

点衍射干涉仪中针孔衍射光强与波面误差分析

朱文华 陈磊 李金鹏 郑东晖 周斌斌

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 为了研究点衍射干涉仪中针孔的横向离焦与轴向离焦对衍射光的强度与衍射参考波面误差的影响,基于菲涅耳衍射理论,建立了会聚光束经针孔衍射的数学模型,提出了将针孔衍射光的强度与衍射波面误差相结合以分析针孔衍射波前的方法,并综合考虑了会聚光束 F 数、针孔直径等参数的影响。研究表明:会聚光束 F 数越大,衍射光强度与波面误差越小;横向离焦的距离应小于艾里斑半径与针孔半径之差;横向离焦的允许范围与波长和 F 数成正比,与针孔直径成负相关;当光束 $F=10$ 时,在 $0\sim 35\ \mu\text{m}$ 横向离焦范围内,直径 $1\ \mu\text{m}$ 以内的针孔可以全程满足波面误差峰谷(PV)值优于 0.1λ 的要求;可以通过调整轴向离焦来调整参考光的强度,并且针孔直径越小调整越灵敏;选择直径小于艾里斑半径的针孔可以保证衍射波前误差PV值优于 $10^{-2}\lambda$,测试光的强度控制在针孔有效衍射光强的 $1/10$ 附近。仿真结果为设计点衍射干涉仪和分析其精度提供了理论和数据参考。

关键词 衍射;点衍射干涉仪;衍射光强;衍射波面误差;离焦

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.061201

Analysis of Diffraction Intensity and Wavefront Error in Point Diffraction Interferometer

Zhu Wenhua Chen Lei Li Jinpeng Zheng Donghui Zhou Binbin

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

Abstract In order to study the effect which the lateral and axial defocus of pinhole have on diffraction intensity and reference wavefront quality in point diffraction interferometer, a mathematical model of convergent beam diffracted by a pinhole is established based on Fresnel diffraction theory. A novel method is proposed which combines the diffraction intensity with the peak value of diffraction wavefront error to analyze the wavefront diffracted by pinhole. F number of the converging beam and diameter of the pinhole are also taken into consideration. The results show that either diffraction intensity or reference wavefront error varies in inverse proportion to the F number of converging beam. The amount of lateral defocus should be less than the difference value of the radius of Airy disk and the pinhole. The acceptable value of lateral defocus is directly proportional to the wavelength and F number while being inversely proportional to the pinhole's diameter. With the beam F number of 10 and the lateral defocus ranging from 0 to $35\ \mu\text{m}$, the pinhole with a diameter less than $1\ \mu\text{m}$ can satisfy the requirement that the peak valley (PV) value of wavefront error should be less than 0.1λ . The reference wavefront intensity can be changed by adjusting the axis defocus. The smaller the diameter of the hole is, the more sensitive the change is. A pinhole with a diameter less than the radius of Airy disk can make sure that the peak value of diffraction wavefront error is less than 0.01λ and the test wavefront intensity should be controlled around one tenth of the effective diffraction intensity of the pinhole. The simulation results provide a theoretical basis and data reference for the design of point diffraction interferometer and its accuracy analysis.

Key words diffraction; point diffraction interferometer; diffraction intensity; diffraction wavefront error; defocus

OCIS codes 120.3180; 050.1940; 220.1140; 220.4840

收稿日期: 2014-12-30; 收到修改稿日期: 2015-01-14; 网络出版日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(U1231111)

作者简介: 朱文华(1992—),男,博士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: mlwdjq@163.com

导师简介: 陈磊(1964—),男,博士,教授,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(通信联系人)

1 引言

1933年, Linnik^[1]首先提出了采用点源衍射产生的球面波代替传统干涉仪中的参考元件。1974年, Smartt等^[2]再次将其应用于光学测量中,它的主要特点在于不需要使用参考球面而使用针孔衍射产生的近乎理想的球面波作为参考波面,理论上可以实现极高精度的波面误差检测,正是由于这个特点,点衍射干涉仪受到了广泛的研究与应用^[3-11]。点衍射干涉仪的两个主要的误差来源是参考波面误差和系统的几何结构产生的误差,在几何结构产生的误差能被精确测量时,可被完全消除,但参考波面的误差却难以消除^[12],所以各种点衍射干涉仪的重要误差来源都是针孔衍射产生参考波面的误差,即衍射波面相对于标准球面的偏离^[13]。参考波面的误差主要与产生它的针孔直径、形状、位置、几何缺陷与入射波前所包含的像差有关。除此之外,针孔的衍射光强度也是点衍射干涉仪中的一个关键因素,它决定了干涉图的质量,影响针孔衍射光强度的主要因素是针孔的直径与离焦。

国内外学者对影响针孔衍射波面质量与光强的多种误差源及影响已进行过大量分析。Otaki等^[14-15]最早并较全面地分析了针孔直径、针孔形状误差、针孔对准误差、针孔基板表面粗糙度、会聚透镜波像差等误差源对衍射波面的影响。国内学者主要集中于分析理想情况下不同针孔直径对衍射波面的影响^[16-21],许嘉俊等^[22]分析了不同膜层厚度下,针孔直径变化引起的衍射波面偏离球面的误差,褚光^[23]研究了波长量级针孔的直径因素对衍射光强度分布的影响,邵晶^[24]基于扩展奈波尔-泽尼克理论,分析并获得针孔衍射光强度与衍射波前的函数关系。通过综合比较各分析结果可知:针孔形状偏差及离焦是影响衍射波面质量的两项最主要的误差源,且若改用先进的针孔刻蚀工艺将针孔形状误差控制在30 nm以内,则针孔形状偏差引入的衍射波面误差将在 $10^{-4}\lambda$ 量级^[25],针孔离焦即成为最不确定、也是最主要的误差源,同时这也影响着衍射光强度的分布。因此,不同离焦量下的衍射光强度与波面误差分析显得尤为重要。

目前对于衍射波面误差的各种分析基本都是平面波入射条件下衍射波前的标量或矢量分析,没有分析衍射光束的光强分布^[14-25]。另一方面,在平面波入射条件下,无需考虑针孔的横向与轴向离焦问题,而在会聚光入射条件下,必须考虑这些问题。本文基于菲涅尔标量衍射理论,通过建立存在离焦时会聚光束经针孔衍射的数学模型,分析比较了针孔在无离焦、存在横向离焦与轴向离焦情况下的衍射光强度分布与波面误差,在分析中引入会聚光束 F 数变量,获得了不同直径针孔在不同离焦下的衍射光强度与波面误差分布数据。

2 理论建模

建立针孔衍射数学模型如图1所示,入射的平面波经过出瞳直径为 D 光学系统后形成球面波会聚到位于光学系统焦面的衍射板上,经衍射板上的针孔衍射形成参考球面波。整个光场传播过程分为以下三个步骤:

1) 推导焦平面上的光场分布函数。设入射波为 $U_1 = 1$,则经过透镜后的光场为

$$U_1(x, y) = P(x, y) \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2f}\right], \quad (1)$$

式中 $P(x, y) = \text{circ}\left[\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{D/2}\right]$, f 为透镜焦距, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为波长, D 为透镜直径。

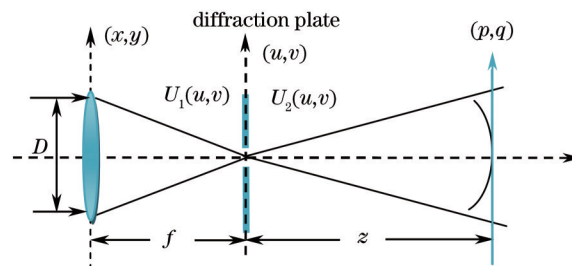


图1 针孔衍射数学模型示意图

Fig.1 Schematic of the pinhole diffraction mathematical model

光波经过透镜后,根据菲涅尔子波叠加原理,将孔径内的光场分割成若干个次级子波源,则透镜后 $z = f + z_0$ 处的光场可以表示为:

$$U_1(u,v) = \frac{\Delta x \Delta y}{4i\lambda} \sum_{x,y \in P} \frac{\exp\left[ik\left(l_1 - \frac{x^2 + y^2}{2f}\right)\right]}{l_1} \left(3 + \frac{f+z_0}{l_1}\right), \quad (2)$$

式中 z_0 为轴向离焦距离, Δx 与 Δy 分别表示 x 与 y 方向的采样间隔 $l_1 = \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + (f+z_0)^2}$ 。

2) 令针孔直径为 d , 则点衍射板后表面波前复振幅分布为

$$U_2(u,v) = U_1(u,v) \times T(u,v), \quad (3)$$

式中 $T(u,v) = \text{circ}\left\{\frac{\left[(u-h_x)^2 + (v-h_y)^2\right]^{1/2}}{\frac{d}{2}}\right\}$ 是点衍射板的透射率, h_x 与 h_y 分别表示针孔中心相对于光轴在 x 与 y 方向的偏差, 即横向离焦。

3) 经过圆孔后的衍射再次运用菲涅耳子波叠加原理, 图2中, 衍射板后以点衍射板针孔中心为圆心半径为 R 的球面上任意点 P_1 的参考光复振幅 $U(p,q,z)$ 可以表示为:

$$U(p,q,z) = \frac{\Delta p \Delta q}{4i\lambda} \sum_{u,v \in T} U_2(u,v) \frac{\exp(ikl_2)}{l_2} \left(3 + \frac{z}{l_2}\right), \quad (4)$$

式中 Δp 与 Δq 分别表示 x 与 y 方向的采样间隔, $l_2 = \sqrt{(u-p)^2 + (v-q)^2 + z^2}$, $R = \sqrt{u^2 + v^2 + z^2}$ 。利用反正切函数即可求得 P_1 点相位值

$$\varphi_{p_1} = \arctan\left[\frac{\text{Im}(U)}{\text{Re}(U)}\right], \quad (5)$$

式中 $\text{Im}(U)$ 与 $\text{Re}(U)$ 分别表示取虚部与取实部函数。

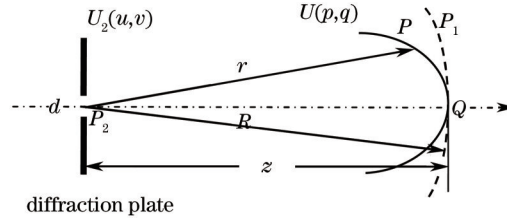


图2 针孔衍射波面示意图

Fig.2 Schematic of the pinhole diffraction wavefront

根据 P_1 点的参考光复振幅, 首先对波前误差进行分析。图2中, 实线表示针孔衍射波前, 虚线表示理想的球面波。取顶点 Q 为等相位点, 则衍射波前与理想球面的偏差可以等效为衍射波面上点 P 与理想球面点 P_1 的距离。当仅考虑光程的误差值小于一个波长时, 可将该误差值用理想球面 P 处的衍射波面相位与标准球面顶点 Q 相位的差值表示, 若误差值大于一个波长, 可利用对其进行相位解包后再计算。由几何关系可得衍射波面上任意点 P 的坐标

$$\begin{cases} x_p = p - \frac{\lambda p}{2\pi R} \left\{ \arctan\left[\frac{\text{Im}[U(0,0,R)]}{\text{Re}[U(0,0,R)]}\right] - \arctan\left[\frac{\text{Im}[U(p,q,z)]}{\text{Re}[U(p,q,z)]}\right] \right\} \\ y_p = q - \frac{\lambda q}{2\pi R} \left\{ \arctan\left[\frac{\text{Im}[U(0,0,R)]}{\text{Re}[U(0,0,R)]}\right] - \arctan\left[\frac{\text{Im}[U(p,q,z)]}{\text{Re}[U(p,q,z)]}\right] \right\} \\ z_p = z - \frac{\lambda z}{2\pi R} \left\{ \arctan\left[\frac{\text{Im}[U(0,0,R)]}{\text{Re}[U(0,0,R)]}\right] - \arctan\left[\frac{\text{Im}[U(p,q,z)]}{\text{Re}[U(p,q,z)]}\right] \right\} \end{cases}, \quad (6)$$

为了评价经针孔衍射波面的质量, 使用最小二乘法对(6)式表示的波面进行球面拟合, 拟合的波面与衍射波面的残差即为衍射波前误差。

其次对衍射光强进行分析, 到达焦面上的总光强为 $I_0 = \sum |U_1(u,v)|^2$, 则针孔衍射的光强占总光强的比例

为 $t_1 = \sum |U_2(u,v)|^2 / I_0$ 。然而针孔衍射的光场中,只是与测试光 F 数相同的那部分光被用来产生干涉,根据(4)式可以求得衍射板后一定距离 z 处任意点 P 的光强 $I(p,q,z) = |U(p,q,z)|^2$,从而可得针孔内有效光强占针

孔衍射光强的比例为 $t_2 = \frac{\sum_{\text{within } F \text{ number}} I(p,q,z)}{\sum |U_2(u,v)|^2}$,所以针孔内有效光强占总光强的比例为

$$t = t_1 t_2 = \frac{\sum_{\sqrt{p^2+q^2} \leq Fz/2} |U(p,q,z)|^2}{\sum_{\infty} |U_1(u,v)|^2} \quad (7)$$

3 针孔衍射光强与波面误差分析

3.1 无离焦时针孔衍射光强与波面误差分析

根据图1所示衍射光路,分析针孔不存在离焦时,会聚光束 F 数与针孔直径对衍射光强与波面误差的影响。分别取 $F=10, 5, 3, 2$,在入射光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的条件下,分析针孔直径与有效衍射光强、衍射波面误差之间的关系如图3所示。由于采用标量衍射理论分析,故针孔直径在 $1 \mu\text{m}$ 以上时计算结果是合理的。针孔直径的取值范围为 $1 \sim 13 \mu\text{m}$ 。

图3(a)和(b)表明,针孔有效衍射光强比例与波面PV值总体上均随针孔直径的增大而迅速增大,当针孔直径小于艾里斑直径时,针孔直径相同时,会聚光束 F 数越大,衍射光强度与波面峰谷(PV)值均越小。当 $F > 2$,针孔直径等于艾里斑半径时,衍射光强比例约为35%;直径与艾里斑直径相同的针孔仍然有优于 $10^{-5} \lambda$ 的精度,说明针孔衍射波面具有极高精度,完全可满足检测精度需求,同时也验证了利用点衍射法可获得近似理想球面波这一理论的正确性。

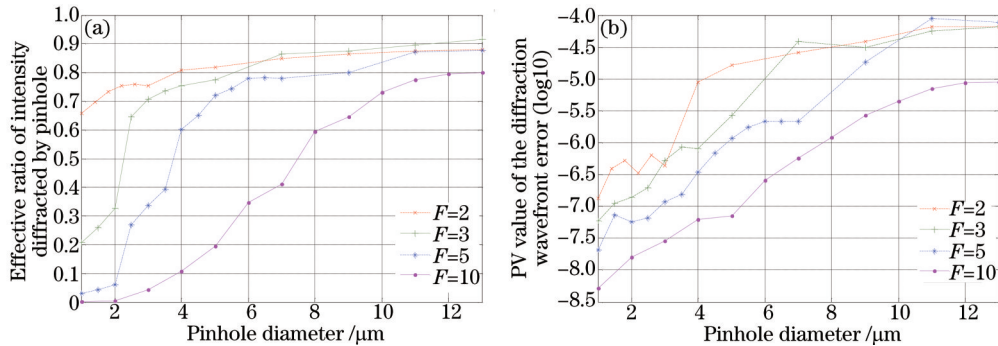


图3 针孔直径与有效衍射光强、波面误差关系。(a) 针孔有效衍射光强比例;(b) 衍射波面误差PV值

Fig.3 Relationship between the pinhole diameter and the effective diffraction intensity, wavefront error.

(a) Effective ratio of intensity diffracted by pinhole; (b) PV value of the diffraction wavefront error

3.2 横向离焦时针孔衍射光强与波面误差分析

由上节分析可知针孔无离焦时,艾里斑直径内的针孔衍射球面波均可达到很高的精度,然而在实际的调整过程中针孔与艾里斑中心难免产生离焦。首先分析其横向离焦的影响。在会聚光束 $F=10$ 的情况下,取针孔直径 d 分别为 $1, 4, 6.5 \mu\text{m}$,考虑针孔具有旋转对称性,故取 x 方向横向离焦范围是 $0 \sim 35 \mu\text{m}$,得到横向离焦与有效衍射光强、误差关系如图4所示。

图4(a)表明针孔有效衍射光强比例随横向离焦增大总体趋势迅速减小,但并不是单调的,其中存在周期性起伏。观察其各极小值所对应的横向离焦距离,容易发现恰好对应着艾里斑各级暗环的半径。以针孔直径 $4 \mu\text{m}$,横向离焦 $11.82 \mu\text{m}$ (艾里斑二级暗环)为例,仿真出针孔内的光强如图5所示。可以发现针孔横向离焦至艾里斑暗环位置时,针孔内的光强将变得很小。

此外,从图4(b)中可以发现横向离焦对衍射波面的影响是巨大的。仅 $1 \mu\text{m}$ 的针孔可以满足 $0 \sim 35 \mu\text{m}$ 横向离焦范围内波面误差PV值小于 0.1λ 。观察可以发现图中的各个峰值也对应着艾里斑各暗环的半径,可得衍射波的质量与针孔内光强分布有关,若针孔内的光强反差很大,将使得衍射波的质量变得很差。因

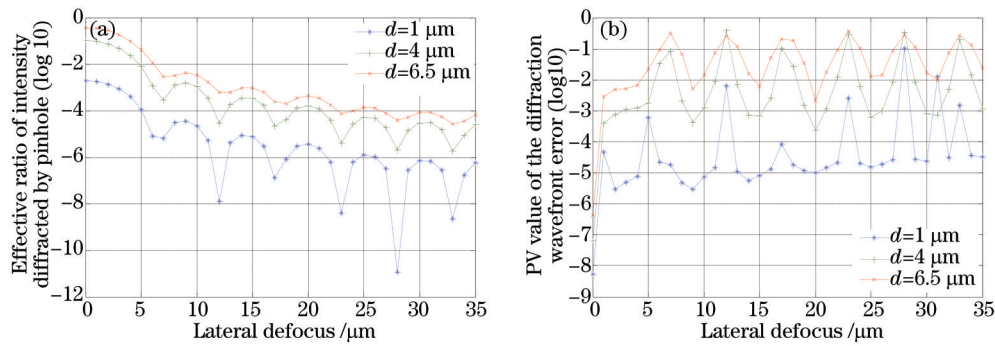


图4 横向离焦与有效衍射光强、波面误差关系。(a) 针孔有效衍射光强比例; (b) 衍射波面误差 PV 值

Fig.4 Relationship between the lateral defocus and the effective diffraction intensity, wavefront error.

(a) Effective ratio of intensity diffracted by pinhole; (b) PV value of the diffraction wavefront error

此,为了保证衍射波的质量和光强,应使针孔全部位于中央艾里斑内。即横向离焦的距离满足 $h \leq 1.22\lambda F - d/2$,从中还可以发现,横向离焦的允许范围与波长和 F 数成正相关,与针孔直径成负相关。

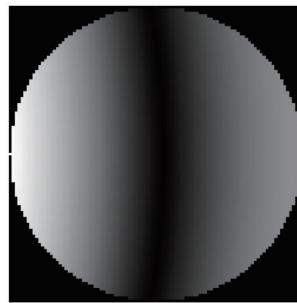


图5 横向离焦 11.82 μm 后 4 μm 针孔内光强示意图

Fig.5 Schematic of the light intensity within 4 μm hole which has lateral defocus 11.82 μm

3.3 轴向离焦时针孔衍射光强与波面误差分析

其次,分析轴向离焦对衍射光强与波面误差的影响。仍以上节针孔为例,由于载频条纹数过多会影响干涉图求解的精度,而根据波像差理论公式^[26],干涉图中圆条纹数对应的轴向离焦距离 $z = 8m\lambda F^2$,其中 m 为条纹数。故取轴向离焦的范围从 0~10 根条纹所对应的距离,即 0~4.25 mm。在 $F=10$ 条件下,仿真得到轴向离焦与有效衍射光强、误差关系如图 6 所示。

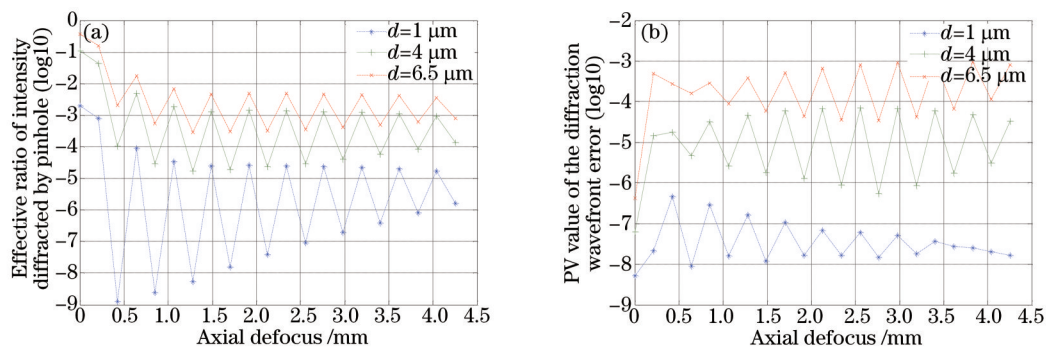


图6 轴向离焦与有效衍射光强、波面误差关系。(a) 针孔有效衍射光强比例; (b) 衍射波面误差 PV 值

Fig.6 Relationship between the axial defocus and the effective diffraction intensity, wavefront error.

(a) Effective ratio of intensity diffracted by pinhole; (b) PV value of the diffraction wavefront error

图 6(a)表明随轴向离焦的增大,衍射光强震荡变化,这意味着可以通过调整轴向离焦来调整参考光的光强,从而改变干涉图的对比度,并且针孔直径越小变化越剧烈,直径等于艾里斑半径的针孔基本在 2 个数量级以内震荡,而选择直径 1 μm 的针孔,其光强变化超过 3 个数量级,并且轴向离焦在 0~0.425 mm 范围变化时,光强衰减最大,此时直径 1 μm 的针孔的光强已经衰减到了 $10^{-9}\lambda$ 量级了,为了获取好的干涉图,这对点衍射板的设计要求将变的极高,并且杂散光的影响将变得很大,因此选用直径 1 μm 以上的针孔较为合适。图 6(b)表明针孔衍射波面误差也随轴向离焦的增大呈震荡变化。并且在 0~0.425 mm 离焦范围内增加

多个数量级,但针孔的直径越小,震荡的幅度越小,并且对于直径为艾里斑半径大小的针孔,仍然能够保证 $10^{-2}\lambda$ 以上的精度。

进一步考虑到轴向离焦距离在 0.425 mm 附近时,衍射波面误差最大,取针孔直径为艾里斑半径,轴向离焦距离为 0.425 mm,会聚光束 F 数从 1~10 变化,仿真得到 F 数与衍射波面误差关系如图 7 所示。容易发现随着会聚光束 F 数的增大,衍射波前 PV 值先变小,后震荡变化, F 数为 1 时,PV 值最大为 $10^{-3}\lambda$ 量级,仍可保证较高的精度。

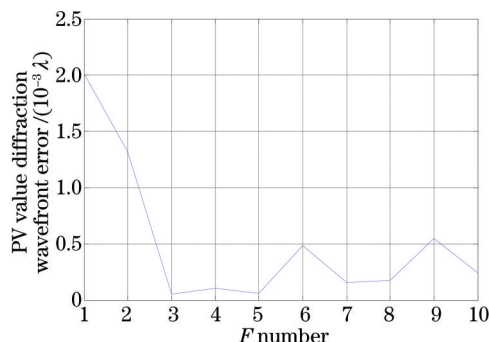


图 7 F 数与衍射波面误差关系

Fig.7 Relationship between F number and the diffraction wavefront error

此外,结合图 6(a)和(b)可以发现衍射光强的变化规律与波前误差的变化规律恰好相反,即当衍射光强取到一个极值时,对应波前误差取到一个相反的极值,并且其震荡变化周期与轴上点的强度分布^[27]周期一致,验证了仿真的正确性。

综上所述,针孔直径的选择小于艾里斑半径较好,以保证衍射波前误差 PV 值小于 $10^{-2}\lambda$,测试光的强度控制在图 3 所示针孔有效衍射光强的 1/10 附近,以保证较好的干涉图对比度。

4 结 论

基于菲涅耳标量衍射理论建立了存在离焦时会聚光束经针孔衍射的严格数学描述,分析比较了理想无离焦情况和存在横向离焦与轴向离焦情况下的针孔衍射光强度与衍射波面误差 PV 值分布。得出以下结论:

1) 理想情况下,针孔直径确定后,会聚光束 F 数越大,衍射光强度与波面误差均越小。当 $F > 2$,针孔直径等于艾里斑半径时,衍射光强比例约为 35%;直径与艾里斑直径相同的针孔仍然有优于 $10^{-5}\lambda$ 的精度。

2) 存在横向离焦时,针孔有效衍射光强比例随横向离焦增大高频振荡。其极小值对应着艾里斑各级暗环的半径。在 $F=10$ 条件下,直径 $1\ \mu\text{m}$ 以下的针孔可以满足 $0\sim 35\ \mu\text{m}$ 横向离焦范围内波面误差 PV 值小于 0.1λ 。为了保证衍射波的质量和光强,应保证横向离焦的距离满足 $h \leq 1.22\lambda F - d/2$ 。横向离焦的允许范围与波长和 F 数成正相关,与针孔直径成负相关。

3) 存在轴向离焦时,可以通过调整轴向离焦来调整参考光的强度,从而改变干涉图的对比度,并且针孔直径越小调整越灵敏,选择直径小于艾里斑半径的针孔较好,以保证衍射波前误差 PV 值小于 $10^{-2}\lambda$,测试光的强度控制在图 3 所示最大针孔衍射光强的 1/10 附近。

通过该研究可为会聚透镜、针孔的选取、点衍射板的设计、针孔离焦的调整及针孔衍射波面误差的估计提供重要参考数据。

参 考 文 献

- 1 Linnik V P. Simple interferometer for the investigation of optical systems[J]. CR Acad Sci USSR, 1933, 1: 208-210.
- 2 Smartt R N, Strong J. Point-diffraction interferometer[J]. J Opt Soc Amer, 1972, 62: 734-737.
- 3 Wang D, Wang F, Zou H, et al. Analysis of diffraction wavefront in visible-light point-diffraction interferometer[J]. Appl Opt, 2013, 52(31): 7602-7608.
- 4 Wang D, Chen X, Xu Y, et al. High-NA fiber point-diffraction interferometer for three-dimensional coordinate measurement [J]. Opt Express, 2014, 22(21): 25550-25559.
- 5 Park R, Kim D W, Barrett H H. Synthetic phase-shifting for optical testing: Point-diffraction interferometry without null optics or phase shifters[J]. Opt Express, 2013, 21(22): 26398-26417.

- 6 Du Y, Feng G, Li H, *et al.*. Circular common-path point diffraction interferometer[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(19): 3927–3929.
- 7 García A, Gómez M, Acosta E. Optical pressure sensor based on the combined system of a variable liquid lens and a point diffraction interferometer[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(7): 905–911.
- 8 Ramírez C, Otón E, Iemmi C, *et al.*. Point diffraction interferometer with a liquid crystal monopixel[J]. *Opt Express*, 2013, 21(7): 8116–8125.
- 9 Guo R, Yao B, Gao P, *et al.*. Parallel on-axis phase-shifting holographic phase microscopy based on reflective point-diffraction interferometer with long-term stability[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(15): 3484–3489.
- 10 Wang D, Yang Y, Chen C, *et al.*. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(16): 2342–2348.
- 11 Akondi V, Jewel A R, Vohnsen B. Digital phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(6): 1641–1644.
- 12 Patrick N, Kenneth A G, Sang H L, *et al.*. The EUV phase-shifting point diffraction interferometer[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2000: 66–72.
- 13 Patrick Naulleau, Kenneth Goldberg, Sang Lee, *et al.*. Characterization of the accuracy of EUV phase-shifting point diffraction interferometer[C]. *SPIE*, 1998, 3331: 114–123.
- 14 Otaki K, Ota K, Nishiyama I, *et al.*. Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: design, fabrication, and evaluation[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2002, 20(6): 2449–2458.
- 15 Otaki K, Zhu Y, Ishii M, *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL [C]. *SPIE*, 2004, 5193: 182–190.
- 16 Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo, *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2321–2324.
马 强, 刘伟奇, 李香波, 等. 点衍射干涉仪中针孔衍射波面误差分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2321–2324.
- 17 Gao F, Jiang Z, Li B. Diffraction wavefront analysis of point diffraction interferometer for measurement of aspherical surface[C]. *SPIE*, 2010, 7656: 76565Y.
- 18 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao, *et al.*. Wave-front quality analysis of three-dimension pinhole vector diffractive in extreme ultraviolet region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2849–2854.
卢增雄, 金春水, 张立超, 等. 极紫外三维针孔矢量衍射波面质量分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2849–2854.
- 19 Wang Ruilin, Zhang Lixia, Xing Tingwen. Scalar and vector analysis of diffraction wave with different pinhole diameter [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(6): 58–61.
王瑞林, 张丽霞, 邢廷文. 不同针孔直径下衍射波面的标量和矢量分析[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(6): 58–61.
- 20 Wang Ruilin, Xing Tingwen, Xie Weimin. Analysis of diffractive wave-front of 3-D pinhole under visible light[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(3): 382–385.
王瑞林, 邢廷文, 谢伟民. 可见光下3维针孔的衍射波面分析[J]. *激光技术*, 2012, 36(3): 382–385.
- 21 Chen Chen, Yang Yongying, Wang Daodang, *et al.*. Analysis of point-diffraction wavefront error based on finite difference time domain method[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0908003.
陈 琛, 杨甬英, 王道档, 等. 基于时域有限差分方法的点衍射波前误差分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0908003.
- 22 Xu Jiajun, Xing Tingwen. Analysis of two-dimensional pinhole vector diffraction in visible light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1205003.
许嘉俊, 邢廷文. 可见光二维小孔矢量衍射分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1205003.
- 23 Chu Guang. Study on the Effects by the Pinhole to the Distribution of Diffraction Intensity in Point Diffraction Interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
褚 光. 点衍射干涉仪中小孔尺寸对衍射光强分布影响的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- 24 Shao Jing. Study on Evaluating the Criterion Wavefront in Point Diffraction Interferometer[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences), 2013.
邵 晶. 点衍射干涉仪基准波前质量测评研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
- 25 Ota K, Yamamoto T, Fukuda Y, *et al.*. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors[C]. *SPIE*, 2001, 4343: 543–550.
- 26 Wyant J C, Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology[J]. *Applied Optics and Optical Engineering*, 1992, 11(s29).
- 27 Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.