

激光与光电子学进展

非对准高斯光束入射下的小孔衍射光强分布

张通¹, 高芬^{1,2*}, 李兵², 田爱玲¹

¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;

²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

摘要 点衍射干涉仪中小孔的对准情况直接决定小孔衍射光斑的形状及位置,也影响着后续光路的布置。基于瑞利-索末菲衍射理论,对非对准高斯光束入射下的小孔衍射光强分布进行了研究,给出了平移、离焦、倾斜三种对准误差下的光强分布解析表达式,分析得出了不同直径小孔在不同对准误差下的衍射光强分布情况。研究表明:平移对准误差会使衍射光斑形状发生变化,但对衍射光斑中心的位置没有影响,随着平移对准误差的增大,沿平移方向的第一暗环呈月牙状并逐渐消失;离焦对准误差对衍射光斑的位置和形状均无明显影响,但衍射光强值会随着离焦量的增加而减小;倾斜对准误差会使衍射光斑中心位置发生偏移,但衍射光斑的形状不会发生变化,并且偏移方向与斜入射方向一致,偏移量与倾斜角之间呈线性关系。

关键词 衍射; 点衍射; 衍射光强; 对准误差; 干涉测量

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1905001

Diffraction Intensity Distribution of Pinhole for Misaligned Gaussian Beam Incidence

Zhang Tong¹, Gao Fen^{1,2*}, Li Bing², Tian Ailing¹

¹School of Optoelectronic and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

²State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract In a point diffraction interferometer (PDI), the shapes and positions of pinhole diffraction spots are determined by pinhole alignment conditions, and then the arrangement of subsequent optical path is affected. Based on Rayleigh-Sommerfeld diffraction theory, the pinhole diffraction intensity distribution for misaligned Gaussian beam incidence is studied. The mathematical expressions of different alignment errors including lateral shift, defocus, and tilt are given. The intensity distributions of pinholes with different diameters for different alignment errors are analyzed. The research results show that lateral shift alignment error does not affect the center position of diffraction spot, but it will change the shape of diffraction spot. With the increase of lateral shift alignment error, the first diffraction dark ring is with a crescent shape and gradually disappears in the direction of shift. Defocus alignment error has no obvious effect on position and shape of diffraction spots, but the intensity of diffraction light will decrease with the increase of defocusing amount. Tilt alignment error will cause the offset of the center position of diffraction spot, but it will not affect the shape of the diffraction spot. The offset direction is consistent with oblique incidence direction, and there is a linear relationship between the offset and tilt angle.

Key words scattering; point diffraction; diffraction light intensity; alignment error; interferometry

收稿日期: 2020-12-15; 修回日期: 2020-12-21; 录用日期: 2020-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(52005383, 51875448)

通信作者: *gaofen8128@163.com

OCIS codes 050.1940; 120.3180; 220.1140

1 引言

随着航空、航天、国防以及高科技民用领域多项重大科学工程的开展,我国对光学元件的需求激增,也提出了更高的检测精度要求,特别是在极紫外光刻中,所用球面、非球面的检测精度已经要求达到 0.1 nm(均方根, $\lambda=632.8$ nm)的水平^[1]。点衍射干涉测量法通过微米级的小孔产生近似理想球面波作为参考波面构成干涉测量系统,理论精度可达到亚纳米级,这为上述超精度检测提供了新途径。在点衍射干涉仪中,小孔前会聚透镜的聚焦光斑与小孔的对准情况直接影响着衍射波面的质量,同时还将影响衍射光的光强分布、光斑形状及光斑的位置,从而影响后续光路的布置。

掌握不同小孔对准误差影响下的衍射光斑变化规律:一方面将有利于后续光路布置中快速定性判断小孔对准状态,进而指导对准调整;另一方面能建立衍射光斑与对准误差之间的关联模型,还可进一步通过监控衍射光斑的形状和位置,反向监测小孔的对准情况,从而为小孔的精确对准调整提供依据。因此,研究不同直径小孔在不同对准误差影响下的光强分布极其重要。

目前国内外对于小孔衍射光强分布的研究较多,但主要集中于不同形状小孔^[2-5]和不同形状入射光束^[6-7]下的衍射光强分布或者轴上点光束传输特性^[8-14]的研究。如国外 Salashchenko 等^[2]分析了波长级小孔的形状误差对于衍射光强角分布特性的影响;国内刘普生等^[3]对高斯光束的传播情况和圆孔衍射进行了研究分析;任娜等^[4]对平面波经矩孔衍射的矢量理论进行了研究,并与标量下的光强分布进行了比较;Zhang^[6]从角谱理论出发,推导了椭圆高斯光束经圆孔的衍射解析传播方程,并与直接用数值积分得到的方程进行了比较;周国泉等^[8]研究了非傍轴高斯光束的传输和高斯光束经波长级圆孔衍射的轴上光强特性,并与平面波入射进行了比较;王东^[13]对于标量和矢量理论下的光强及能量的传输进行了研究。但以上研究并没有考虑入射光束对准误差对光强分布的影响,而点衍射干涉测量领域更关心横截面光强的分布状态。

虽然近年来在点衍射干涉测量领域褚光^[15]分别基于标量衍射理论和矢量衍射理论着重分析了

小孔尺寸对衍射光强的影响,但也未考虑存在对准误差下的光强分布情况。朱文华等^[16]对于高斯入射下的衍射光强度与波面误差有所研究,但只考虑了离焦情况的影响,并更多是针对光强强度进行研究分析,而实际小孔必然要同时受到平移、倾斜、离焦三种对准情况的影响,因此对三种对准误差下的小孔衍射光强分布的全面分析极为必要。

本文基于瑞利-索末菲衍射理论,建立了平移、离焦、倾斜三种对准误差下的小孔衍射光强分布模型,分析了各种误差量与光强变化量之间的关系,总结出了不同对准误差下的衍射光斑变化规律,研究可为小孔对准情况的判断、反向监测及对准技术的研究提供理论基础。

2 理论建模

激光高斯光束入射下的小孔衍射光强分布模型如图 1 所示,假设 $z=0$ 平面上的小孔衍射板上开有直径为 d 的小孔,小孔前高斯入射光束的束腰半径为 ω_0 ,小孔后方设有与小孔距离为 z 的观察屏。 $P(x_1, y_1)$ 为小孔面域内任意一点,其与小孔中心的距离为 r_1 , $Q(x, y)$ 为观察屏上一点,其与小孔中心的距离为 r , R 为 P 与 Q 两点之间的距离。假设小孔入射平面即 $x_1 y_1$ 平面上的电场分布为 $E_1(x_1, y_1)$,则小孔出射面上的电场分布可表示为

$$E'_1(x_1, y_1) = t(x_1, y_1) E_1(x_1, y_1), \quad (1)$$

式中: $t(x_1, y_1)$ 为衍射板透射系数,小孔域内其值取 1,其余取 0。

根据第一类瑞利-索末菲衍射积分公式^[17],可得

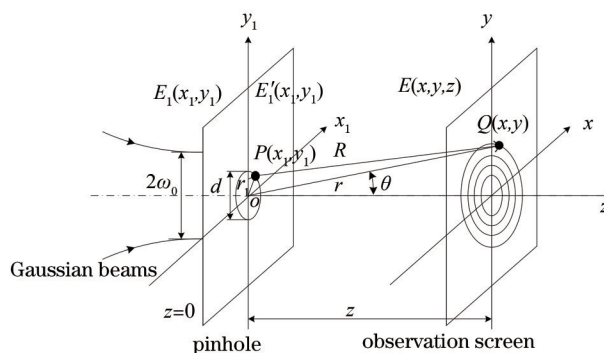


图 1 高斯光束入射下的小孔衍射光强分布模型

Fig. 1 Intensity distribution model of pinhole diffraction under Gaussian beam incidence

$$E(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} E_1'(x_1, y_1) \frac{\exp(ikR)}{R} \cos \theta dx_1 dy_1, \quad (2)$$

式中： λ 为光波波长； $k = 2\pi/\lambda$ ； $R = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + z^2}$ 。

将(1)式代入(2)式中,并进行近似处理,可得高斯光束经小孔衍射后的场分布表达式为

$$E(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \iint_{\Sigma} E_1(x_1, y_1) \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2 - 2xx_1 - 2yy_1}{2z}\right) dx_1 dy_1, \quad (3)$$

式中： Σ 为小孔面域。

由电场分布表达式[(3)式]可得出观察屏上的小孔衍射光强分布 $I(x, y, z)$ 为

$$I(x, y, z) = |E(x, y, z)|^2, \quad (4)$$

即

$$I(x, y, z) = \left| \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \iint_{\Sigma} E_1(x_1, y_1) \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2 - 2xx_1 - 2yy_1}{2z}\right) dx_1 dy_1 \right|^2. \quad (5)$$

由(5)式可知,小孔衍射的光强分布与小孔入射面上的高斯场分布有关,而小孔入射面的高斯场分布又受到高斯光束与小孔位置关系的影响,因此需要对不同对准入射下的高斯场分布进行分析。

假设高斯入射光束束腰所在的平面为 H_ω ,束腰中心轴为 O_ω ,小孔入射平面为 x_1y_1 平面,小孔中心轴为 z 轴。如图 2(a)所示,在理想情况下,高斯入射光束束腰所在的平面 H_ω 与小孔入射面 x_1y_1 重合,束腰中心轴 O_ω 与 z 轴重合,但实际在点衍射系统的光路搭建中不可避免地会受到人为调整误差的影响,使得束腰所处的位置不一定在小孔平面内,束腰中心轴也不一定与小孔中心轴重合,而是产生位

置偏差,即对准误差。图 2(b)、2(c)、2(d)分别给出了存在平移、离焦、倾斜三种可能的对准误差下的高斯场分布模型。实际系统中可能会有两种或者三种对准误差同时存在,对准误差的方向也具有随机性,但通过分析某一方向某种对准误差对光强的影响,依据分布规律即可预见其他复杂对准情况下的分布情况。

不失一般性,下面考虑理想情况[图 2(a)]、沿 x_1 轴的平移误差[图 2(b)]、沿 z 轴的离焦误差[图 2(c)]和沿 y_1 轴的倾斜误差[图 2(d)]4种基本情况,分别构建不同对准情况下的小孔衍射场分布模型,进行不同对准情况下的小孔衍射光强分析。

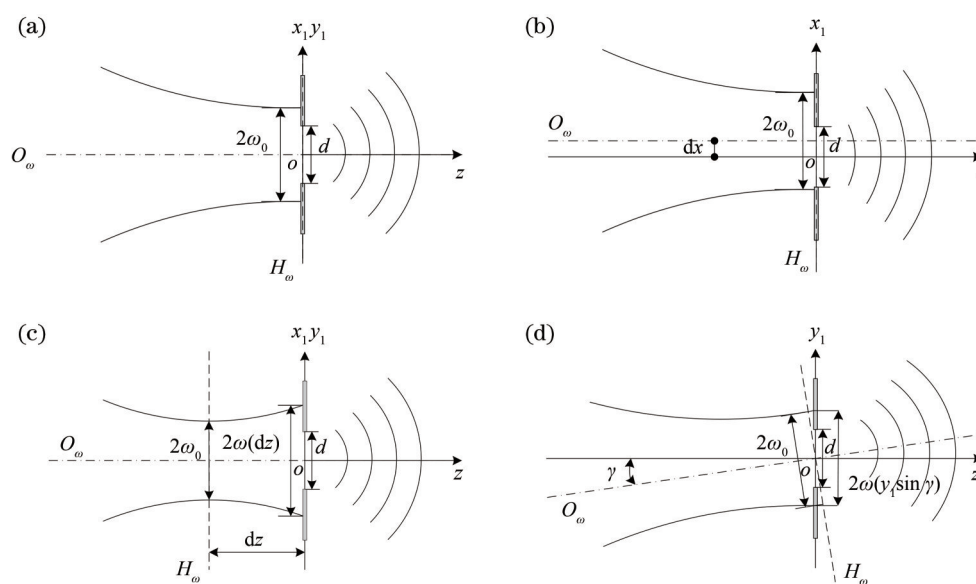


图 2 不同对准情况下的小孔衍射场分布模型。(a)理想情况；(b)平移误差；(c)离焦误差；(d)倾斜误差

Fig. 2 Diffraction field distribution models of pinhole under different alignment conditions. (a) Ideal condition; (b) shift error; (c) defocus error; (d) tilt error

如图 2(a) 所示, 理想情况下高斯光束束腰位于小孔平面内, 束腰中心轴 O_w 与小孔中心轴 z 轴重合, 小孔平面上的光斑半径为 ω_0 。根据高斯光束的传播理论^[18], 理想情况下小孔入射平面上的电场分布可简化为

$$E_1(x_1, y_1) = \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{\omega_0^2}\right) \quad (6)$$

如图 2(b) 所示, 存在沿 x_1 轴的平移误差 dx 时, O_w 轴不再与 z 轴重合, 而是存在一定的偏移 (偏移量为 dx)。小孔积分域内任一点坐标 (x_1, y_1) 变为 $(x_1 - dx, y_1)$, 此时高斯光束束腰仍处于小孔平面

内, 小孔平面上的光斑半径仍为 ω_0 。引入沿 x_1 轴的平移误差 dx 时的场分布可表示为

$$E_1(x_1, y_1) = \exp\left[-\frac{(x_1 - dx)^2 + y_1^2}{\omega_0^2}\right] \quad (7)$$

如图 2(c) 所示, 存在沿 z 轴的离焦误差 dz 时, O_w 轴与 z 轴仍重合, 束腰所在的平面与小孔中心所在的平面之间存在偏移, 偏移量为 dz 。小孔积分域内任一点坐标 $(x_1, y_1, 0)$ 变为 (x_1, y_1, dz) , 此时高斯入射光束束腰不再处于小孔平面内, 小孔平面上的光斑半径为 $\omega(dz)$ 。引入沿 z 轴的离焦误差 dz 时的场分布可表示为

$$E_1(x_1, y_1, dz) = \frac{\omega_0}{\omega(dz)} \exp\left[-\frac{x_1^2 + y_1^2}{\omega^2(dz)}\right] \exp\left\{-i\left[k\left[dz + \frac{x_1^2 + y_1^2}{2R(dz)} \right] - \arctan\left(\frac{dz}{f}\right)\right]\right\} \quad (8)$$

如图 2(d) 所示, 在 y_1oz 平面中, 束腰中心轴 O_w 与小孔中心轴存在倾斜角 γ 时, 小孔积分域内任一点 $(x_1, y_1, 0)$ 变为 $(x_1, y_1 \cos \gamma, y_1 \sin \gamma)$, 此时高斯入射光束束腰平面与小孔平面存在倾斜角 γ , 小孔平面上的光斑半径为 $\omega(y_1 \sin \gamma)$ 。引入沿 y_1 方向的倾斜误差 γ 时的场分布可表示为

$$E_1(x_1, y_1, \gamma) = \frac{\omega_0}{\omega(y_1 \sin \gamma)} \exp\left[-\frac{x_1^2 + (y_1 \cos \gamma)^2}{\omega^2(y_1 \sin \gamma)}\right] \exp\left\{-i\left[k\left[y_1 \sin \gamma + \frac{x_1^2 + (y_1 \cos \gamma)^2}{2R(y_1 \sin \gamma)}\right] - \arctan\left(\frac{y_1 \sin \gamma}{f}\right)\right]\right\} \quad (9)$$

将以上 (6)~(9) 式不同对准情况下的场分布表达式代入光强表达式 [(5) 式] 中进行数值计算, 即可得出不同对准误差下的衍射光强分布情况。

3 小孔衍射光强分布仿真分析

3.1 理想情况下高斯光束束腰半径对小孔衍射光强分布的影响

为确保存在对准误差时, 高斯光束入射至小孔平面上的会聚光斑完全覆盖小孔, 实际系统构建中对高斯光束束腰半径的选择也极其重要, 因此, 这

里首先探讨了理想情况下不同束腰半径对于衍射光斑形状和位置的影响, 进而为后续存在对准误差时高斯光束束腰半径的确定提供基础。本文着重对小孔直径 d 为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的情况进行分析, 激光波长取 $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ 。以小孔直径 $d = 2\ \mu\text{m}$ 为例, 束腰半径分别取 $\omega_0 = 0.5d = 1\ \mu\text{m}$, $\omega_0 = d = 2\ \mu\text{m}$, $\omega_0 = 1.5d = 3\ \mu\text{m}$, $\omega_0 = 2d = 4\ \mu\text{m}$, 观察屏的大小为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$, 观察屏与小孔位置的距离为 $z = 200\ \text{mm}$, 图 3 给出了不同束腰半径下的小孔衍射光强分布曲线。从图 3 可以看出, 束腰半径的增

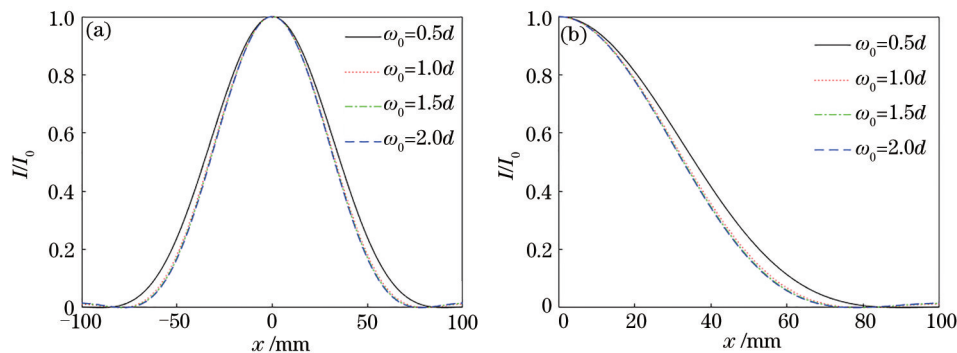


图 3 不同束腰下的小孔衍射光强归一化曲线 ($d = 2\ \mu\text{m}$)。 (a) 归一化光强曲线; (b) 局部放大图

Fig. 3 Intensity distributions of pinhole diffraction under different waists (when $d = 2\ \mu\text{m}$). (a) Normalized intensity curve; (b) partially enlarged view

大会使归一化曲线向内收缩,但当束腰完全覆盖小孔时曲线的收缩程度甚微,这种影响可忽略不计。因此,可以认为束腰完全覆盖小孔时高斯光束的束腰半径对光强的分布无明显影响。后续分析对准误差影响时,在确保小孔平面上的高斯入射光斑完全覆盖小孔的情况下可忽略束腰半径带来的影响。综合考虑对准误差的可能取值及光能利用率,后续分析中均取束腰半径为 1 倍小孔直径进行分析,即 $\omega_0 = d$ 。

3.2 非对准高斯光束入射下的小孔衍射光强分布仿真分析

3.2.1 存在平移误差下的小孔衍射光强分布

图 4 所示为 $d = 2 \mu\text{m}$ 且引入沿 x_1 轴的平移误差 dx 分别为 $0 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ 时的衍射光强图。从图 4 中可以看出,当平移误差仅为 $0.5 \mu\text{m}$ 时,沿 x 轴的第一暗环处稍微变亮,而平移误差达到 $1 \mu\text{m}$ 时,沿平移误差方向的第一暗环已消失。可见,平移对准误差使得衍射光斑的形状发生变化, dx 的增大使沿平移方向的衍射光斑的暗环呈月牙状并逐渐消失,但平移误差对衍射光斑的中心位置没有影响。

图 5(a) 给出了不同平移误差下的小孔衍射光强相对理想情况下光强的归一化分布曲线。图 5(b) 给出了第一极小值处的归一化光强曲线局部放大图。从图 5(a) 可以看出,平移误差的存在会使归一化光强曲线的峰值有所下降,在 dx 达到 $1 \mu\text{m}$

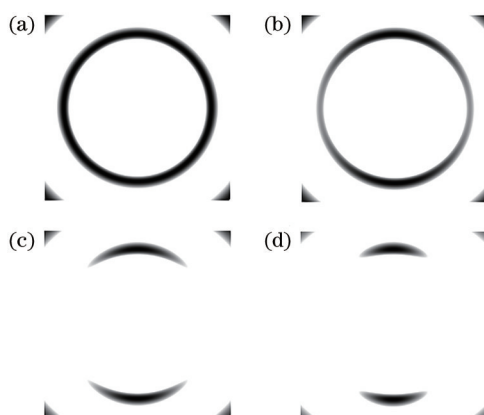


图 4 不同平移误差下的小孔衍射光强图 ($d = 2 \mu\text{m}$)。 (a) $dx = 0 \mu\text{m}$; (b) $dx = 0.5 \mu\text{m}$; (c) $dx = 1.0 \mu\text{m}$; (d) $dx = 1.5 \mu\text{m}$

Fig. 4 Diffraction intensity maps of pinhole with different shift errors (when $d = 2 \mu\text{m}$). (a) $dx = 0 \mu\text{m}$; (b) $dx = 0.5 \mu\text{m}$; (c) $dx = 1.0 \mu\text{m}$; (d) $dx = 1.5 \mu\text{m}$

时,峰值光强减小至 $0.64I_0$ (I_0 为理想情况下的峰值光强)。从图 5(b) 可以看出,平移误差 dx 会使沿该方向极小值处的归一化光强值有所增加,而极小值处归一化光强值的增大导致沿误差方向的第一暗环呈月牙状,最后消失。从图 4(d) 可以看出,平移误差达到 $1.5 \mu\text{m}$ 时,高斯光束的中心已偏离出小孔区域,此时的第一暗环几乎消失,其光强峰值降至 $0.37I_0$ 。综上,平移误差不会改变衍射光斑的位置,但对于衍射形状和峰值光强的影响比较明显,实际中应保证高斯光束会聚光斑覆盖小孔范围。

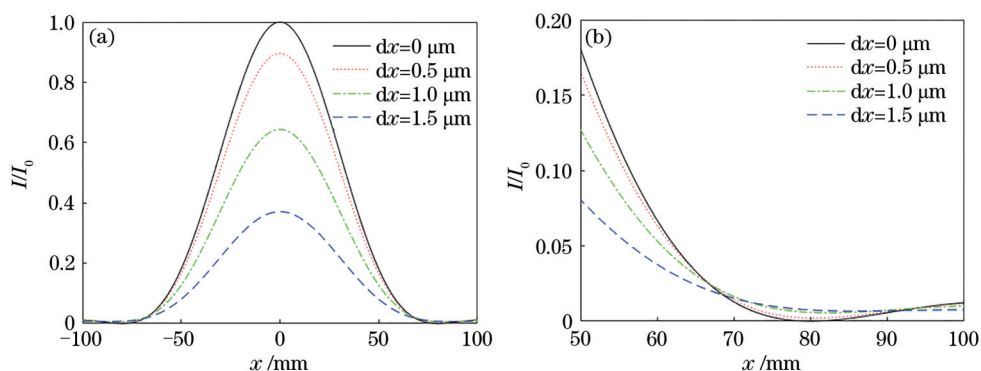


图 5 不同平移误差下的小孔衍射光强归一化曲线 ($d = 2 \mu\text{m}$)。(a) 归一化光强曲线;(b) 局部放大图

Fig. 5 Intensity normalization curves of pinhole diffraction under different shift error (when $d = 2 \mu\text{m}$). (a) Normalized intensity curves; (b) partially enlarged view

3.2.2 存在离焦误差时的小孔衍射光强分布

图 6 为 $d = 2 \mu\text{m}$ 且引入沿 z 轴的离焦误差 dz 分别为 $0, 10d, 20d, 30d$ 时的衍射光强图。图 7 为不同离焦误差下的小孔衍射光强归一化分布曲线。从

图 6、7 中可以看出,存在离焦误差时,衍射光斑的形状和位置与理想情况下基本一致,即离焦误差对光斑的形状和位置均没有明显的影响,但对衍射光强值有影响。随着离焦量 dz 的增加,峰值光强随之

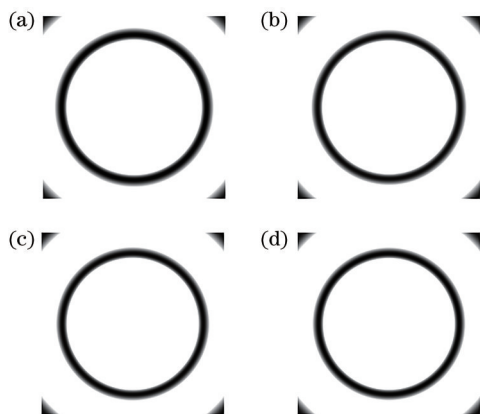


图 6 不同离焦误差下的小孔衍射光强图($d = 2 \mu\text{m}$)。

(a) $dz=0$; (b) $dz=10d$; (c) $dz=20d$; (d) $dz=30d$

Fig. 6 Diffraction intensity maps of pinhole for different defocus errors (when $d = 2 \mu\text{m}$). (a) $dz=0$; (b) $dz=10d$; (c) $dz=20d$; (d) $dz=30d$

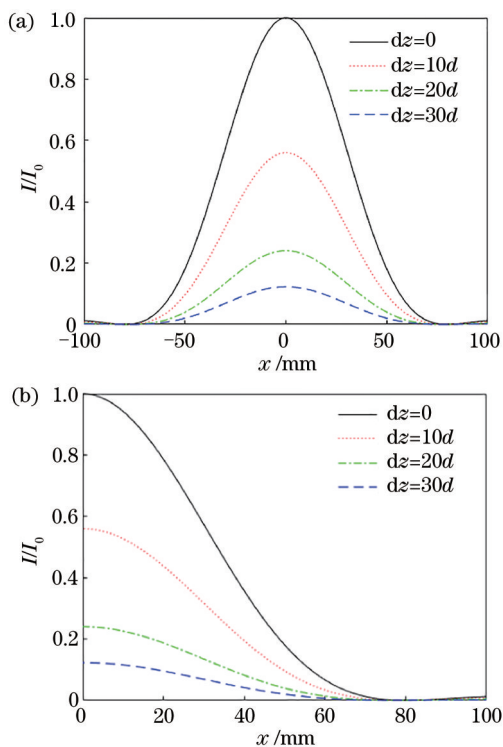


图 7 不同离焦误差下的小孔衍射光强归一化曲线($d = 2 \mu\text{m}$)。(a)归一化光强曲线;(b)局部放大图

Fig. 7 Intensity normalization curves of pinhole diffraction under different defocus error (when $d = 2 \mu\text{m}$). (a) Normalized intensity curves; (b) partially enlarged view

衰减。进一步分析离焦误差量与归一化光强值之间的关系,图 8 给出了小孔直径 d 为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 时的归一化光强值与离焦量的关系曲线,离焦量分别取 $1 \sim 20$ 倍的小孔直径。从图 8 中可以看出,离焦量对于光强值的影响并不是一个严格的线性关系,并

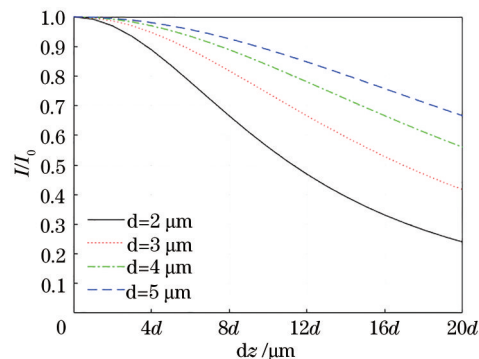


图 8 不同直径下的小孔衍射归一化光强值随着离焦误差 dz 的变化关系

Fig. 8 Change of normalized intensity along with defocus error dz under different diameters

且不同直径受离焦量的影响有所不同。离焦量在 $0 \sim 4d$ 范围内时,离焦误差对于光强值的影响较小,光能的损失可以忽略;离焦量大于 $4d$ 时,离焦误差与归一化光强可近似呈线性关系,并且小孔直径越小,影响越明显。 $d = 2 \mu\text{m}$ 时,离焦量为 $20d$ 下的峰值光强已衰减至理想情况下的 24% ,而 $d = 5 \mu\text{m}$ 时,在离焦量为 $20d$ 时的峰值光强仍然可达 $0.67I_0$ 。

3.2.3 存在倾斜误差下的小孔衍射光强分布

图 9 为 $d = 5 \mu\text{m}$ 且引入沿 y 轴的倾斜误差 γ 分别为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 和 15° 时的衍射光强图。从图 9 中可以明显地看出,倾斜误差的存在不改变衍射光斑的形状,但会使衍射光斑中心的位置发生偏移,假定

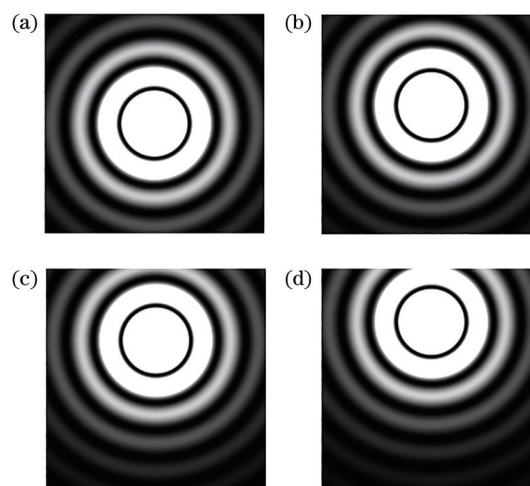


图 9 不同倾斜误差下的小孔衍射光强图($d = 5 \mu\text{m}$)。(a) $\gamma=0^\circ$; (b) $\gamma=5^\circ$; (c) $\gamma=10^\circ$; (d) $\gamma=15^\circ$

Fig. 9 Diffraction intensity maps of pinhole for different tilt errors (when $d = 5 \mu\text{m}$). (a) $\gamma=0^\circ$; (b) $\gamma=5^\circ$; (c) $\gamma=10^\circ$; (d) $\gamma=15^\circ$

高斯光束中心轴在 y_1oz 面相对于 z 轴逆时针旋转 γ 为正,随着倾斜角 γ 的增大,光斑则不断向上移动,即偏移方向与斜入射的方向一致。进一步分析不同直径小孔存在不同倾斜误差时,倾斜角 γ 与衍射光斑中心偏移量 Δy 之间的关系,如图 10 所示。从图 10 中可以看出,不同直径小孔下,倾斜角 γ 与偏移量 Δy 之间均呈线性关系,光斑中心位置的偏移量与小孔直径无关,仅与倾斜角度的大小有关。对图 10 中曲线进行线性拟合,可得出倾斜角和偏移量符合关系式 $\Delta y = 3.51\gamma$ 。因中心位置偏移量仅与倾斜角有关,如果能检测出衍射光斑中心位置,则可计算出偏移量,从而反推出倾斜角,也可实现倾斜误差的校准。因此实际光路调整中,掌握该规律后,可通过观察衍射光斑偏离方向及位置,快速判断对准调整方向及倾斜调整量大小,进而较快地实现对准调整。

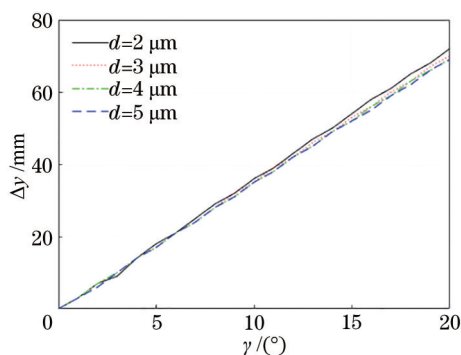


图 10 倾斜角 γ 与衍射光斑中心偏移量 Δy 之间的关系曲线
Fig. 10 Center offset value of diffraction spot Δy varying with tilt angle γ

4 结 论

基于瑞利-索末菲衍射理论研究了平移、倾斜、离焦三种非对准情况下,激光高斯光束入射小孔后的衍射光强分布情况。首先对理想情况下不同束腰半径对小孔衍射光强分布的影响进行了分析,得到了束腰半径在完全覆盖小孔的情况下,其大小对衍射光强分布并不会有明显影响的结论;其次构建了引入平移、离焦、倾斜三种对准误差下的小孔衍射光强分析模型,对这三种对准误差下的小孔光强分布进行了全面仿真分析,得出了如下结论。

1) 平移误差会使光斑形状发生变化,但不影响光斑的中心位置。平移误差的存在会使得沿误差方向的归一化曲线的极小值有所增大,随着平移误差的增大,第一暗环逐渐变亮,暗环呈月牙状并逐

渐消失,但光斑的中心位置不会发生变化。

2) 离焦误差对光斑的形状和位置均无明显影响,主要影响峰值光强。随着离焦量的增大,光强值会一直衰减,并且离焦量和光强值之间为非线性的关系。离焦量较小时,其对光强的影响可以忽略,小孔直径过小时随着离焦量的变化光强衰减更迅速。

3) 倾斜误差会导致光斑中心的偏移,并且偏移量仅与倾斜角度有关,不受小孔直径的影响,对于不同直径的小孔,其偏移量与倾斜角均呈线性关系。

主要对直径为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的小孔进行了分析,当小孔直径更大时,其光强分布一般可用平面波入射来近似,但如果小孔直径小于 $2\ \mu\text{m}$,标量近似衍射理论已不适用,需要采用严格的矢量分析理论进行研究分析。

参 考 文 献

- [1] Otaki K, Ota K, Nishiyama I, 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.
- [2] Salashchenko N N, Toropov M N, Chkhalo N I. Effect of pinhole roughness on light diffraction[J]. Journal of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2008, 2(4): 511-513.
- [3] Liu P S, Lü B D. Nonparaxial vector Gaussian beams diffracted at a circular screen[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(11): 3724-3728.
刘普生, 吕百达. 非傍轴矢量高斯光束的圆屏衍射[J]. 物理学报, 2004, 53(11): 3724-3728.
- [4] Ren N, Li Z C, Yang H. The study of vectorial diffraction theories for plane waves diffracted at a rectangular hole[J]. Laser Journal, 2015, 36(9): 26-29.
任娜, 李志超, 杨虎. 平面波经矩孔衍射的矢量理论研究[J]. 激光杂志, 2015, 36(9): 26-29.
- [5] Zhou G Q, Zhao D M, Wang S M. Characteristics of axial light intensity of planar wave diffracted by small circular aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 22-25.
周国泉, 赵道木, 王绍民. 平面波经小圆孔衍射的轴上光强特性[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 22-25.
- [6] Zhang Y J. Nonparaxial propagation analysis of elliptical Gaussian beams diffracted by a circular aperture[J].

- Optics Communications, 2005, 248(4/5/6): 317-326.
- [7] Jin L, Zhang X Q. Light intensity distribution of elliptical vectorial Gaussian beams diffracted at a multi-rectangular aperture[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2015, 35(4): 21-27.
靳龙, 张兴强. 椭圆矢量高斯光束多孔衍射的光强分布[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2015, 35(4): 21-27.
- [8] Zhou G Q, Ni Y Z, Wang S M. Axial light intensity characteristics of Gaussian beam diffracted by a wavelength-order circular aperture[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(4): 437-440.
周国泉, 倪涌舟, 王绍民. 高斯光束经波长级圆孔衍射的轴上光强特性[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 437-440.
- [9] Yan J W, Yong K L, Tang S F, et al. Comparison of propagation characteristics between super Gaussian and Gaussian vortex beams in air[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0201002.
闫家伟, 雍康乐, 唐善发, 等. 大气中超高斯和高斯涡旋光束传输特性比较[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0201002.
- [10] Deng X J, Wu B K, Xiao S. Energy transmission of a small aperture in near-field diffraction[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(12): 1432-1436.
邓小玖, 吴本科, 肖苏. 微小孔近场衍射的能量传输[J]. 光学学报, 2001, 21(12): 1432-1436.
- [11] Zhang S H, Shao M, Wang Y, et al. Ray characterization of optical waves[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230003.
张书赫, 邵梦, 王奕, 等. 光波的光线表征[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230003.
- [12] Ye Q J, Wang X J, Dai Z H. Study on the characteristics of Gaussian beam at the Brewster angle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0720001.
叶俏珏, 王先菊, 戴占海. 布儒斯特角入射的高斯光束传输特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0720001.
- [13] Wang D. The study of light intensity and energy transmission of nonparaxial beam[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
王东. 非傍轴光束的光强及其能量传输的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [14] Lai C W, Deng X J, Wang G A, et al. Energy transmission of nonparaxial vector diffraction beam[J]. Laser Technology, 2009, 33(4): 446-448.
赖传伟, 邓小玖, 汪国安, 等. 非傍轴矢量衍射光束的能量传输[J]. 激光技术, 2009, 33(4): 446-448.
- [15] Chu G. 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.
- [16] Zhu W H, Chen L, Li J P, et al. Analysis of diffraction intensity and wavefront error in point diffraction interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061201.
朱文华, 陈磊, 李金鹏, 等. 点衍射干涉仪中针孔衍射光强与波面误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 061201.
- [17] Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. Yang J S, Transl. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2009.
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论[M]. 杨葭荪, 译. 第7版. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [18] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, et al. The principle of laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.