

不同对准误差下的小孔衍射波面误差分析

高 芬^{1,2} 蒋庄德¹ 李 兵^{1*}

(¹ 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)
(² 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要 点衍射干涉仪中小孔对准误差是影响衍射参考波面质量最主要的误差源。基于瑞利索末菲矢量衍射理论,建立了非傍轴高斯光束经小孔衍射的严格数学描述,对不同对准误差下的小孔衍射波面误差进行了分析,在分析中特别考虑了会聚光斑大小的影响。研究表明:小孔对准误差的引入使得衍射波面偏差迅速增大,且衍射波面偏差随对准误差的增大呈线性增长;相同对准误差下,衍射波面偏差随会聚光斑半径的增大而减小,要获得同等衍射波面偏差,允许的对准误差随会聚光斑的增大呈近同倍数增长。给出了 $0.5\sim 3\ \mu\text{m}$ 小孔在不同会聚光斑直径和小孔对准误差下的衍射波面误差分布数据,研究结果可为点衍射干涉仪中会聚透镜的选取、小孔对准精度要求的确定以及小孔衍射波面误差的估计提供重要参考数据。

关键词 测量;点衍射干涉仪;衍射波面;对准误差;误差分析

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0812004

Analysis of Diffraction Wavefront Error Caused by Alignment Error of Pinhole

Gao Fen^{1,2} Jiang Zhuangde¹ Lin Bing¹

¹ State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

² School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China

Abstract Alignment error of the pinhole is the main error factor that affects the quality of diffraction reference wavefront in a point diffraction interferometer. Based on Rayleigh-Sommerfeld vector diffraction theory, a theoretical model of non-paraxial Gaussian beams diffracted through a pinhole is established, and diffraction wavefront error caused by different alignment errors is numerically analyzed. The influence of focusing spot size is especially considered. The research results show that the introduction of even a small alignment error can make the diffraction wavefront error increases quickly, diffraction wavefront error increases linearly as the alignment error increases; under same alignment error, the bigger the focusing spot size, the smaller the diffraction wavefront error. In order to reach the same level of diffraction wavefront accuracy, the allowable alignment error increases nearly in same multiples as the focusing spot size increases. Diffraction wavefront error distribution of $0.5\sim 3\ \mu\text{m}$ pinholes in different spot size and alignment error are acquired in the analysis, it can provide favorable reference data for the selection of focusing lens, determination of pinhole alignment accuracy requirements and the evaluation of diffraction wavefront error in certain condition.

Key words measurement; point diffraction interferometer; diffraction wavefront; alignment error; error analysis

OCIS codes 120.3180; 050.1940; 220.1140; 220.4840

收稿日期: 2014-03-10; 收到修改稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(51275398, 90923001)、教育部科学技术研究重大项目(311001)、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2011ZX04004-061)、高等学校学科创新引智计划(B12016)、长江学者和创新团队发展计划(IRT1033)

作者简介: 高 芬(1980—),女,博士研究生,讲师,主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail: gaofen8128@163.com

导师简介: 蒋庄德(1955—),男,博士,教授,主要从事微纳技术、超精密加工与检测等方面的研究。

E-mail: zdjiang@mail.xjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lb@mail.xjtu.edu.cn

1 引 言

点衍射干涉测量法是近年来为满足激光核聚变、极紫外光刻等领域对球面和非球面镜超精面形检测需求而发展起来的一种新方法,该方法通过微米尺寸小孔的衍射产生近似理想的球面波作为参考面,代替传统球面干涉仪中的标准实物镜头,所构成的点衍射干涉仪^[1-6](PDI),理论上可达到亚纳米级检测精度。由于PDI的面形检测精度主要依赖于衍射参考波面精度,而衍射参考波面又受小孔尺寸、形状、小孔对准误差、针孔基板表面粗糙度、会聚透镜波像差等多种误差源的影响,在实际点衍射干涉测量系统研究中首先必须对小孔衍射参考波面误差源及影响进行分析,探讨出获得大范围、高质量衍射波面所需条件,再具体探讨可满足检测精度需求的微米尺寸小孔的实现及实际系统的设计问题。

目前国内外学者对影响小孔衍射波面质量的各种误差源及影响已进行过大量分析^[3,7-17]。国外 Otaki 等^[3,7]最早并较全面地分析了小孔直径、小孔形状误差、小孔对准误差、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。国内主要集中于分析理想情况下不同小孔尺寸(直径)对衍射波面的影响^[8-13]。此外,卢增雄等^[14-15]分析了小孔形状误差和照明物镜像差的影响,许嘉俊等^[16-17]分析了小孔形状误差和对准误差的影响。通过综合比较各误差源及影响的分析结果可知:小孔形状误差及对准误差是影响衍射波面质量的两项最主要的误差源,若改用先进的小孔刻蚀工艺将小孔形状误差控制在 30 nm 以内,则小孔形状误差引入的衍射波面误差将在 $10^{-4} \lambda$ 量级^[2],小孔对准误差即成为最不确定、也是最主要的误差源。因此,不同对准误差下的衍射波面误差分析显得尤为重要。

实际 PDI 系统中,会聚透镜参数选择不同,入射激光高斯光束在小孔平面上聚焦的光斑直径不同,同等其他条件下产生的衍射波面偏差也将不同,因此严格的衍射波面误差分析中还需考虑小孔入射平面上会聚高斯光束束腰半径(会聚光斑半径)大小的影响。目前国内对于衍射波面误差的分析^[7-16]基本是考虑平面波近似入射下的标量或矢量分析,不适用于分析小孔对准误差的影响,文献^[17]也仅通过将积分线区域外扩为针孔直径的 2 倍对小孔对准引入的衍射波面误差进行了分析,而国外 Otaki 等^[3]也仅考虑了会聚光斑大小一定的情况下 0.5、1.1.5 μm 小孔的衍射波面偏差随对准误差变化关系。为此,本文基于瑞利索末菲矢量衍射理论,建立了非傍轴高斯光束经小孔衍射的严格数学描述,仿真分析了不同直径小孔在不同对准误差下的衍射波面误差分布,在分析中引入了会聚光斑直径变化的影响,获得了不同直径小孔在不同会聚光斑直径和小孔对准误差下的衍射波面误差分布数据,通过研究可为实际点衍射干涉仪的设计提供重要参考数据。

2 理论建模

激光高斯光束入射下的小孔衍射模型如图 1 所示, $z=0$ 平面上的小孔衍射板上开有半径为 a 的小圆孔,单色线偏振正入射高斯光束经会聚透镜聚焦至小孔衍射板上,光束束腰位于 $z=0$ 的小孔平面,束腰半径为 w_1 ,小孔入射平面(x_1y_1 平面)上的矢量场 $\mathbf{E}_1(x_1, y_1, 0)$ 在 x_1, y_1 方向的分量可表示为

$$\begin{cases} E_{1x}(x_1, y_1, 0) = \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2w_1^2}\right) \\ E_{1y}(x_1, y_1, 0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

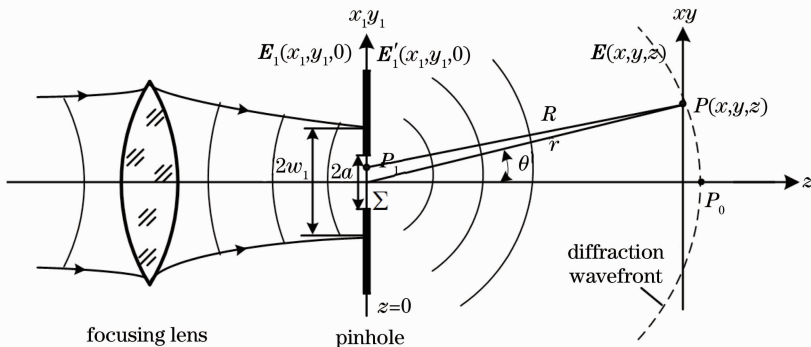


图 1 高斯光束入射下的小孔点衍射模型

Fig. 1 Point diffraction model under the incidence of Gaussian beam

则小孔出射平面上的光场分布 $E'_1(x_1, y_1, 0)$ 可表示为

$$\begin{cases} E'_{1x}(x_1, y_1, 0) = t(x_1, y_1) \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2w_1^2}\right), \\ E'_{1y}(x_1, y_1, 0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $t(x_1, y_1)$ 为衍射板透射系数, $t(x_1, y_1) =$

$$\text{circ}\left(\frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{a}\right) = \begin{cases} 1, & \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq a \\ 0, & \sqrt{x_1^2 + y_1^2} > a \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_x(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} E'_{1x}(x_1, y_1, 0) \frac{\exp(ikR)}{R} \left(ik - \frac{1}{R}\right) \left(-\frac{z}{R}\right) dx_1 dy_1 \\ E_y(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} E'_{1y}(x_1, y_1, 0) \frac{\exp(ikR)}{R} \left(ik - \frac{1}{R}\right) \left(-\frac{z}{R}\right) dx_1 dy_1 \\ E_z(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} [E'_{1x}(x_1, y_1, 0)(x - x_1) + E'_{1y}(x_1, y_1, 0)(y - y_1)] \frac{\exp(ikR)}{R^2} \left(ik - \frac{1}{R}\right) dx_1 dy_1 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波波长, R 为 P_1 和 P 两点距离, $R = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2}$.

(3)式即为精确矢量形式的瑞利-索末菲衍射积分公式,利用该公式可精确求解出 $z > 0$ 衍射空间的场分布,但要对该式直接进行积分精确求解比较困难。考虑到 $R \gg \lambda$ 时,在非傍轴近似下一般可对 R 进行泰勒级数展开,并取前两项近似,则可得到非傍轴近似条件下线偏振高斯光束经小孔衍射的矢量场数学描述

$$\begin{cases} E_x(x, y, z) = -\frac{iz}{\lambda r} \frac{\exp(ikr)}{r} \iint_{\Sigma} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2w_1^2}\right) \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2 - 2xx_1 - 2yy_1}{2r}\right) dx_1 dy_1 \\ E_y(x, y, z) = 0 \\ E_z(x, y, z) = \frac{i}{\lambda r} \frac{\exp(ikr)}{r} \iint_{\Sigma} \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{2w_1^2}\right) (x - x_1) \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2 - 2xx_1 - 2yy_1}{2r}\right) dx_1 dy_1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 r 为 P 至小孔中心的距离, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

考虑到在小孔衍射中央亮斑(艾里斑)限定的数值孔径范围内衍射波面误差一般小于一个波长,对小孔衍射波面偏差的计算可简化为半径为 r 的球面上任意点 P 与中心 P_0 之间的相位差的计算。令 $x = r \sin \theta \cos \varphi$, $y = r \sin \theta \sin \varphi$ 转换至球坐标系进行计算,若 P 点的球坐标为 (r, θ, φ) , P 点相位 $\phi_P = \text{angle}[E(r, \theta, \varphi)]$, P_0 点的相位 $\phi_{P_0} = \text{angle}[E(r, 0, 0)]$, 则衍射波面上任意点 P 相对理想球面的偏差 $\Delta W = (\phi_{P_0} - \phi_P)/(2\pi)$, ΔW 的单位为波长 λ 。

3 仿真分析

3.1 理想小孔衍射波面误差分析

3.1.1 不同直径小孔衍射角及有效数值孔径

当衍射小孔直径很小时,绝大部分能量集中于中央亮斑,此中央亮斑决定了小孔的有效衍射全角

设 P_1 为小孔面域 Σ 内任意一点, P 为 $z > 0$ 衍射空间内任意一点, P 点坐标为 (x, y, z) , 对应的矢量场分布为 $\mathbf{E}(x, y, z) = E_x(x, y, z)\mathbf{i} + E_y(x, y, z)\mathbf{j} + E_z(x, y, z)\mathbf{k}$, 这里 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 方向的单位矢量, 则依据矢量瑞利-索末菲衍射积分公式^[18]有

α 及有效数值孔径 NA 的大小。依据点衍射光路可知,衍射波面被均分成两部分,一半作为测试光,另一半作为参考光,因此可用于测试光路的有效数值孔径(NA_{test}) 为小孔有效数值孔径(NA_{pinhole}) 的一半,被测件数值孔径应不超过 NA_{test} 。图 2 为小孔有

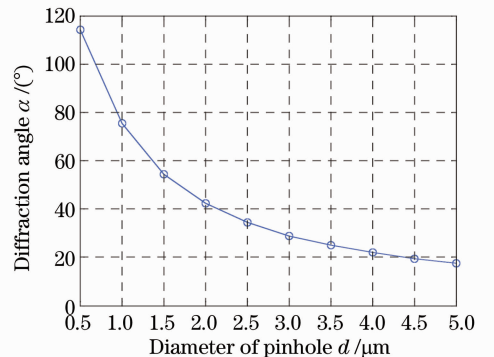


图 2 衍射小孔直径与有效衍射角关系

Fig. 2 Diffraction angle versus pinhole size

效衍射全角 α 随衍射小孔直径 d ($d = 2a$) 的变化关系曲线,图 3 为有效数值孔径 NA 随衍射小孔直径变化关系曲线。

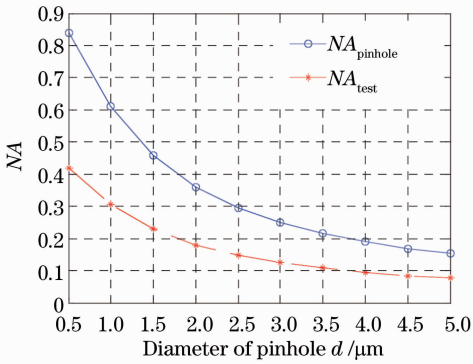


图 3 衍射小孔直径与有效数值孔径关系

Fig. 3 Numerical aperture versus pinhole size

由图 2、3 可知:小孔直径越小其有效衍射全角及数值孔径越大,可用于测试光路的有效数值孔径也越大,当小孔直径为 $1\ \mu\text{m}$ 时, NA_{test} 可达到 0.3,当小孔直径为 $4\ \mu\text{m}$ 时,被测件的数值孔径已不得超过 0.1,对于 $4\ \mu\text{m}$ 以上小孔,其有效衍射范围已非常小,已不具太大的实用价值。考虑到实际

点衍射干涉测量系统中所用小孔的直径一般在 $0.5\sim 3\ \mu\text{m}$ 之间^[3,5],下面主要针对该直径范围内的小孔开展衍射波面误差分析。

3.1.2 不同直径小孔衍射波面误差分布

受点衍射光路布置实际情况的限制,可用于测试的被测件顶点曲率半径一般不会小于 $200\ \text{mm}$,这里取 $r=200\ \text{mm}$ 的衍射球面为研究对象进行衍射波面误差分析。设激光光源波长 $\lambda=632.8\ \text{nm}$,取会聚光斑直径 $2\omega_1$ 等于小孔直径 d ,利用 Matlab 进行数值计算及仿真,得到理想情况下不同直径小孔的波面偏差数据。图 4(a)为小孔衍射波面偏差 ΔW 随小孔数值孔径 NA 变化关系曲线,图 4(b)为小孔有效数值孔径 NA 内衍射波面偏差的峰谷(PV)值随小孔直径变化关系。通过分析可知:衍射小孔直径 d 一定时, NA 越大处衍射波面偏差越大,且接近小孔最大有效 NA 时偏差增长迅速,在边缘处偏差达到最大值;小孔直径越小,小孔波面偏差的 PV 值越小,对于直径 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下小孔,其有效衍射范围内衍射波面偏差的 PV 值均不超过 $10^{-5}\lambda$,说明小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。

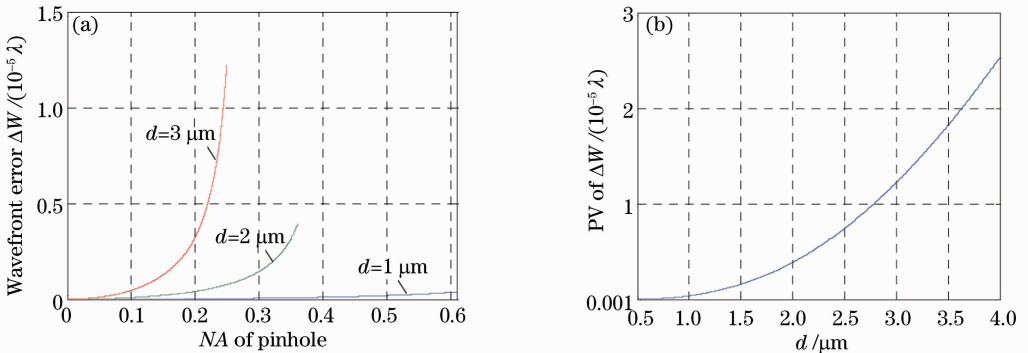


图 4 理想情况下不同直径小孔衍射波面偏差($r=200\text{mm}$, $2\omega_1=d$)。(a)衍射波面偏差随小孔数值孔径变化关系;(b)衍射波面偏差 PV 值随小孔直径变化关系

Fig. 4 Diffraction wavefront error of different pinholes in ideal condition ($r=200\ \text{mm}$, $2\omega_1=d$). (a) Changes of wavefront error along with NA; (b) PV wavefront error of different pinholes

3.2 不同对准误差下的小孔衍射波面误差

3.2.1 小孔对准情况分析

点衍射小孔的对准中可能会存在倾斜对准误差和平移对准误差,如图 5 所示。图 5(b)为存在平移对准误差的情况,该状态下小孔光轴与会聚高斯光束的光轴平行,但在垂直于光轴的小孔平面内存在相对平移,即为离轴高斯光束入射情形,该种情况将引入较大的衍射波面偏差。图 5(c)为存在倾斜对准误差的情况,该状态下小孔衍射光轴与会聚高斯

光束的光轴相对倾斜,该种情况类似于小孔存在椭圆变形,以 $2\ \mu\text{m}$ 的小孔为例,当小孔衍射板倾斜 1° 时,计算得其小孔椭圆尺寸偏差仅为 $0.3\ \text{nm}$,结合对小孔椭圆形状误差影响的分析结果^[9]可知,小孔椭圆形状误差对衍射波面的影响非常小,该倾斜误差对衍射波面质量的影响基本可以忽略。可见,小孔对准误差分析中主要需考虑不同平移对准误差对衍射波面质量的影响。

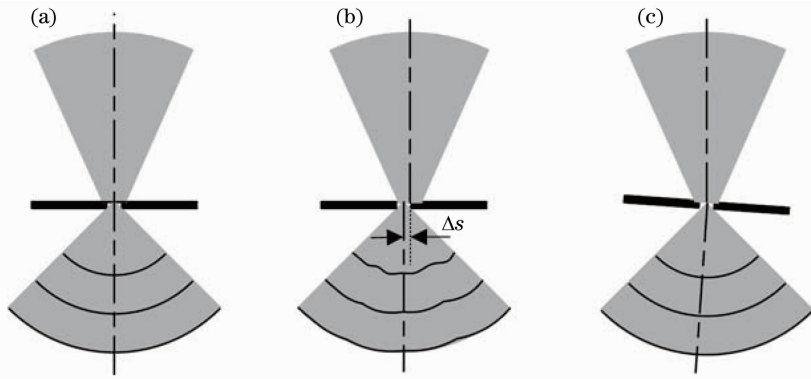


图 5 小孔对准状态示意图。(a)完全对准；(b)存在平移对准误差；(c)存在倾斜对准误差

Fig. 5 Alignment state of pinhole. (a) Alignment completely; (b) with displacement; (c) with tilt

3.2.2 不同对准误差下的衍射波面误差分析

结合可能的小孔对准精度,下面仿真了不同平移对准偏离量 Δs 下不同直径小孔产生的衍射波面偏差。图 6、7 为小孔直径 $2a$ 分别取 $1 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$

时,仿真的不同对准误差下的衍射波面偏差,其中图 6 为不同对准误差 Δs 下,小孔衍射波面偏差随小孔数值孔径 NA 变化关系,图 7 为相同数值孔径 NA 处,小孔衍射波面偏差随对准误差 Δs 变化关系。

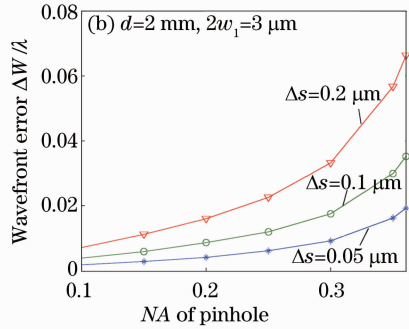
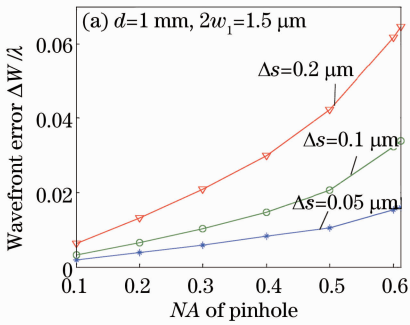


图 6 不同对准误差 Δs 下的小孔衍射波面偏差随 NA 变化关系

Fig. 6 Changes of diffraction wavefront error along with NA in different alignment errors Δs

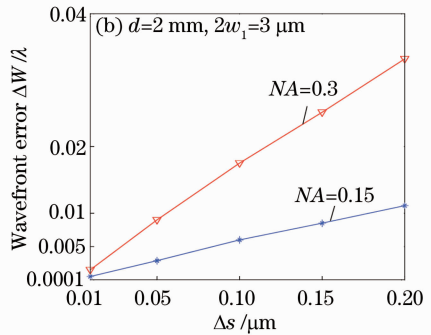
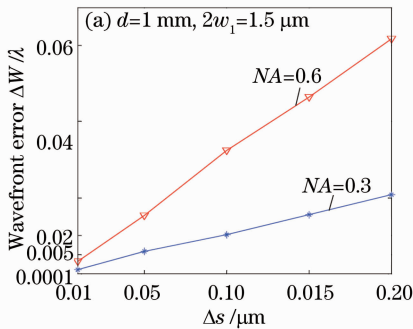


图 7 相同 NA 处衍射波面偏差随对准误差 Δs 变化关系

Fig. 7 Diffraction wavefront error versus alignment error Δs in same NA position

将图 6 与图 4 理想无误差影响下相同直径小孔的衍射波面偏差分析结果进行比较可知:小孔对准误差的引入使得衍射波面偏差迅速增大,对于 $1 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 的小孔, $0.05 \mu\text{m}$ 的对准误差即使得小孔有效数值孔径内衍射波面偏差的 PV 值由原来的 $10^{-5}\lambda$ 以下增大至 $10^{-2}\lambda$ 量级;衍射小孔直径一定时,相同对准误差 Δs 下,小孔衍射波面偏差仍随数

值孔径的增大而增大,在小孔最大数值孔径处取得衍射波面偏差最大值。由图 7 可知:衍射小孔直径一定时,同一数值孔径 NA 处,衍射波面偏差随对准误差 Δs 的增大基本呈线性增长。

上面仿真分析中对于直径 $2a = 1 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 的小孔分别取的会聚光斑直径 $2w_1$ 为 $1.5 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 。实际上相同对准误差下,不同会聚光斑大小

下产生的衍射波面偏差也不同,图 8(a)给出了直径 $2a=1\ \mu\text{m}$ 的小孔在 $NA=0.6$ 处不同对准误差 Δs 和会聚光斑半径 w_1 下的衍射波面偏差比较结果,图 8(b)给出了直径 $2a=2\ \mu\text{m}$ 的小孔在 $NA=0.3$

处不同对准误差 Δs 和会聚光斑半径 w_1 下的衍射波面偏差比较结果,会聚光斑半径 w_1 均取为 $1\sim 4$ 倍小孔半径。

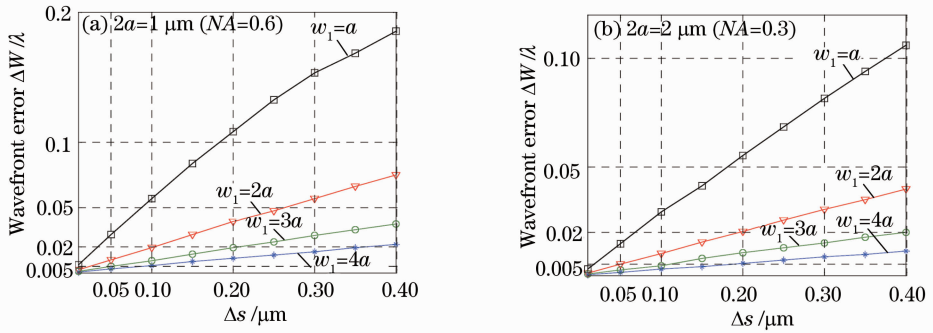


图 8 不同会聚光斑半径 w_1 下衍射波面偏差随对准误差 Δs 变化关系

Fig. 8 Diffraction wavefront error versus alignment error Δs in different focusing spot sizes w_1

从图 8 可以看出:会聚光斑半径 w_1 与小孔半径 a 相等时,将引入极大的衍射波面偏差,对于 $2\ \mu\text{m}$ 的小孔即使仅 $0.05\ \mu\text{m}$ 的对准误差也将使得 $NA=0.3$ 处的衍射面偏差大于 $\lambda/100$,可见有对准误差情况下会聚光斑直径必须大于小孔直径;在相同对准误差 Δs 下,会聚光斑半径 w_1 越大引入的衍射波面偏差越小。以直径 $2\ \mu\text{m}$ 小孔为例,要使 $NA\leq 0.3$ 时的衍射波面偏差均限制在 0.005λ 以内,会聚光斑半径 w_1 为 2 倍小孔半径时允许的对准误差为 $0.05\ \mu\text{m}$,会聚光斑半径为 3 倍小孔半径时允许的对准误差为 $0.1\ \mu\text{m}$,会聚光斑半径为 4 倍小孔半径时允许的对准误差可达 $0.2\ \mu\text{m}$,即要获得同等大小的衍射波面偏差,允许的对准误差随会聚光斑半径的增大呈近同倍数增长。

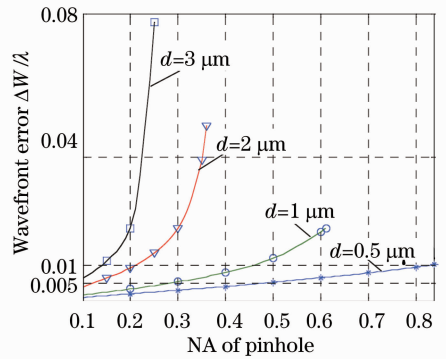


图 9 $2w_1=2d, \Delta s=d/10$ 时不同直径小孔衍射波面偏差分布

Fig. 9 Diffraction wavefront error distribution of different pinholes when $2w_1=2d, \Delta s=d/10$

通过上述仿真分析理论上看似有会聚光斑半径越大对小孔对准误差的许可范围越大,越有利于测试的结果,但在实际小孔对准中会聚光斑越大也越不容易区分是否对准。在实际点衍射干涉测量系统中,为充分利用激光器的光能,同时又允许一定小孔对准误差,会聚光斑直径选在 2 倍小孔直径左右为宜,小孔对准误差以不超过小孔直径的 $1/10$ 为宜,这就要求在小孔会聚透镜的选用时需进行会聚光斑尺寸核算,以确定会聚透镜的技术参数。

达到 0.145 。利用该 $2.5\ \mu\text{m}$ 小孔搭建实际点衍射干涉测量系统,在选用 10 倍显微物镜进行聚焦,并将小孔对准误差控制在 $0.2\ \mu\text{m}$ 以内的实验条件下可估计得在全数值孔径范围内衍射波面误差已接近 $\lambda/20$ (PV 值)。为满足更高精度的检测需求,可通过减小小孔直径、提高小孔对准精度等措施提高衍射参考波面精度。

图 9 给出了小孔直径 d 分别取 $0.5, 1, 2, 3\ \mu\text{m}$, 会聚光斑直径均取 2 倍小孔直径,对准误差取小孔直径的 $1/10$ 时的一组衍射波面误差估计结果。

4 结 论

基于上述分析理论,对实验制作的直径 $2.5\ \mu\text{m}$ 针孔点衍射小孔进行衍射波面分析,可理论计算得小孔的衍射全角约为 34.3° ,可用于测试光路的 NA

基于瑞利索末菲矢量衍射理论建立了非傍轴高斯光束经小孔衍射的严格数学描述,分析比较了理想无误差情况和存在不同小孔对准误差情况下小孔有效数值孔径范围内的衍射波面误差分布。在分析中引入了会聚光斑直径变化的影响,获得了不同直径小孔在不同会聚光斑直径和小孔对准误差下的衍射波面误差分布数据,并得出了如下结论:

1) 理想无误差情况下,小孔直径越小,衍射波面偏差越小,且衍射波面偏差随数值孔径的增大而增大,4 μm 以下小孔衍射波面偏差的 PV 值均不超过 $3 \times 10^{-5} \lambda$,具有极高精度。

2) 小孔对准误差的引入使得小孔衍射波面偏差迅速增大,以 0.5~2 μm 的小孔为例,0.05 μm 的对准误差即使得在小孔有效数值孔径范围内衍射波面偏差的 PV 值由原来的 $10^{-5} \lambda$ 及以下量级增大至 $10^{-2} \lambda$ 量级。

3) 小孔直径一定时,相同数值孔径 NA 处,衍射波面偏差随对准误差的增大呈线性增长;相同对准误差下,衍射波面偏差随会聚光斑半径的增大而减小,要获得同等衍射波面偏差,允许的对准误差随会聚光斑的增大呈近同倍数增长。

4) 在实际点衍射系统中,为充分利用激光器光能同时又允许一定小孔对准误差,会聚光斑直径选在 2 倍小孔直径、小孔对准误差以不超过小孔直径的 1/10 为宜。

综合上面的分析可知,小孔对准误差对参考波面质量的影响显著,小孔的精确对准是确保点衍射干涉测量系统精度的关键环节。在实际点衍射干涉测量系统设计中,在保证小孔对准机构定位精度的同时,还需引入一定可视化的小孔精确辅助对准系统以确保对准精度,该部分研究工作将另文进行探讨。

参 考 文 献

- 1 K Ota, T Yamamoto, Y Fukuda, *et al.*. Aspherical mirror measurement using a point diffraction interferometer [C]. SPIE, 2002, 4688: 690-694.
- 2 K Ota, T Yamamoto, Y Fukuda, *et al.*. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors [C]. SPIE, 2001, 4343: 543-550.
- 3 K Otaki, K Ota, I Nishiyama, *et al.*. Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: design, fabrication, and evaluation [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2002, 20(6): 2449-2458.
- 4 G E Sommargren, D W Phillion, M A Johnson, *et al.*. 100-picometer interferometry for EUVL [C]. SPIE, 2002, 4688: 316-328.
- 5 D D Wang, Y Y Yang, C Chen, *et al.*. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces [J]. Appl Opt, 2011, 50(16): 2342-2348.
- 6 Xu Jiajun, Xing Tingwen, Xu Fuchao. Calibration of the system errors in pinhole diffracted interferometer [J]. Acta Optica

- Sinica, 2013, 32(7): 0712003.
- 许嘉俊, 邢廷文, 徐富超. 点衍射干涉仪系统误差标定[J]. 光学学报, 2013, 32(7): 0712003.
- 7 K Otaki, Y Zhu, M Ishii, *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL [C]. SPIE, 2004, 5193: 182-190.
- 8 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. 点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2321-2324.
- 9 F Gao, Z D Jiang, B Li. Diffraction wavefront analysis of point diffraction interferometer for measurement of aspherical surface [C]. SPIE, 2010, 7656: 76565Y.
- 10 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao, *et al.*. Wave-front quality analysis of three-dimension pinhole vector diffracted in extreme ultraviolet region [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2849-2854.
- 卢增雄, 金春水, 张立超, 等. 极紫外三维小孔矢量衍射波面质量分析[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2849-2854.
- 11 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.
- 12 Wang Ruilin, Xing Tingwen, Xie Weiming. 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.
- 13 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.
- 14 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Ma Dongmei, *et al.*. Analysis of effect of tiny pinhole deviation on far-field wave-front quality [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812002.
- 卢增雄, 金春水, 马冬梅, 等. 微小孔偏差对远场波前质量影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812002.
- 15 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Ma Dongmei. Rigorous vector analysis of the effect of illumination objective lens aberration on the quality of far-field diffracted wave front [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0812001.
- 卢增雄, 金春水, 马冬梅. 照明物镜像差对远场衍射波前质量影响的严格矢量分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0812001.
- 16 Xu Jiajun, Xing Tingwen. Analysis of the wave-front diffracted by three-dimension pinhole with shape errors [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(2): 64-70.
- 许嘉俊, 邢廷文. 可见光三维针孔形状误差矢量衍射分析[J]. 光电工程, 2013, 40(2): 64-70.
- 17 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.
- 18 R K Luneburg. Mathematical Theory of Optics [M]. University of California Press, 1964.