

文章编号 1004-924X(2018)12-2873-08

用于位相缺陷检测的反射式剪切点衍射干涉仪

马 云¹, 陈 磊^{2*}, 刘一鸣², 朱文华²

- (1. 南京理工大学 先进发射协同创新中心, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:为了实现光学元件位相缺陷的大视场、高分辨率、瞬态检测,设计了一种基于无镜成像算法的反射式剪切点衍射干涉仪。该干涉仪通过在参考光与测试光之间引入横向错位量,形成高密度线性载频,利用快速傅里叶变换算法从单幅干涉图中提取待测波面信息,实现缺陷的瞬态测量。利用无镜成像算法抑制了缺陷的衍射效应,总结了有效的缺陷类型辨别方法。实验检测了强激光系统中的一块光学平晶,验证了所提缺陷类型判据的正确性。此外,采用反射式剪切点衍射干涉仪对一块激光毁伤的光学平板进行检测,测试结果与 Veeco NT9100 白光干涉仪测量结果相比,相对误差为 2.1%。结果表明,该干涉仪能够有效应用于检测大口径光学元件的位相缺陷。

关键词:干涉测量;瞬态测量;点衍射;位相缺陷;无镜成像

中图分类号:O436.1;TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182612.2873

Reflective shearing point diffraction interferometer for phase defect measurement

MA Yun¹, CHEN Lei^{2*}, LIU Yi-ming², ZHU Wen-hua²

- (1. *Advanced Launch Corporative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;*
 2. *School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: chenlei@njust.edu.cn*

Abstract: In order to realize a large field, high resolution, and dynamic measurement of phase defects of optical components, a Reflective Shearing Point Diffraction Interferometer (RSPDI) was proposed. A lateral shear amount was introduced between the test and reference light to generate a high-density linear carrier frequency, and the information of the wavefront under the test was extracted from a single interferogram by an fast Fourier transform algorithm to determine the simultaneous measurement of the defects. The lensless imaging algorithm suppressed the diffraction effect of the defect, and the effective discrimination method of the defect type was summarized. In the experiment, an optical flat in a high-power laser system was detected by the RSPDI, and the correctness of the defect type criterion was verified. In addition, a laser-damaged optical plate was measured by the RSPDI and a Veeco

收稿日期:2018-06-28;修订日期:2018-08-21.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFF0107103)

NT9100 white light interferometer, with a relative error of 2.1%. The results indicate that the interferometer can be used to detect phase defects of large-aperture optical components effectively.

Key words: interferometry; simultaneous measurement; point diffraction; phase defect; lensless imaging

1 引言

光学元件的位相缺陷会严重影响系统性能,所以受到研究者的重视^[1-4]。高功率激光系统包含很多大口径光学元件,元件的位相缺陷可能会引起激光损伤^[5-7],甚至会导致整个系统瘫痪,带来巨大的经济损失,因此光学元件的位相缺陷检测对高功率激光系统来说至关重要。

光学元件所包含的缺陷类型大致分为振幅缺陷和位相缺陷两种。在高功率激光系统中,振幅缺陷导致能量散射,影响光束质量;而位相缺陷则会导致能量会聚到一块很小的区域,从而破坏光学元件或其膜层,造成激光损伤。激光损伤一旦形成,不仅会影响光束质量,而且所引入的光场调制可能会造成后续光学元件的损伤。不过,这两种缺陷在传统光学检测系统中表现出的差异很小,很难将它们区分开来。日本 EUVL 基础设施建设发展中心的 Takeshi Yamane 基于暗场成像法建立了一套光化的全场检测系统,该系统能够检测振幅缺陷及位相缺陷,但检测时间高达 4.75 h,并且无法检测深度低于 30 nm 的缺陷^[8]。日本的 Kiyoshi Ogawa 等人基于微分干涉相衬法建立了一套微分干涉成像光学系统,该方法相比传统的相衬法具有更高的灵敏度,但未能实现动态检测^[9]。吕宪魁、陶纯匡等人提出了位相滤波法来检测透明材料的位相缺陷,该方法简单方便、易于操作、成本低,但仍然没有实现动态检测,而且对测试环境要求很高^[10]。日本的 Kazuhiro Hamamota 等人利用极紫外显微镜来检测位相缺陷,由于照明条件的优化,该系统的分辨率有所提高,但其要求被测件的厚度很小(在 mm 量级),因而并不适用于检测大口径光学元件的位相缺陷^[11]。为实现位相缺陷的检测与定位,美国劳伦斯实验室 F. L. Ravizza 等人提出了一种线扫描相位微分成像技术,这是一种能够在 67 s 内检测到口径光学元件体内或表面位相缺陷的大面积暗场成像技术^[12],利用移相衍射干涉术(Phase-

shifting Diffraction Interferometry, PSDI)对位相缺陷进行准确求解,该方法能够对大口径光学元件进行快速检测,但分辨率低。其中,PSDI 由 Michael Johnson 提出,这是一种双光纤点衍射干涉仪^[13-14],其不足之处在于对两根光纤的间距要求严格,在保证两只衍射环分开的同时,也要保证线性载频条纹的频率不能超过 CCD 的采样频率。该方法结构简单,不会引入其他元件的缺陷干扰,但视场小,要求被测件的位相缺陷分布稀疏,且不能抵抗环境扰动。

针对位相缺陷检测目前存在的不能抵抗环境扰动、无法辨别缺陷类型等问题,本文提出了一种反射式剪切点衍射干涉仪(Reflective Shearing Point Diffraction Interferometer, RSPDI)。该干涉仪通过引入高密度线性载频,结合快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法^[15],从单幅干涉图中直接提取待测波面信息,实现缺陷的瞬态测量。同时,采用无镜成像算法实现缺陷类型的辨别。

2 原理

2.1 RSPDI 系统结构

RSPDI 的总体光路结构如图 1 所示。光纤激光器发出的球面波经过准直物镜变成平行光,平行光经过被测件后由成像透镜会聚,待测的会聚波前以 45°角入射到点衍射板前表面的分光膜上,一部分光在分光膜上发生反射,作为测试光打到 CCD 靶面上;另一部分光经分光膜透射后在后表面发生反射,再经前表面的针孔衍射,产生一个理想的发散球面波,作为参考光。参考光与测试光之间发生干涉,在 CCD 靶面上产生高密度线性载频。通过 FFT,即可由单幅干涉图快速解算出波面分布,得到被测件的位相缺陷信息。由于被测件处于平行光路中,被测件的横向、轴向平移均不会影响待测波前会聚到点衍射板上的位置,从而使得该干涉仪能够应用于检测大口径光学元件的位相缺陷。

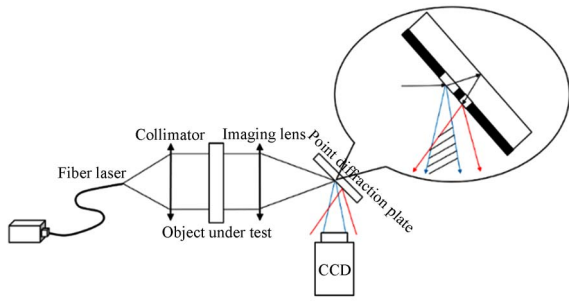


图 1 反射式剪切点衍射干涉仪的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of reflective shearing point diffraction interferometer

2.2 无镜成像原理

要实现位相缺陷的高分辨率检测,同时避免不同空间位置处的缺陷成像相互重叠,系统的景深要很小。由于系统的景深小,要想对不同空间位置的缺陷清晰成像,就需要 CCD 移动相当长的一段距离,这样不仅会改变干涉图的载频,还会改变成像关系。因此,需要在算法上进行优化,实现缺陷的衍射传播成像,改善仪器的可操作性。

为实现缺陷的无镜成像,假设在 CCD 靶面位置放置一个孔径无穷大的虚拟透镜,如图 2 所示。该透镜的焦距等于点衍射板上针孔到 CCD 靶面的距离。假设缺陷清晰成像的位置在 U_0 ,此时 CCD 靶面 U_0' 即为 U_0 的共轭位置。当物面移至 U_1 处时,虚拟透镜将 CCD 靶面处接收的球面波准直,传播到被测件的共轭位置 U_1' ,此时,像面位置 U_1' 处的波面信息与被测件处的波面信息一致。

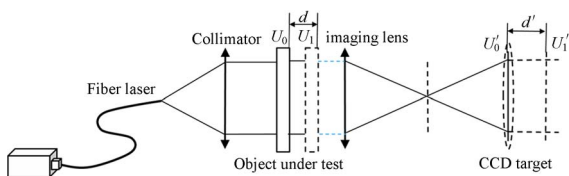


图 2 无镜成像原理图

Fig. 2 Schematic diagram of lensless imaging algorithm

由 CCD 靶面采集到的干涉图,利用 FFT 可以解算出其相位 φ 以及调制度 b 。由于无法由傅里叶变换分离出参考光与测试光的复振幅,因而将 b 近似为参考光的振幅。利用平面波角谱理论^[16],将虚拟共轭面处的复振幅 U_1' 与 CCD 靶面处的复振幅 U_0' 联系起来,即:

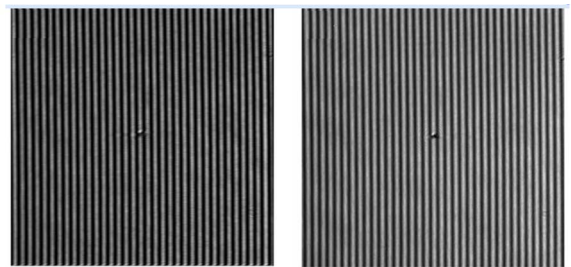
$$U_1' = U_0' \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} d' \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right], \quad (1)$$

其中: (f_x, f_y) 为平面波的空间频率; $d' = \frac{dy'}{y}$, 为虚拟像面到 CCD 靶面之间的距离, d 为被测件偏离的距离, U_0 为 CCD 靶面尺寸, y' 为被测区域尺寸。复振幅 U_1' 即为被测件处的波面信息。

3 仿 真

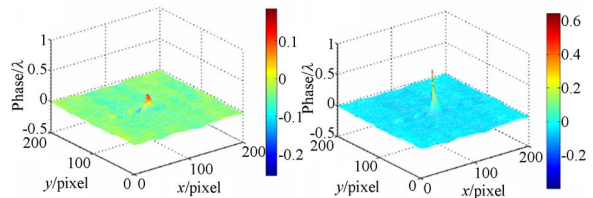
3.1 无镜成像仿真

为验证无镜成像算法的可行性,消除缺陷的衍射效应,对无镜成像算法进行仿真。选取激光器的中心波长为 532 nm, CCD 像元尺寸为 $5.08 \mu\text{m} \times 5.08 \mu\text{m}$, 针孔到 CCD 靶面的距离为 52 mm, 此即为虚拟透镜的焦距。由于缺陷横向尺寸很小,一旦偏离 CCD 共轭位置,将在干涉图中产生衍射环,图 3(a) 给出了被测件偏离 CCD 共轭位置时, CCD 实际采集的带衍射环的干涉图。利用无镜成像算法对它进行恢复,得到清晰成像时的仿真干涉图 3(b), 并利用两幅干涉图解算待测件的透射波前,结果分别如图 3(c) 和图 3(d) 所示。



(a)带衍射环的干涉图 (b)无镜成像算法处理后的干涉图

(a) Interferogram with diffraction rings (b) Interferogram processed by lensless imaging algorithm



(c)原干涉图求解出的波面 (d)无镜成像算法恢复的波面
(c) Wavefront solved by original interferogram (d) Wavefront solved by lensless imaging algorithm

图 3 无镜成像仿真

Fig. 3 Simulation of lensless imaging

由上述仿真结果可以看出,由于缺陷的横向尺寸很小,当被测件未处于共轭成像的位置时,CCD采集到的干涉图中缺陷周围会产生衍射环,无法准确得到缺陷的深度信息,而利用无镜成像算法可以有效抑制缺陷的衍射效应,提高该干涉仪的测量效率。

3.2 振幅缺陷与位相缺陷的辨别

由于位相缺陷会直接影响光学系统的性能,甚至毁坏光学系统,因而辨别振幅缺陷与位相缺陷至关重要。就干涉图而言,由于缺陷横向尺寸太小,会产生衍射效应,很难由干涉图来分辨振幅缺陷和位相缺陷。这里利用无镜成像算法分别对振幅缺陷及位相缺陷的传播进行仿真,从而实现振幅缺陷与位相缺陷的辨别。仿真参数与实验中的各项参数保持一致,CCD分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$,像元尺寸为 $5.08\ \mu\text{m} \times 5.08\ \mu\text{m}$,激光器的中心波长为 $532\ \text{nm}$ 。

为方便观察缺陷传输变化,假设在 $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 的被测区域内,存在一个直径为 $60\ \mu\text{m}$ 的圆形振幅缺陷,该缺陷所在区域内振幅设为0。由无镜成像算法可解得其传播后的相位及振幅分布,如图4所示。当传播距离分别为 $-10, -1, 0, 1, 10$,

$1, 10\ \text{mm}$ 时,振幅缺陷的相位分布分别如图4(a)~4(e)所示,振幅分布分别如图4(f)~4(j)所示,缺陷中心点相位、振幅与传播距离之间的关系曲线分别如图4(k)和4(l)所示。由此可以看出,随着传播距离 z 的增大,振幅缺陷中心点的相位会随之发生跳变,而振幅则不会发生跳变。

同样,假设存在一个直径为 $60\ \mu\text{m}$ 的圆形位相缺陷,该缺陷所在区域内相位峰谷值设为 0.3λ ,且呈高斯分布。由无镜成像算法解得其传播后的相位及振幅分布,如图5所示。当传播距离分别为 $-10, -1, 0, 1, 10\ \text{mm}$ 时,位相缺陷的相位分布分别如图5(a)~5(e)所示,振幅分布分别如图5(f)~5(j)所示,缺陷中心点相位、振幅与传播距离之间的关系曲线分别如图5(k)和5(l)所示。由此可以看出,随着传播距离 z 的增大,位相缺陷中心点的振幅会随之发生跳变,而相位则不会发生跳变。

由上述仿真结果可以看出,要辨别振幅缺陷与位相缺陷,只需要利用无镜成像算法对缺陷进行传播,当相位发生跳变而振幅不跳变时,则该缺陷为振幅缺陷;反之,则为位相缺陷。由此即可实现缺陷种类的辨别。

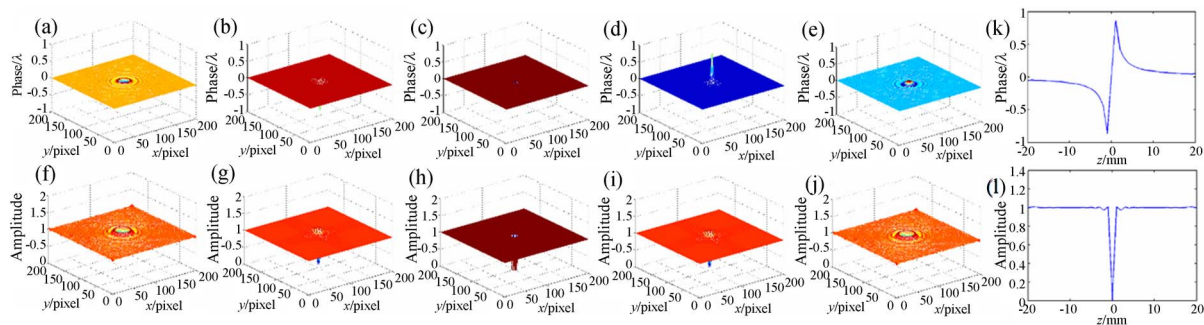


图4 振幅缺陷的传播。(a)~(e)传播距离分别为 $-10, -1, 0, 1, 10\ \text{mm}$ 时的相位;(f)~(j)传播距离分别为 $-10, -1, 0, 1, 10\ \text{mm}$ 时的振幅;(k)缺陷中心点相位与传播距离的关系曲线;(l)缺陷中心点振幅与传播距离的关系曲线

Fig. 4 Propagation of amplitude defect. (a)~(e) phases at $-10, -1, 0, 1, 10\ \text{mm}$; (f)~(j) amplitudes at $-10, -1, 0, 1, 10\ \text{mm}$; (k) phases of central point under different distances; (l) amplitudes of central point under different distances

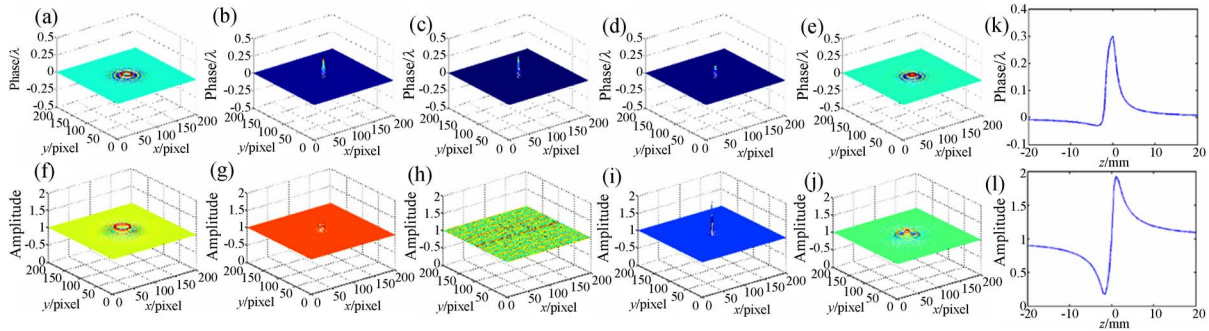


图 5 位相缺陷的传播。(a)~(e)传播距离分别为-10,-1,0,1,10 mm时的相位;(f)~(j)传播距离分别为-10,-1,0,1,10 mm时的振幅;(k)缺陷中心点相位与传播距离的关系曲线;(l)缺陷中心点振幅与传播距离的关系曲线

Fig. 5 Propagation of phase defect. (a)~(e) phases at -10, -1, 0, 1, 10 mm; (f)~(j) amplitudes at -10, -1, 0, 1, 10 mm; (k) phases of central point under different distances; (l) amplitudes of central point under different distances

4 实 验

根据图 1 搭建实验光路,选用中心波长为 532 nm 的激光器,焦距、口径分别为 100,25.4 mm 的准直透镜及焦距、口径分别为 40,25.4 mm 的成像透镜。

为验证所述缺陷类型判据的正确性,用该干涉仪检测了强激光系统中的一块光学平面。加入被测件,使被测件表面反射回去的光聚焦于光纤激光器上,保证被测件与平行光垂直放置,此时 CCD 上采集到单幅高载频线性干涉图。利用 FFT 算法对干涉图进行解算,同时利用无镜成像算法对波面进行传输,结果如图 6 和图 7 所示。当传播距离分别为-5,0,5 mm 时,振幅缺陷的相位分布分别如图 6(a)~6(c)所示,存在跳变;

振幅分布分别如图 6(d)~6(f)所示,不存在跳变;位相缺陷的相位分布分别如图 7(a)~7(c)所示,不存在跳变;振幅分布分别如图 7(d)~7(f)所示,存在跳变,从而验证了所提判据的正确性。

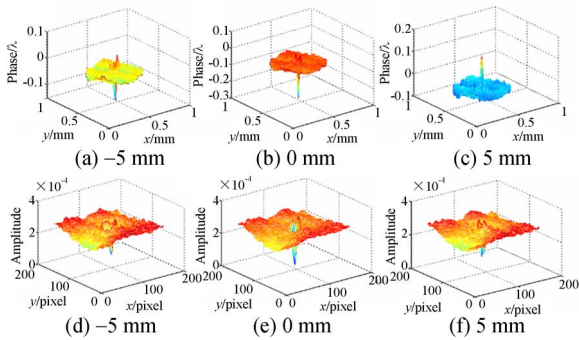


图 6 RSPDI 对光学平面中振幅缺陷的测量结果
Fig. 6 Measurement results of an amplitude defect of an optical flat by RSPDI

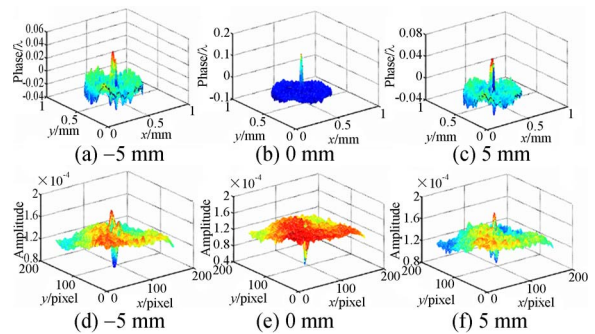


图 7 RSPDI 对光学平面中位相缺陷的测量结果
Fig. 7 Measurement result of phase defect of optical flat by RSPDI

本文制作了专用样品验证所提干涉仪测量结果的准确性。用 Quanta-Ray 公司生产的 INDI-40-10_HG 型激光器轰击一块 K9 玻璃平板,产生深度不同的小孔,利用 RSPDI 测量光束通过小孔的波前变化从而计算小孔深度,实验结果如图 8 所示。PV 值为 0.132λ ,RMS 值为 0.011λ ,由透射波前与实际孔深之间的关系式 $(n-1)\Delta h = d$,其中 $n=1.52$,得到孔的实际深度 Δh 为 135.05 nm。利用无镜成像算法对其进行波面传输,其振幅分布变化发生跳变,而位相分布变化未发生跳变,故该缺陷为位相缺陷。

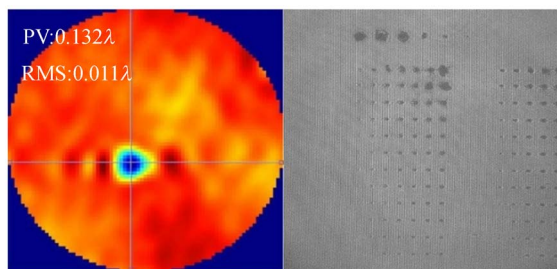


图 8 RSPDI 对激光毁伤板的测量结果

Fig. 8 Measurement result of laser-damaged plate by RSPDI

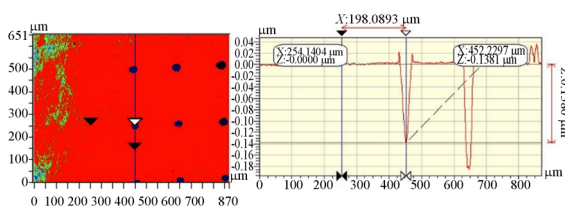


图 9 Veeco NT9100 型白光干涉仪对激光毁伤板的测量结果

Fig. 9 Measurement result of laser-damaged plate by Veeco NT9100 white light interferometer

为验证测量结果的准确性,利用美国 Veeco 公司生产的 NT9100 型白光干涉仪在 PSI 模式下对样品进行检测,测得上述小孔的深度为 138.00 nm,如图 9 所示。对比两次实验结果可得,两者之间的相对误差为 2.1%,验证了 RSPDI 测量结果的准确性。

该白光干涉仪是用反射法对样品表面进行检测的,其纵向分辨率优于 0.1 nm,测试重复精度处于 0.1 nm 量级,而所提点衍射干涉仪采用透射的方法来检测样品中的缺陷,适用于样品表面及内部的缺陷检测。

5 讨论

5.1 点衍射板的膜系、针孔设计

点衍射板的基片为一个石英平行平板,其结构如图 10 所示。为避免杂散光进入点衍射板,同时避免点衍射板前后表面多次反射的光透射出去,在点衍射板的前表面镀了一层遮光膜,中间留有狭缝,狭缝处镀有分光膜,同时在狭缝一侧的遮光膜上刻制针孔。平行平板的后表面一部分镀有高反膜,另一部分镀有增透膜。

为使参考波前接近标准球面波,要保证针孔

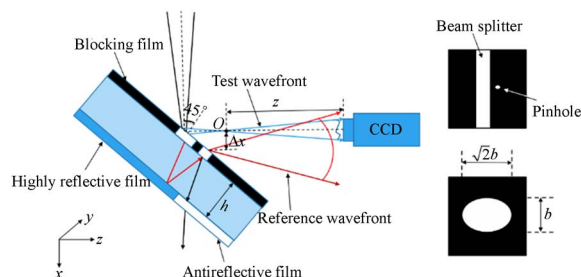


图 10 点衍射板结构图

Fig. 10 Schematic diagram of point diffraction plate

的圆度足够好。由于入射光是以 45°角入射到点衍射板上,为保证针孔在与光轴垂直的平面内投影为圆度较好的圆形,需要将针孔的形状设计为椭圆形,且长轴与短轴长度之比为 $\sqrt{2}:1$,同时保证小孔的短轴长度小于艾里斑半径,故将小孔的短轴长度设置为 $6.4 \mu\text{m}$ 。

5.2 干涉图的载频分析

以测试光焦点为原点,建立如图 10 所示的直角坐标系,结合波像差理论,可以将参考光与测试光错位引入的误差表示为:

$$\Delta W(x, y) = \frac{\Delta x}{z}x + \frac{\Delta x}{2z^2}(x^2 + y^2) - \frac{3\Delta x}{8z^4}(x^2 + y^2)^2 - \frac{\Delta x}{2z^3}x(x^2 + y^2) - \frac{\Delta x^2}{4z^3}(3x^2 + y^2) + C, \quad (2)$$

其中: Δx 为参考光与测试光之间的横向错位距离, z 为测试光焦点到 CCD 靶面的距离, C 为常数。根据 x 方向的倾斜系数和参考光、测试光之间的横向错位量,可以将载频数表示为:

$$f = \frac{2\sqrt{2}h \tan\left[\arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{2n}\right)\right]}{\lambda F}, \quad (3)$$

其中: h 为点衍射板的厚度, n 为点衍射板基底材料的折射率, F 为测试光 F 数。在实际实验中,激光器的中心波长为 532 nm,点衍射板的基底材料为石英玻璃,石英玻璃在 532 nm 波段的折射率为 1.46。由此载频数 f 仅与点衍射板的厚度 h 及测试光的 F 数有关,具体关系如图 11 所示。当点衍射板厚度 h 一定时,随着测试光 F 数的增大,载频数递减;当测试光 F 数一定时,随着点衍射板厚度 h 的增大,载频数递增。由于 CCD 采样频率为 1024×1024 ,根据 Nyquist 采样定理^[17],载频数最多不能超过 256,因此,将点衍射板的厚度定为 0.85 mm,测试光 F 数定为 10,此时载频

数约为 250, 针孔到狭缝中心的距离为 0.94 mm, 满足实验要求。

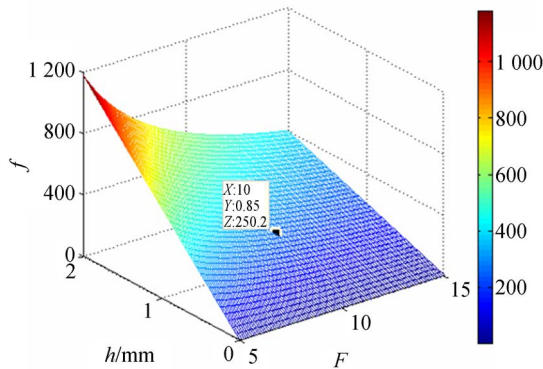


图 11 载频数与点衍射板厚度、测试光 F 数之间的关系

Fig. 11 Relationship among number of carrier frequency, thickness of point diffraction plate and F number of test light

5.3 误差来源分析

在 RSPDI 系统中, 准直透镜和成像透镜均不是理想的, 其中的缺陷会给测量结果带来影响。但由于它们并不处于成像面上, 其缺陷对实验结

果的影响非常微小, 可以忽略不计。在测量被测件的位相缺陷前, 通过对空腔进行检测, 标定系统误差, 可以抑制空腔误差对实验结果的影响。测量时, 为避免被测件倾斜给实验结果带来误差, 需要观察被测件表面反射的光是否会聚于光纤激光器, 从而保证被测件与光轴垂直。

6 结 论

本文研究了一种用于测量位相缺陷的反射式剪切点衍射干涉仪。通过单帧载频干涉图解调待测位相, 可有效抑制环境扰动。所研究的无镜成像算法提供了一种判别振幅型缺陷或位相型缺陷的手段, 并可以抑制缺陷的衍射效应。通过空腔标定、调整被测件等措施, 能够有效抑制系统误差, 提高测量精度。实验表明, 该干涉仪的测量误差可以控制在 2.1% 以内, 能够有效应用于大口径光学元件的位相缺陷检测。本工作后续将对混合型缺陷的判别方进行研究, 并采用光刻方法制作更多深度不同的缺陷样品, 以便进一步研究。

参考文献:

- [1] ARIMA K, SHIGETOSHI T, INOUE H, *et al.*. Nano-scale characterization of surface defects on CMP-finished Si wafers by scanning probe microscopy combined with laser light scattering[C]. *Proc. MRS*, 2007, 991:227-232.
- [2] 董明利, 李波, 张帆, 等. 基于光学傅里叶变换的周期性微结构缺陷检测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(7):1727-1737.
DONG M L, LI B, ZHANG F, *et al.*. Detection of periodic microstructure defect based on optical Fourier transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7):1727-1737. (in Chinese)
- [3] 刘洋, 徐文东, 赵成强, 等. 基于激光光散射层貌术的蓝宝石内部缺陷检测系统[J]. *中国激光*, 2014, 41(9):38-42.
LIU Y, XU W D, ZHAO CH Q, *et al.*. A detecting system of sapphire internal defects based on laser light scattering tomography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9):38-42. (in Chinese)
- [4] 李艳红, 赵跃进, 冯立春, 等. 基于脉冲位相的红外热波无损检测法测量缺陷深度[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):55-58.
LI Y H, ZHAO Y J, FENG L CH, *et al.*. Measurement of defect depth by infrared thermal wave nondestructive evaluation based on pulsed phase[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):55-58. (in Chinese)
- [5] 罗茂, 步扬, 徐静浩, 等. 基于多光谱技术的光学元件表面疵病检测[J]. *中国激光*, 2017, 9(1):198-207.
LUO M, BU Y, XU J, *et al.*. Optical element surface defect measurement based on multispectral technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 9(1):198-207. (in Chinese)
- [6] MATTHEWS M J, BASS I L, GUSS G M, *et al.*. Downstream intensification effects associated with CO₂ laser mitigation of fused silica[J]. *SPIE*, 2007, 6720:67200A.
- [7] BERCEGOL H, BOUCHUT P R, LAMAIGNERE L, *et al.*. The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion lasers[J]. *SPIE*, 2004, 5273:312-324.
- [8] YAMANE T, TANAKA T, TERASAWA T, *et al.*. Phase defect analysis with actinic full-field EUVL mask blank inspection[J]. *SPIE*, 2011, 8166, 81660G.
- [9] OGAWA K, WATAKABE Y. Phase defect inspec-

- tion by differential interference[J]. *SPIE*, 2001, 4409:543-554.
- [10] 吕宪魁, 陶纯匡. 透明材料位相缺陷的检测[J]. 无损检测, 2004, 26(11): 552-553.
LV X K, TAO CH K. Phase disfigurement for transparent material[J]. *Nondestructive Testing*, 2004, 26(11): 552-553. (in Chinese)
- [11] HAMAMOTO K, TANAKA Y, HOSOKAWA N, *et al.*. Phase defect observation using an EUV microscope[J]. *SPIE*, 2006, 6151:361-367.
- [12] RAVIZZA F L. *Imaging of Phase Objects Using Partially Coherent Illumination*[D]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 2013.
- [13] SOMMARGREN G E, PHILLION D W, JOHNSON M A, *et al.*. 100-picometer interferometry for EUVL[J]. *SPIE*, 2002, 4688:316-328.
- [14] 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.
LI Y, YANG Y Y, WANG CH, *et al.*. Point diffraction interference detection technology[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4):391-414. (in Chinese)
- [15] SERVIN M, QUIROGA J A, PADILLA J M. *Fringe Pattern Analysis for Optical Metrology: Theory, Algorithms, and Applications*[M]. Wiley-VCH, 2014:164-169.
- [16] 古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011:40-43.
GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. QIN K CH, Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011:40-43. (in Chinese)
- [17] MACY W W. Two-dimensional fringe-pattern analysis[J]. *Applied Optics*, 1983:3898-3901.

作者简介:



马云(1994—),女,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: mayun@njust.edu.cn

导师简介:



陈磊(1964—),男,江苏南京人,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@njust.edu.cn