spot diagram

在 2.216 μm 到 8.372 μm 内, 成像分辨较高。如图 14 所示, 场曲控制在 -0.012 mm~ -0.025 mm 范围之内, 畸变控制在 4%。

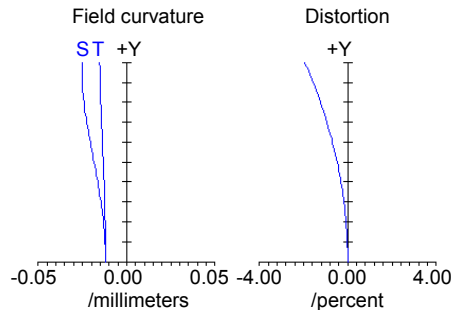


图 14 场曲畸变曲线
Fig. 14 Field curvature/distortion curve

5 结论

本文提出了一种基于变倾角移相的斜入射动态干涉仪方案, 构建了原理装置。在 68°斜入射角下测量了平整度在 10 μm 量级的光学表面面形。设计了基于变倾角移相的斜入射动态干涉仪方案, 实现了同步移相干涉测试, 克服了环境震动的干扰。所构建的干涉测量装置具备以下特点: 1) 测试光路的角镜结构设计使得被测光波自准直返回, 便于斜入射角的调整, 并能实现灵敏度的连续可调, 适用于面形误差在 0.1 μm~10 μm 范围变化的光学表面平整度的测量; 2) 不同于通用的动态干涉仪, 本装置不采用偏振移相干涉方案, 测量结果不会受到干涉仪内部光学元件及待测件的应力偏差的影响, 降低了干涉仪的制造要求; 3) 本文所设计的空间分光成像系统在斜入射条件下, 可以对整个测试区域清晰成像; 4) 变倾角同步移相的方式能够实现瞬态测量, 适用于光学车间的在线检测。

参考文献

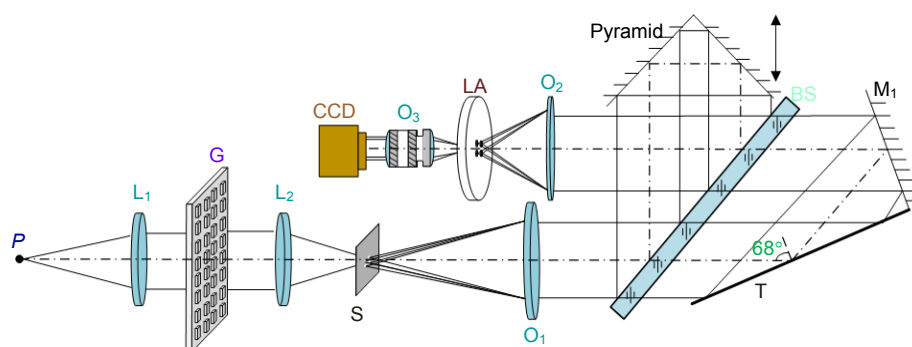
- [1] Malacara D. *Optical Shop Testing*[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007: 33–59.
- [2] Vannoni M, Martin I F. Surface measurements in "grazing incidence" interferometry for long x-ray mirrors: theoretical limits and practical implementations[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **9962**: 996207.
- [3] Mizutani Y, Iwata T, Otani Y. Time-resolved vibrational surface profile measurement of ultrasonic motor using stroboscopic oblique incidence interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7855**: 78550N.
- [4] Wen H, Kemble C K, Bennett E E. Theory of oblique and grazing incidence Talbot-Lau interferometers and demonstration in a compact source x-ray reflective interferometer[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(25): 25093–25112.
- [5] Szwaykowski P, Bushroe F N, Castonguay R J. Interferometric system with reduced vibration sensitivity and related method: 8004687.B2[P]. 2011-12-09.
- [6] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5531**: 304–310.
- [7] Kimbrough B T. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(19): 4554–4562.
- [8] Yu Y J, Peng J, Wang Z Q. Spatial phase-shifting interferential system on polarization interference and grating beam-splitting: phase-shifting error testing[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, **48**(1): 992–997.
- [9] Zhu W H, Chen L, Zheng D H, et al. Dynamic Fizeau interferometer based on the lateral displacements of the point sources[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, **91**: 216–220.
- [10] Robledo-Sanchez C, Juarez-Salazar R, Meneses-Fabian C, et al. Phase-shifting interferometry based on the lateral displacement of the light source[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(14): 17228–17233.
- [11] Langenbeck P. *Interferometry for Precision Measurement*[M]. Bellingham, Washington: SPIE, 2014: 39–53.
- [12] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 261–270.
- [13] Geary J M. *Introduction to Lens Design*[M]. Virginia: Willmann Bell, Inc, 2002: 389–396.

Oblique incidence dynamic phase-shifting interferometer based on inclination angle deflection

Liu Zhiyuan¹, Chen Lei^{1*}, Zhu Wenhua¹, Ding Yu¹, Ma Yun², Zheng Donghui¹

¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²Advanced Launch Corporative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China



Optical layout of oblique incidence interferometer based on inclination angle deflection

Overview: An oblique incidence dynamic phase-shifting interferometer based on inclination angle deflection is proposed to quickly obtain the surface distribution of optical surface with flatness of micron dimension. The measurement is based on the Michelson interference system. The He-Ne laser which operates at 632.8 nm is used as the light source. In combination with a phase mask grating, the four ($\pm 1, \pm 1$) diffraction orders is selected to generate a 2×2 point source array which is introduced into the interference system as light source configuration. Adjust the distance of each point source off the optical axis precisely, the incidence angle of each point source on the interferometer cavity is changed to induce phase shift. In this work, we introduce equal phase shift interval of $\pi/2$ in the interferograms. We choose double telecentric imaging system to ensure the entire test part can be clearly imaged. By inducing a lens array into the imaging system, the four interferograms can be separated spatially on a single CCD. Then the four phase-shifting interferograms are captured simultaneously on the CCD target, and the initial phase will be retrieved exactly by employing the four-bucket algorithm, thereby realizing dynamic measurement. To analyze the measurement error which is introduced by the offset amounts of each point source, we establish a simulation model to study the effect of the collimated wavefront quality on the measurement. It is necessary to ensure that the aberrations which collimated wavefront contains smaller than $\lambda/4$, and the F-number of the collimating objective lens should be greater than 8.5. We also design the imaging system to ensure image quality through Zemax software. We build up the experiment device and choose a silicon wafer with aperture of 35 mm as the test part. The flatness of silicon wafer is about 10 μm dimension, and the measurement of the thin wafer is susceptible to vibration. Furthermore, to study the influence of the oblique incidence angle on the sensitivity factor and the range of measurement, a mathematical model based on the oblique incidence measurement is established to select the best incidence angle. Considering the sensitivity factor, the aperture of the test part, the surface reflectance and the spatial resolution, the silicon wafer is measured at oblique incidence angle of 68° , the root mean square (RMS) is 1.631 μm and peak-to-valley (PV) is 9.082 μm . The experimental results indicate that the proposed interferometer overcomes the disturbance of vibration environment and extends the measurement range of interferometer with high precision by introducing the simultaneous phase-shifting interferometry based on inclination angle deflection into the oblique incidence interference system.

Citation: Liu Z Y, Chen L, Zhu W H, *et al.* Oblique incidence dynamic phase-shifting interferometer based on inclination angle deflection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, **46**(8): 180516

Supported by National Natural Science Foundation of China (U1731115)

* E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn