

doi:10.3788/gzxb20184705.0512003

双焦点光子筛聚焦特性的精细测量

王松贤^{1,2}, 张艳丽¹, 张军勇¹

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:利用数字全息测量方法结合变采样间距的衍射传输算法实现双焦点光子筛器件焦距及焦斑的同时精细测量,给出了双焦点光子筛器件及其理论焦斑分布,采用双曝光的离轴全息方法得到了 CCD 接收面处光场的复振幅分布,基于此光场通过变采样间距的衍射传输算法获得具有较高分辨率的双焦点光子筛的聚焦场特征,与 CCD 直接测量结果相比,焦斑分辨率提高了 10 倍,双焦点光子筛的焦距等于自动对焦算法及强度最大值扫描方式分别求得的两段距离之和.实验结果表明测得的双焦距与设计焦距偏差分别为 0.53% 和 0.37%,得到的两个焦斑半值全宽与设计值相比,其偏差分别为 2.86% 和 1.86%.本文提出的测量方法除了应用于光子筛类器件的性能检测以外,还能够广泛应用于其它类衍射透镜聚焦特性的测量与性能分析.

关键词:微光器件;光子筛;数字全息;希腊梯子;双焦点

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0512003-9

Fine Measurement for Focusing Properties of Bifocal Photon Sieve

WANG Song-xian^{1,2}, ZHANG Yan-li¹, ZHANG Jun-yong¹

(1 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The digital holographic measurement method and the diffraction propagation algorithm of variable sampling interval were proposed to realize the fine measurement of the focal length and focal spot of the photon sieve. The bifocal photon sieve and its theoretical focal spot distribution were presented. The double-exposure off-axis holographic method was used to obtain the complex amplitude distribution of the light field at the CCD. Based on the light field, the focusing field characteristics of bifocal photon sieves with higher resolution were obtained through the diffraction propagation algorithm of variable sampling interval. The resolution of the focal spot is about 10 times that of the direct measurement by CCD. The focal length is equal to the sum of the two distances obtained by the autofocus algorithm and the intensity maximum scanning method respectively. The experimental results show that the deviations between the measured bifocal lengths and the designed focal lengths are 0.53% and 0.37%, respectively. Compared with the full-width at half-maximum of Greek-ladder photon sieve as required, the measured width of the two focal spots is accurate enough with error of 2.86% and 1.86%, respectively. The measurement method proposed in this paper can be widely applied to the measurement and performance analysis of other diffractive lens focusing characteristics besides the performance testing of photon sieves.

Key words: Micro-optical devices; Photon sieve; Digital holography; Greek ladder; Bifocal

OCIS Codes: 130.3990; 260.1960; 050.1970; 090.1995

0 引言

2001 年德国科学家 KIPP L 等^[1]首次提出 X 射线新型衍射成像元件——光子筛,其结构是用随机分布

基金项目:中国科学院青年创新促进会(No.2017292)资助

第一作者:王松贤(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为全息测量. Email:wangsongxian@siom.ac.cn

导师(通讯作者):张艳丽(1981-),女,副研究员,博士,主要研究方向为高功率激光传输和变换、光束偏振整形. Email:zhangyl@siom.ac.cn

收稿日期:2017-11-23;录用日期:2018-02-27

<http://www.photon.ac.cn>

的筛孔代替传统菲涅尔波带片的透明环带^[2-4].近些年来,科研人员对于光子筛进行了大量的基础和应用研究,取得了许多研究成果^[5-7],如设计了分形光子筛^[8]、螺旋光子筛^[9]、斐波那契光子筛^[10]等,从轴上单焦点扩展到轴上多焦点.轴上多焦点器件在生物视觉^[11]、细胞成像^[12]、显微镜^[13]等领域有重大需求,同时也为 X 射线和极紫外线的阵列成像提供了新的技术途径.2013 年,西班牙学者 MONSURIUJ A 等^[14]将斐波那契数列引入到波带片设计中,提出了双焦斐波那契衍射透镜,期望在 X 射线到太赫兹成像领域有所应用.2014 年,他们团队又提出 Kinoform 斐波那契透镜的设计,这种透镜的相位分布还是基于斐波那契数列,同样也能产生两个单独的焦点^[15].同年,鲁东大学的冀胜哲等^[16]基于紧聚焦条件下的理查德-沃尔夫矢量场模型推导出了解析形式的环半径公式,并利用该公式设计得到二元相位波带片,实现入射光紧聚焦区域呈现轴向双焦点分布.2015 年,柯杰等^[17]提出了一种双焦点的斐波那契光子筛,并基于惠更斯-菲涅尔原理分析了其聚焦特性,期望其在 X 射线显微和太赫兹成像上衍生新的应用.在前期研究基础之上他们又提出了两种方法来实现多焦点焦面上的二维阵列焦点,并且提出广义斐波那契光子筛的概念^[18-19].2017 年, MACHADO F 等^[20]对双焦点光子筛的设计方法进行了研究,并通过斐波那契光子筛成像实验证明了多焦点光子筛的成像能力.对于传统的单焦点光子筛而言,其聚焦成像特性和等焦距的普通透镜相同,在焦点前后很长一段距离内对应的是球面波前,其强度反比于距离的平方^[21-22].相比之下,轴上多焦点希腊梯子光子筛在微米量级的离焦面上的能量迅速衰减,因此难以简单地利用传统的成像光学系统对微米焦斑进行放大测量,这就迫切需要发展出一种高精度的检测方法能够同时实现希腊梯子光子筛的焦距和衍射极限焦斑特性的测量.

数字全息^[23-25]以其简单灵活的特点,自出现以来就受到国内外的极大关注.随着相关技术的发展,数字全息被广泛地应用于许多领域,且其分辨率也在不断地提高^[26-28].2016 年,王骏等^[29]提出用全息干涉术可视化观测液相扩散过程,这一方法可实现对液相扩散传质过程的快速、实时及高精度测量.2017 年,徐云等^[30]提出用数字全息显微的方法对衍射光学元件进行测量,确保制造的元件与设计匹配,其指出这种方法低成本,实时,分辨率高,且能对元件的整个部分进行测量.本文采用数字全息的方法对由希腊梯子构造的双焦点光子筛进行测量和聚焦特性的研究,利用离轴全息光路,通过一次实验测量获得离焦处的复振幅分布,再通过衍射数字计算得到器件的焦距以及远场衍射的焦斑分布,从而验证希腊梯子光子筛模型的正确性,为器件后续的功能设计与工程应用提供数据支撑.

1 理论模型

公元 140 年,Theon^[31]提出了一种利用两行整数可以简单计算无理数 $\sqrt{2}$ 的方法,这种方法被称为希腊梯子,其可描述为

$$\begin{matrix} 1 & 3 & 7 & 17 & 41 & \dots \\ 1 & 2 & 5 & 12 & 29 & \dots \end{matrix} \quad (1)$$

第一行梯子的第 n 个数定义为 y_n , $y_n = x_n + x_{n-1}$, 第二行梯子的第 n 个数定义为 x_n , $x_n = x_{n-1} + y_{n-1}$, y_n 与 x_n 的比值渐近于 $\sqrt{2}$.

研究组前期已对希腊梯子编码产生三维阵列焦点做了详细理论研究^[10],希腊梯子光子筛的编码方法和

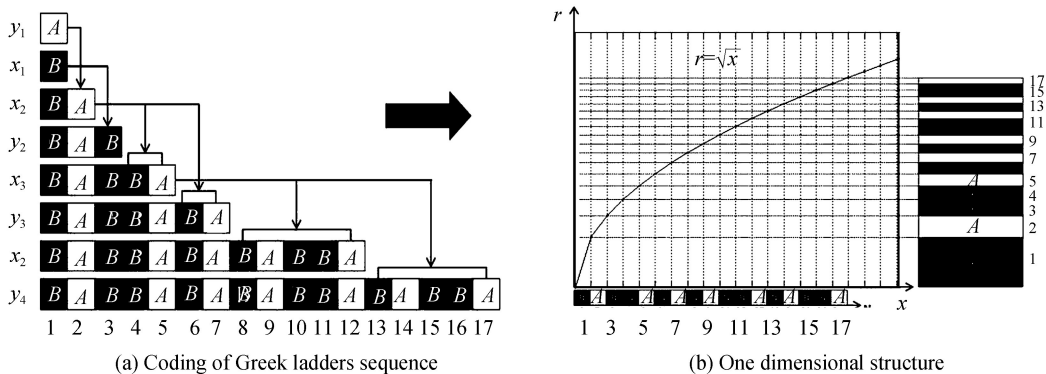


图 1 希腊梯子光子筛的构造过程

Fig.1 Schematic of generation of Greek ladders photon sieve

文献[17]对斐波那契数列编码十分类似,主要应用数列形成规律对光子筛孔所处环带轨道进行设计,二元化的非周期希腊梯子光子筛的环排列结构用两个种子元素生成 $y_1 = A, x_1 = B$,其它元素结构都是由前面这两个种子元素合成得到的.按照上面描述的规律,可以得到, $x_2 = BA, y_2 = BAB, x_3 = BABBA, y_3 = BABBABA, \dots$.以最大数字 17 为例,图 1 详细介绍了希腊梯子光子筛的设计生成过程,需要设计的环带总数目为希腊梯子数列对应数字 N_p ,其环带半径满足公式 $r_n = R_0 \sqrt{n} (n = 1, 2, 3 \dots N_p)$, R_0 由设计的光子筛大小决定,筛孔随机分布在种子元素 A 所对应的轨道上,类似菲涅耳波带片的分布方式,这种轨道称为偶希腊梯子轨道,相应的种子元素 B 所对应轨道称为奇希腊梯子轨道.偶希腊梯子轨道上筛孔透光,奇希腊梯子轨道上无筛孔,形成了振幅型的光子筛.按照上述规律依次映射我们构造出了轴上双焦点的希腊梯子光子筛,后文称为双焦点光子筛,设计的光子筛环带总数为 239 环,其中包含有 99 个亮环和 140 个暗环,相应的

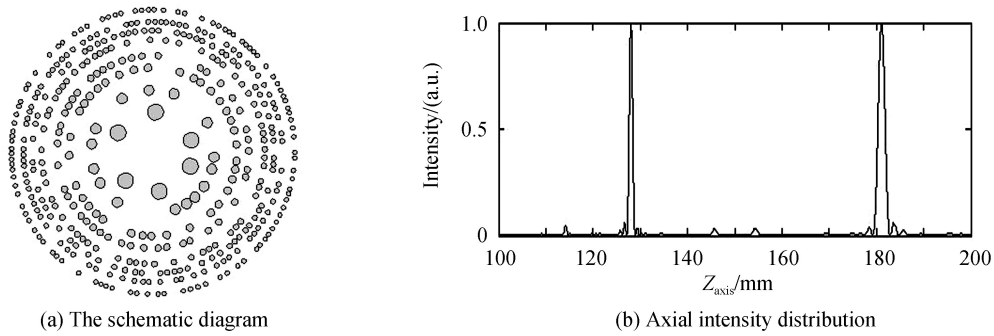


图 2 双焦点光子筛的结构示意图和轴上光强分布

Fig.2 The schematic diagram and axial intensity distribution of bifocal photon sieve

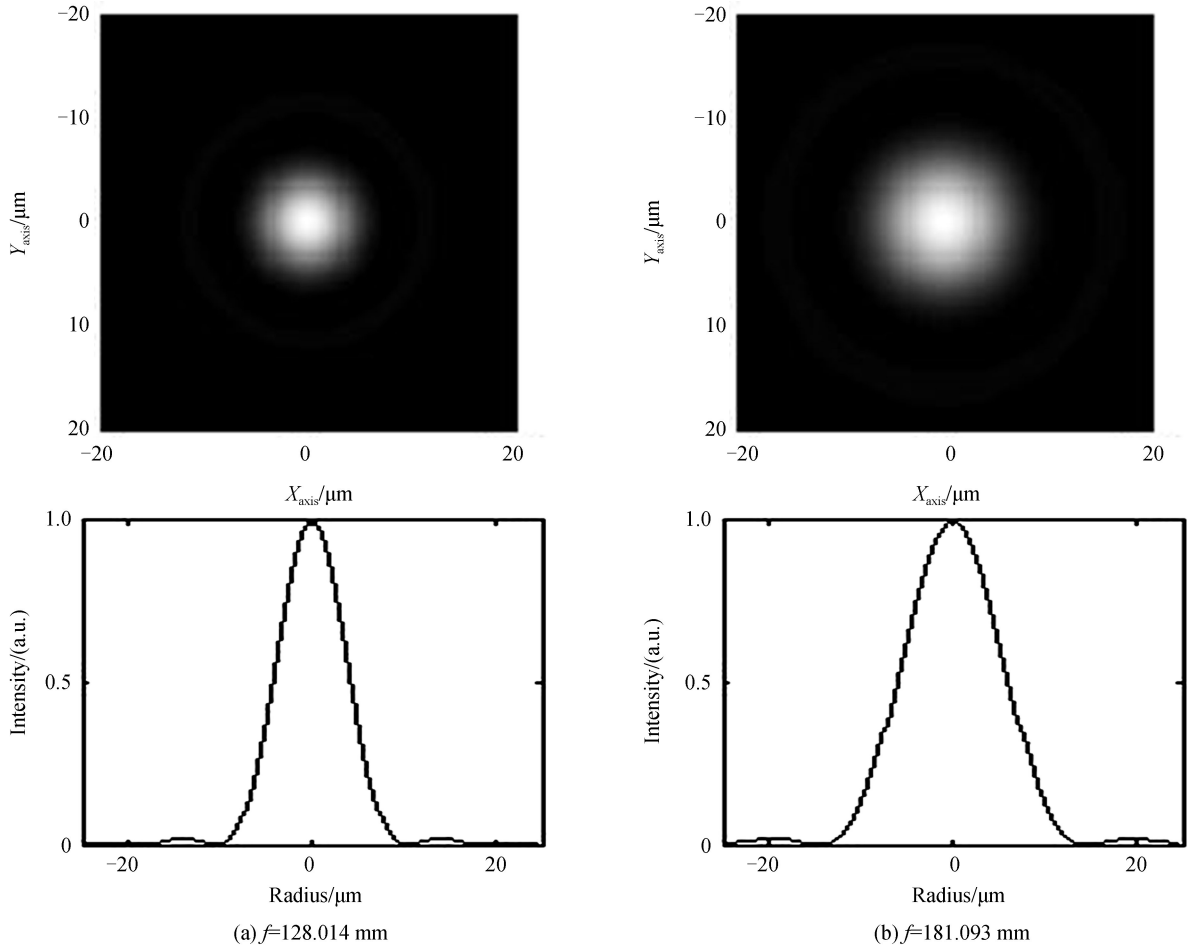


图 3 双焦点光子筛在两个焦平面上的光强分布

Fig.3 The intensity distribution of bifocal photon sieve at two focal planes

前 21 环的光学结构如图 2(a)所示.激光的入射波长 632.8 nm,参考焦距 150 mm,轴上双焦点的光学焦距比的期望值等于 $\sqrt{2}$,沿光轴方向的强度分布如图 2(b)所示,两个焦点分别出现在 128.014 mm 和 181.093 mm 处,两者的光学焦距比为 1.414 6,相对于期望值的偏差小于 0.03%.两个焦平面上的光强分布如图 3 所示,其对应的半值全宽(Full Width at Half Maxima,FWHM)分别为 8.74 μm 和 12.36 μm ,焦斑全宽度的比值为 12.36/8.74=1.414 2,完全等于光学焦距比的期望值.

2 实验系统及结果分析

2.1 实验系统

一般的单焦点测量系统是用 CCD 直接进行多次扫描来测量获取焦距和焦斑,测量精度较低.本文中双焦点光子筛的两个焦斑直径分别为 20.52 μm ,29.02 μm ,若用像元尺寸为 5.5 μm 的 CCD 直接进行实际扫描测量,每个焦斑由于特别小,只能用 CCD 的 8~15 个像素来记录其分布,实验中 CCD 记录的焦斑若有 1 个像素偏差就会导致 7%~12.5%的误差,得不到准确的结果.本文提出采用离轴数字全息方法结合变采样间距的衍射传输算法实现该类器件的测量,可同时获得双焦点器件的双焦距和焦斑分布,且操作简单.

实验中采用基于马赫-泽德干涉的离轴全息光路,如图 4 所示,所用激光器波长为 632.8 nm,CCD 像素数为 2472 pixel \times 3296 pixel,像元尺寸为 5.5 $\mu\text{m}\times$ 5.5 μm ,物体放在其中一条光路中,到 CCD 的距离为 z_1 ,本文中双焦点光子筛的最小焦距大于 z_1 .本文中用于测量的双焦点光子筛是由深圳清溢光电股份有限公司利用光刻技术加工制造的,其实物图如图 5 所示.

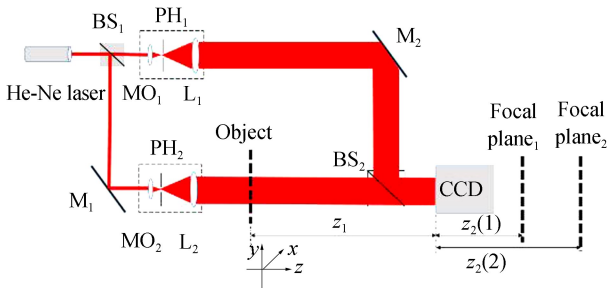


图 4 离轴全息光路

Fig.4 Off-axis holography optical configuration

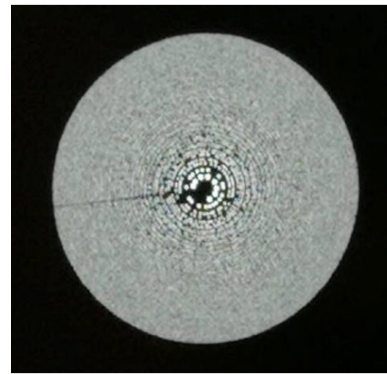


图 5 双焦点光子筛的实物图

Fig.5 The figure of bifocal photon sieve

2.2 基于自动对焦的焦斑分布测量原理

若 $u(x_1, y_1, 0)$ 为物体到达 CCD 处的复振幅分布, $r(x_1, y_1, 0)$ 为参考光到达 CCD 处的复振幅分布, 则 CCD 接收的光强为

$$I = |u(x_1, y_1, 0)|^2 + |r(x_1, y_1, 0)|^2 + u(x_1, y_1, 0)r(x_1, y_1, 0)^* + u(x_1, y_1, 0)^*r(x_1, y_1, 0) \quad (2)$$

对 I 作傅里叶变换, 可以得到其在频域中分成明显的 3 部分 0 级, +1 级, -1 级, 其中 $u(x_1, y_1, 0)r(x_1, y_1, 0)^*$ 对应的是 +1 级, 在频域中将这部分取出来, 对其进行傅里叶逆变换则可以得到 $u(x_1, y_1, 0)r(x_1, y_1, 0)^*$ 的复振幅分布, 描述为

$$F(I) = F[|u(x_1, y_1, 0)|^2 + |r(x_1, y_1, 0)|^2] + F[u(x_1, y_1, 0)r(x_1, y_1, 0)^*] + F[u(x_1, y_1, 0)^*r(x_1, y_1, 0)] \quad (3)$$

$$u(x_1, y_1, 0)r(x_1, y_1, 0)^* = F^{-1}\{F[u(x_1, y_1, 0)r(x_1, y_1, 0)^*]\} \quad (4)$$

但得到的复振幅分布还包含参考光的相位分布, 为了得到只包含物体相位的复振幅分布, 采用双曝光^[32]的方法. 双曝光法, 即是分别记录放置物体和不放置物体的全息图, 采用式(2)~(4)由全息图分别得到放置物体和不放置物体时的复振幅分布, 两者相除得到只包含物体相位的“纯净”复振幅分布, 即 $u(x_1, y_1, 0)$.

将 $u(x_1, y_1, 0)$ 用菲涅尔-基尔霍夫衍射公式进行数值计算得到焦点处的焦斑分布. 但直接用公式采用傅里叶变换进行数值计算时得到的焦斑依然只能由 8~15 个像素来记录分布, 所以采用变采样间距的衍射传输算法^[33], 其原理图如图 6. 变采样间距的衍射传输算法介绍如下.

将得到的物体在 CCD 处的复振幅分布 $u(x_1, y_1, 0)$ 继续向后传播,在距离 CCD 的 z_2 平面处也即焦点附近场分布为

$$u(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{j\lambda z_2} \iint u_c(x_1, y_1, 0) e^{-\frac{j}{2F}(x_1^2 + y_1^2)} e^{j\frac{k}{2z_2}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]} dx_1 dy_1 \quad (5)$$

式中, $u_c(x_1, y_1, 0) = u(x_1, y_1, 0) e^{j\frac{k}{2F}(x_1^2 + y_1^2)}$, u_c 为构造的等效光场,由于 $u(x_1, y_1, 0)$ 具有球面波会聚因子,其乘以一定发散波因子(发散因子焦距为 F , F 稍大于 z_2),得到的 $u_c(x_1, y_1, 0)$ 为近似平面波,从式(5)可以看出,焦点附近场由 $u_c(x_1, y_1, 0)$ 和会聚波因子 $e^{-j\frac{k}{2F}(x_1^2 + y_1^2)}$ 乘积的菲涅尔衍射积分得到,式(5)进一步化简为

$$u(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{1 - \frac{z_2}{F}} e^{-j\frac{k}{2} \frac{x_2^2 + y_2^2}{F - z_2}} \frac{1}{j\lambda Z} \iint u_c(x_1, y_1, 0) e^{j\frac{k}{2Z}[(\frac{Z}{z_2}x_2 - x_1)^2 + (\frac{Z}{z_2}y_2 - y_1)^2]} dx_1 dy_1 \quad (6)$$

式中, $Z = z_2 / (1 - \frac{z_2}{F})$, 令 $X = x_2 / (1 - \frac{z_2}{F})$, $Y = y_2 / (1 - \frac{z_2}{F})$, 式(6)可另写为

$$u(x_2, y_2, z_2) = \frac{1}{1 - \frac{z_2}{F}} e^{-j\frac{k}{2} \frac{x_2^2 + y_2^2}{F - z_2}} u(X, Y, Z) \quad (7)$$

式中

$$u(X, Y, Z) = \frac{1}{j\lambda Z} \iint u_c(x_1, y_1, 0) e^{j\frac{k}{2Z}[(X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2]} dx_1 dy_1 \quad (8)$$

通过式(7)、(8)可以看出,焦点附近场等效为光场 $u_c(x_1, y_1, 0)$ 传播等效距离 Z 得到的场乘以一常数因子,同时考虑到坐标变换 $x_2 = (1 - \frac{z_2}{F})X$, $y_2 = (1 - \frac{z_2}{F})Y$, 利用角谱后向传输算法^[34]对式(7)进行数值计算时,坐标相当于进行了压缩,压缩倍数为 $1 - \frac{z_2}{F}$, 因此通过此方法在同样像素总数情况下,将焦平面的计算窗口尺寸进行压缩,变换后的采样间距表示为 $\Delta x_2 = (1 - \frac{z_2}{F})\Delta x_1$, 其中, Δx_1 为 CCD 的像元尺寸, Δx_2 为变换后的采样间距,通过变换可以得到百纳米量级的采样间距,变换后的采样间距约为原来采样间距的 1/10, 从而可准确表示焦斑的结构。

由于采用数字全息的方法间接对双焦点光子筛进行测量,所以实验中焦距是 CCD 到被测光子筛的距离 z_1 与 CCD 到焦面的距离 z_2 (本文中的双焦点光子筛由于有两个焦点,所以 $z_2(1)$, $z_2(2)$ 分别代表 CCD 到两个焦平面的距离)之和,如图 4 所示.其中,由于基于高频信息的标准差对比算法^[35-37]对双焦点光子筛不敏感,本文采用基于高频信息的高阶变异系数对 z_1 进行距离的自动对准,其中高阶变异系数是高阶方差与期望的比值.该自动对准算法的评判标准在最小值处对应的距离为正确距离,用数学公式表示为

$$C_n = \frac{1}{I_h} \left[\frac{\sum_{x,y} || I_h(x, y) | - \bar{I}_h |^n}{M \cdot N} \right]^{1/n} \quad (9)$$

式中, M , N 是全息图取样点数,经过多次实验测试,实验中的 n 取值为 8. $I_k(x, y)$ 表示全息图的高频部分, \bar{I}_h 为高频信息的均值,其表达式分别为

$$I_h(x, y) = I(x, y) - \bar{I} \quad (10)$$

$$\bar{I}_h = \frac{\sum_{x,y} | I_h(x, y) |}{M \cdot N} \quad (11)$$

式中, $I(x, y)$ 是不同再现距离对应的再现像, \bar{I} 是不同距离处再现像的平均值。

本文中双焦点光子筛在微米量级的离焦面处能量迅速衰减,通过数值计算连续扫描可以得到不同距离处的光强分布,光强只有在焦点处才会出现极大值,由此即可确定 z_2 , 如此便可解决轴上多焦点器件的焦距

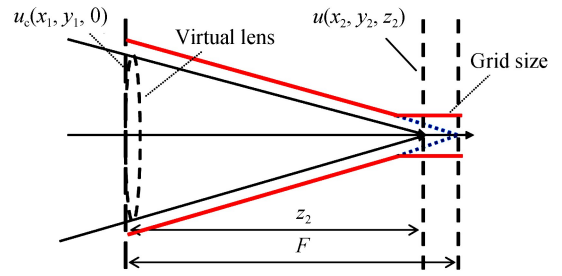


图 6 变采样间距算法原理
Fig.6 Schematic diagram of variable sampling interval algorithm

和焦斑分布测量问题.

2.3 双焦点光子筛的焦距和焦斑测量结果

实验中 CCD 记录的离焦面处全息图如图 7,由 2.2 可知为了得到双焦点光子筛的焦斑分布,需要得到其在 CCD 处的“纯净”复振幅分布,由双曝光法得到的器件在 CCD 处“纯净”的复振幅分布,其振幅分布和相位分布如图 8.



图 7 双焦点光子筛在 CCD 处的全息图
Fig.7 The hologram of bifocal photon sieve at the CCD

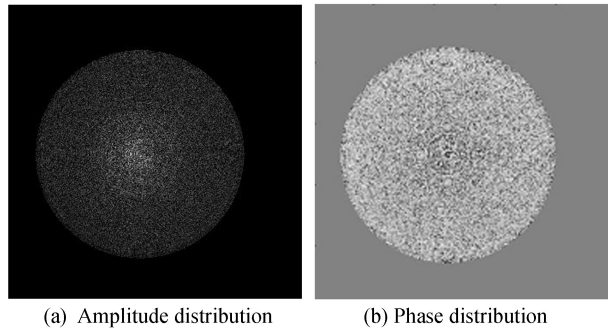
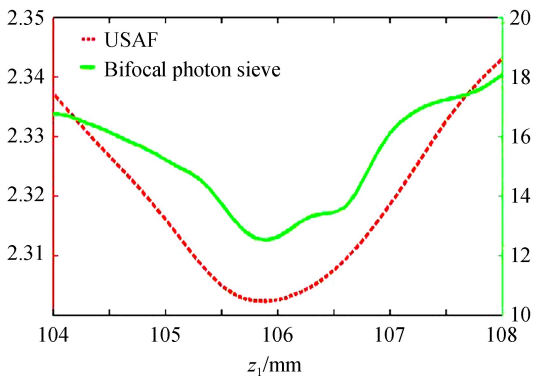
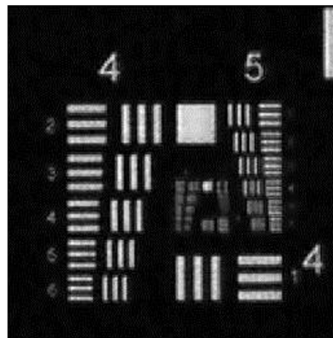


图 8 双焦点光子筛在 CCD 处的振幅和相位分布
Fig.8 The amplitude and phase distribution of bifocal photon sieve at the CCD

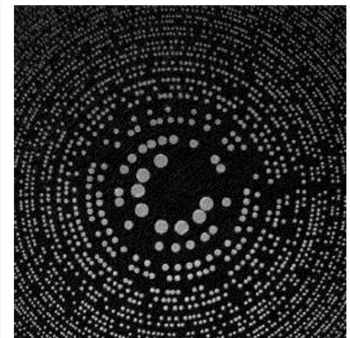
在同一距离处,对 USAF1951 分辨率板和双焦点光子筛进行测试,利用 2.2 中提到的自动对准算法得到的再现像距离同为 105.9 mm,两者的评判标准随距离变化曲线如图 9(a),分辨率板、双焦点光子筛在 $z_1 = 105.9$ mm 处的再现像分别如图 9(b),(c)所示.从图 9(b)中可以看出分辨率板的 5.4 级可以分辨,即其对应的三条横线和三条竖线可辨别,当距离为 105.9 mm 时,由 $\Delta x = \lambda z_1 / (N \Delta x_1)$ ^[34],其中 N 为再现像取样数, Δx_1 为 CCD 像元尺寸大小,可得到理论上再现像的分辨率为 49 mm(每毫米线对),而分辨率板中 5.4 的线对数为 45.3 mm(每毫米线对),由此可见,数字再现像的分辨率已经达到了实验系统的理论分辨极限,可以判定测得的距离是准确的.



(a) The curve of criteria with variation of distance



(b) The reconstructed image of USAF



(c) The reconstructed image of bifocal photon sieve

图 9 USAF1951 分辨率板和双焦点光子筛的评判标准随距离变化曲线和再现像

Fig.9 The curve of criteria with variation of distance and the reconstructed image of USAF1951 resolution target and bifocal photon sieve

如 2.2 节所述,由于本文中双焦点光子筛的固有特性,即只有在焦点处光强才会出现极大值,通过数值计算得到不同距离处沿光轴方向的光强分布,其结果如图 10 所示,光强极大值对应的距离就是两个焦点相对 CCD 的位置,得到的距离分别为 $z_2(1) = 22.79$ mm, $z_2(2) = 74.53$ mm.

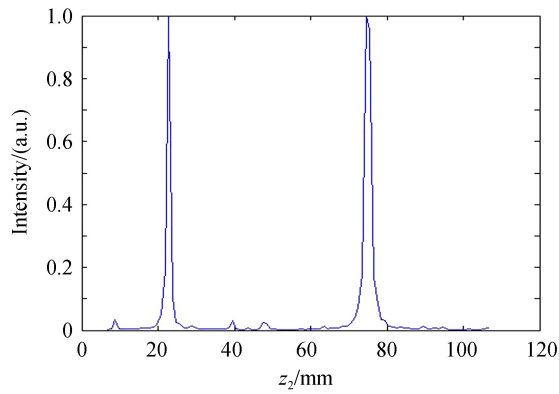


图 10 沿光轴方向上光强分布曲线(以 CCD 为参考点)

Fig.10 Intensity distribution curve along the optical axis direction(taking CCD as a reference point)

实验测量结果如表 1 所示,实验的测量焦距分别为128.69 mm和180.43 mm,与设计值的偏差分别为0.53%和0.37%. 图11为两个焦面上的焦斑分布,其形状为圆形,并将其一维分布特征与前文理论模型对比,

表 1 双焦点光子筛的测量值

Table 1 Measurements of bifocal photon sieve

	Theoretical value	Measured value	Deviation/%
Focal length/mm	128.014	128.69	0.53
	181.093	180.43	0.37
FWHM/ μm	8.74	8.99	2.86
	12.36	12.59	1.86

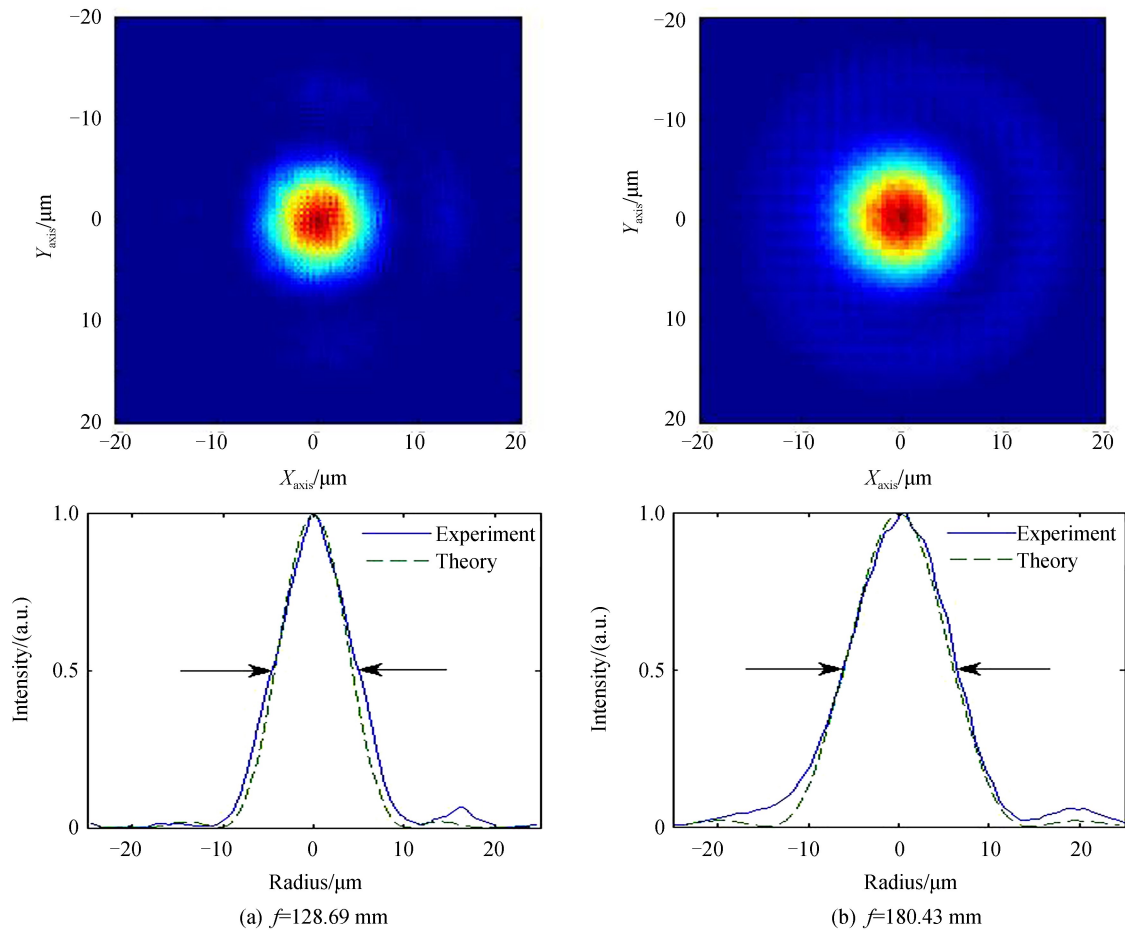


图 11 双焦点光子筛在两个焦面上的焦斑分布

Fig.11 The focal spots of bifocal photon sieve at two focal planes

可见中心主瓣匹配较好,旁瓣略有差异.实验测量得到的半值全宽分别为 $8.99\ \mu\text{m}$ 和 $12.59\ \mu\text{m}$,与设计值的偏差分别为 2.86% 和 1.86% .远焦距要高于短焦距对应的焦斑精度,其原因在于实验中的激光波面无法达到理论上的平面波面,而相同的波像差影响短焦距比长焦严重.尽管存在波像差,但是两个焦面上焦斑的偏差都小于 3% ,这也间接说明扩束后的波前已经非常接近平面波.因此,采用本文提出的方法时,能够同时获得轴上多焦点器件的焦距和焦平面上光强的精细分布,这也为其它微纳器件的光学性能测试提供了一个参考方法.

3 结论

提出了一种对光子筛类的衍射元件进行性能检测的测量方法,针对单焦点测量系统直接用 CCD 测量时需多次扫描测量且精度较低的特点,利用数字全息的方法对双焦点光子筛的焦距和焦斑进行测量,结合自动对准算法和强度最大值连续扫描的方法实现了该类器件的焦距测量,利用变采样间距的衍射传输算法获得了设计器件焦平面的较高分辨率的聚焦场特征.实验结果表明,采用本文中的测量方法得到的双焦点光子筛的焦距和焦斑分布的精度较高,且操作简单,验证了测量方法的正确性.双焦点光子筛在生物成像、下一代光刻技术、高分辨显微等方面有很好的应用前景,值得进一步更深入地研究.另外,由于实验测量的对象是衍射极限光斑,因此对光路的输出光束质量要求比较高,在光学系统精度满足条件的前提下,本文提出的测量方法对微纳器件性能测试具有普适的借鉴意义.

参考文献

- [1] KIPP L, SKIBOWSKI M, JOHNSON R L, *et al.* Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieve[J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 184-188.
- [2] BAEZ A V. Fresnel zone plate for optical image formation using extreme ultraviolet and soft x radiation[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1961, **51**(4): 405-412.
- [3] KIRZ J. Phase zone plates for x rays and the extreme uv[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, **64**(3): 301-309.
- [4] ARSENAULT H. Diffraction theory of Fresnel zone plates[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1968, **58**(11): 1536-1536.
- [5] CAO Q, JAHNS J. Focusing analysis of the pinhole photon sieve: individual far-field model[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2002, **19**(12): 2387-2393.
- [6] ZHANG Jun-yong, CAO Qing, LU Xing-qiang, *et al.* Focusing contribution of individual pinholes of a photon sieve: dependence on the order of local ring of underlying traditional Fresnel zone plate[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(3): 256-258.
- [7] CHENG Yi-guang, LIU Jun-bo, HU Song, *et al.* Generation of localized hollow beams with hoton sieves[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(7): 0705003.
程依光, 刘俊伯, 胡松, 等. 利用光子筛产生局域空心光束[J]. 光学学报, 2015, **35**(7): 0705003.
- [8] GIMENEZ F, MONSORIU J A, FURLAN W D, *et al.* Fractal photon sieve[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(25): 11958-11963.
- [9] XIE Chang-qing, ZHU Xiao-li, SHI Li-na, *et al.* Spiral photon sieve apodized by digital prolate spheroidal window for the generation of hard-x-ray vortex[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(11): 1765-1767.
- [10] ZHANG Jun-yong. Three-dimensional array diffraction-limited foci from Greek ladders to generalized Fibonacci sequences[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(23): 30308-30317.
- [11] KINCADE K. Photon sieve enhance weapons vision[J]. *Laser Focus World*, 2004, **40**(2): 34-37.
- [12] SACCONI L, FRONER E, ANTOLINI R, *et al.* Multiphoton multifocal microscopy exploiting a diffractive optical element[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(20): 1918-1920.
- [13] LIU Yong, KUANG Cui-fang, LIU Xu. A method for achieving multiple foci with subdiffraction resolution along the axial direction[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, **62**(5): 364-368.
- [14] MONSORIU J A, CALATAYUD A, REMON L, *et al.* Bifocal fibonacci diffractive lenses[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, **5**(3): 3400106.
- [15] FERRANDO V, CALATAYUD A, ANDRES P, *et al.* Imaging properties of kinoform fibonacci lenses[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(1): 6500106.
- [16] JI Sheng-zhe, ZHU Lin-wei, SUN Mei-yu, *et al.* Axial two focus zone plate under tight focusing conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0305003.
冀胜哲, 朱林伟, 孙美玉, 等. 紧聚焦条件下的轴向双焦点波带片[J]. 光学学报, 2015, **35**(3): 0305003.

- [17] KE Jie, ZHANG Jun-yong. Focusing and imaging properties of fibonacci photon sieve[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9): 0923001.
柯杰, 张军勇. 斐波那契光子筛的聚焦成像特性[J]. *光学学报*, 2015, **35**(9): 0923001.
- [18] KE Jie, ZHANG Jun-yong, REN Zhi-yuan. Two approaches to three-dimensional array foci of generalized Fibonacci structures[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(6): 060501.
- [19] KE Jie, ZHANG Jun-yong. Focusing properties of phase-only generalized Fibonacci photon sieves [J]. *Optics Communications*, 2016, **368**: 34-38.
- [20] MACHADO F, FERRANDO V, FURLAN W D, *et al.* Diffractive m-bonacci lenses[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(7): 8267-8273.
- [21] CHENG Guan-xiao, XING Ting-wen, YANG Yong, *et al.* Experimental characterization of optical properties of photon sieve[C]. SPIE, 2007, **6724**(535): 67240D.
- [22] GAO Zhong, LUO Xian-gang, MA Jun-xian, *et al.* Imaging properties of photon sieve with a large aperture[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(4): 614-618.
- [23] SCHNARS U, JUPTNER W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(2): 179-181.
- [24] YAMAGUCHI I. Phase-shifting digital holography[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(16): 1268-1270.
- [25] CUCHE E, BEVILACQUA F, DEPEURSINGE C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(5): 291-293.
- [26] WENGJia-wen, YANG Chu-ping, LI Hai. Self-interference incoherent digital holography by compressive sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(2): 0209001.
翁嘉文, 杨初平, 李海. 自干涉非相干数字全息压缩感知重建[J]. *光学学报*, 2016, **36**(2): 0209001.
- [27] HUANG Su-juan, ZENG Jun-zhang, YAN Cheng, *et al.* 3D Refractive index measurement for spun polarization-maintaining optical fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6): 0612001.
黄素娟, 曾俊璋, 闫成, 等. 扭转保偏光纤的三维折射率测量[J]. *光子学报*, 2017, **46**(6): 0612001.
- [28] PANDIYAN VP, KHARE K, JOHN R. High resolution near on-axis digital holography using constrained optimization approach with faster convergence[J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(9): 093103.
- [29] WANG Jun, YANG Rong, ZHENG Jiao, *et al.* Visualized measurement of the liquid phase diffusion by using digital holographic interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0412001.
王骏, 杨蓉, 郑娇, 等. 基于数字全息干涉术的液相扩散过程可视化[J]. *光子学报*, 2016, **45**(4): 0412001.
- [30] XU Y, TAN B S, LAW G H, *et al.* A digital holography microscopy system for DOE measurement[C]. SPIE, 2017, **10449**: 1044903.
- [31] OSLER T J, WRIGHT M, ORCHARD M. Theon's ladder for any root[J]. *International Journal of Mathematical Education in Science & Technology*, 2005, **36**(4): 389-398.
- [32] FERRARO P, NICOLA S D, FINIZIO A, *et al.* Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(11): 1938-1946.
- [33] FEIGENBAUM E, SACKS R A, MCCANDLESS K P, *et al.* Algorithm for Fourier propagation through the near-focal region[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(20): 5030-5035.
- [34] QU Wei-juan. Domain structure detection in crystal by use of digital holographic interferometry and aperture diffraction calculation[D]. Shanghai institute of optics and fine mechanics, Chinese academy of sciences, 2007: 19-40.
曲伟娟. 基于数字全息干涉术的晶体畴结构检测和孔径衍射计算[D]. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2007: 19-40.
- [35] LI Wei-liang. Research on autofocusing and image enhancement technology in digital holography[D]. Nanjing: Nanjing university of posts and telecommunications, 2016: 24-32.
李维亮. 数字全息自动聚焦及像质增强技术研究[D]. 南京邮电大学, 2016: 24-32.
- [36] MEMMOLO P, DISTANTE C, PATURZO M, *et al.* Automatic focusing in digital holography and its application to stretched holograms[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(10): 1945-1947.
- [37] ILHAN H A, DOGAR M, OZCAN M. Fast autofocusing in digital holography using scaled hologram[J]. *Optics Communications*, 2013, **287**(2): 81-84.