

doi: 10.3788/gzxb20144305.0504002

螺旋光子筛用于相衬成像的模拟研究

余建^{1,2}, 李军², 易涛², 刘慎业², 肖沙里¹, 杨志文²,
李守贝², 陈黎², 邓克立², 郑建华²

(1 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

(2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了提高螺旋波带片用于相衬成像的分辨率和成像对比度, 因此本文将螺旋波带片的透光环带替换为透光微孔, 以类-贝塞尔函数作为螺旋光子筛透过率的振幅调制窗函数设计了一种螺旋光子筛. 在相同的特征尺寸下, 螺旋光子筛比螺旋波带片具有更大的数值孔径, 因此分辨率更高. 同时基于光瞳切趾原理, 经过类-贝塞尔振幅调制窗函数对螺旋光子筛透光微孔的分布进行调制, 螺旋光子筛的成像对比度将高于螺旋波带片. 通过数值计算和仿真分析表明: 螺旋光子筛的点扩展函数主瓣宽度相对于螺旋波带片更窄, 旁瓣幅值也相对更低. 在相衬成像中, 螺旋光子筛不仅能够消除螺旋波带片对圆盘状位相物体成像时图像的“浮雕”效应而且能够更为清晰地分辨出位相跳变更为密集的周期矩形条状物体. 因此, 螺旋光子筛用于相衬成像中将具有更高的成像分辨率和成像对比度, 其在医学领域将具有广阔的运用前景.

关键词: 螺旋波带片; 螺旋光子筛; 振幅调制; 相衬成像; 类-贝塞尔函数; 径向希尔伯特变换; 边沿增强; 分辨率; 对比度; 浮雕效应

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0504002-6

Simulation Study of Spiral Photon Sieves in Phase-contrast Imaging

YU Jian^{1,2}, LI Jun², YI Tao², LIU Shen-ye², XIAO Sha-li¹, YANG Zhi-wen²,
LI Shou-bei², CHEN Li², DENG Ke-li², ZHENG Jian-hua²

(1 College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2 Leaser Fusion Research Center, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to improve the imaging resolution and image contrast, the method proposed in this paper to achieve phase-contrast imaging with a spiral photon sieves. The transmission zone of the spiral zone plate is replaced appropriately by a large number of pinholes, with Bessel-like function as the spiral photon sieves apodization window. The same minimum features sizes, the numerical aperture of spiral photon sieves is increased compared to spiral zone plate, so spiral photon sieves show substantially better spatial resolution the spiral zone plate according to the Rayleigh resolution criterion. The advantage of spiral photon sieves is that can modulate the population of the pinholes per zone with an apodization window, resulting in high signal-to-noise ratio or extremely low side lobe. So the spiral photon sieves have a high imaging contrast based on the principle of pupil apodization. Compared with the spiral zone plate, the point spread function of the spiral photon sieve the main lobe width is relatively narrow and the side lobe amplitude is relatively lower. In phase-contrast imaging, spiral photon sieve can not only eliminate image “relief” effect in the circular phase object imaging but also can distinguish dense phase jump in the periodic rectangular strip phase object imaging, improving greatly the image contrast. Therefore, the spiral photon sieves has higher resolution and contrast in phase-contrast imaging, so that

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11105129)资助

第一作者: 余建(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为衍射光学元件设计及其运用. Email: yujiancqnu@sina.cn

通讯作者: 易涛(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为 X 射线光学. Email: ylexington@sina.com

收稿日期: 2013-08-20; 录用日期: 2013-10-30

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

it will have broad application prospects in the field of medicine.

Key words: The spiral zone plate; Spiral photon sieve; Amplitude modulation; Phase contrast imaging; Bessel-like function; Radial Hilbert transform; Edge enhancement; resolution; Contrast; Relief effect

OCIS Codes: 040.7480; 050.1970; 120.5050

0 引言

近年来,相衬成像技术成为优于普通吸收成像的新型成像技术,受到人们的普遍重视.对于弱吸收或者没有吸收的轻物质材料,采用吸收成像法上不能获得他们的信息,而采用相衬成像法却能够获取他们复杂的多层轻物质结构,如相衬成像对软组织的检测^[1].X射线的相衬成像方法是以光的干涉衍射性质为基础,通过测量其相位变化来获得相关联的光强度变化,如干涉成像^[2]是通过测量相位,衍射增强成像^[3]是通过测量相位一阶导数,类同轴全息成像^[4]是通过测量相位二阶导数来获得其关联的强度物理量.

2000年,Jeffrey A. Davis等人基于螺旋相位滤波原理提出了一种径向对称的图像边缘增强方法,即径向希尔伯特变换(Radial Hilbert Transform)^[5].由于径向希尔伯特变换对物体的相位变化梯度十分敏感或者说是相位一阶导数的变化极为敏感,因此具有希尔伯特变换功能的滤波器可以用于对位相物体的探测,并获得位相物体的内部结构图.但目前国内外对螺旋相位滤波用于相衬成像主要集中在基于 $4f$ 系统的螺旋相位板相衬成像^[6],其方法涉及到多个光学元件的共同作用,实验光路调节较为复杂且空间分辨能力有限.随着纳米加工技术(主要是波带片)的飞速发展,X射线显微成像技术在空间分辨上取得了巨大的进展.2007年,Anne Sakdinawat等人提出利用集成了径向希尔伯特变换功能和聚焦成像功能的螺旋波带片(Spiral Zone Plates, SZP)实现相衬成像^[7].2009年,Nandor Bokor等人模拟了利用拉盖尔-高斯振幅调制窗函数下的螺旋波带片相衬成像,获得了螺旋波带片用于相衬成像的重要模拟结果,证明了利用螺旋波带片相衬成像能够探测到极为微弱的位相变化^[8].

由于利用普通螺旋波带片成像的空间分辨率受最外环带宽度的限制且信噪比不高^[9-10],本文提出利用螺旋光子筛(Spiral Photon Sieves, SPS)来实现相衬成像功能的方法.螺旋光子筛继承了普通螺旋波带片的径向希尔伯特变换功能和聚焦成像功能,因此其也能够实现相衬成像.在相同的特征尺寸下螺旋光子筛的数值孔径可以做得比螺旋波带片更大,其空间分辨可以更好;通过优质窗函数对透过率的调制,螺旋光子筛能够压制旁瓣效应和抑制高阶衍射,故其成像衬比度更好^[11].本文利用具有特殊积分特性的类-贝塞尔函数作为调制螺旋光子筛微孔分布的调制窗函数,设计

一款能够有效提高分辨率和成像信噪比的螺旋光子筛,并利用该螺旋光子筛模拟了其对应位相物体的相衬成像效果,通过与螺旋波带片相衬成像效果的对比,证明了其高空间分辨和高衬度的优越性.

1 螺旋光子筛的设计及其聚焦特性

螺旋波带片透过率函数可以表示为一个螺旋相位板函数和一个聚焦透镜函数的乘积形式,因此同时具有径向希尔伯特变换功能和聚焦成像功能^[7].其透过率函数为

$$\text{SZP}(r, \varphi) = \text{circ}(r/R) \exp(jn\varphi) \exp(-j\pi r^2/\lambda f) \quad (1)$$

式中, n 为螺旋光子筛的阶数, λ 为入射光波长, f 为焦距, R 为螺旋波带片的通光孔径, (r, φ) 是输入面的极坐标.以螺旋波带片为基础,将螺旋波带片的透光环带用一定大小和规律分布的微孔替代就可将其改进为螺旋光子筛.由于普通螺旋波带片点扩散函数积分后的表达式中包含有贝塞尔函数部分^[12-13],故普通的振幅调制函数无法实现螺旋光子筛的旁瓣完全抑制.因此,本文选取了具有特殊积分特性的类-贝塞尔函数 $f(r)$ 作为振幅调制窗函数^[14-15],其表达式为

$$f(r) = J_{n+1}(\alpha r)/r \quad (2)$$

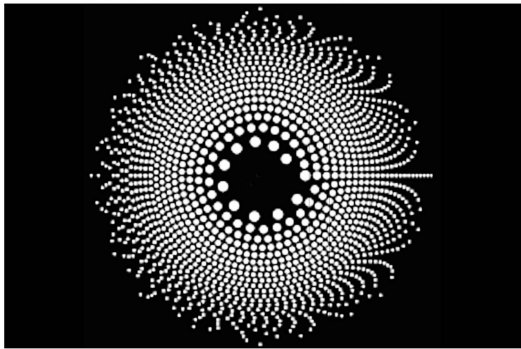
考虑到聚焦光强分布的旁瓣效果主要来自于螺旋光子筛的中心区域和来自于边缘区域的衍射.为了消除后者对旁瓣的贡献,令调制振幅在最边缘处为零,即当 $r=R$ 时, $J_{n+1}(\alpha R)/R=0$,可以解得最优调制参量 α 为

$$\alpha = \gamma_{n+1,1}/R \quad (3)$$

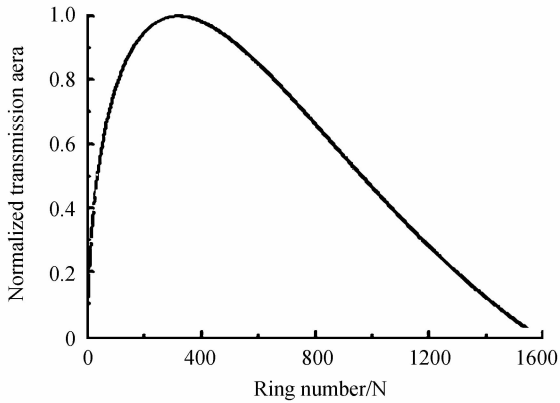
式中 $\gamma_{n+1,1}$ 为 $n+1$ 阶贝塞尔函数的第一个根.

一阶螺旋波带片和螺旋光子筛较为常见,且其结构设计简单,适用性较广,因此设计了特征尺寸相同的1阶螺旋波带片和类-贝塞尔振幅调制函数调制下的1阶螺旋光子筛.其工作波长 $\lambda=0.532 \mu\text{m}$,焦距 $f=100 \mu\text{m}$,螺旋波带片最外环宽度和螺旋光子筛最外环微孔直径均为 $3 \mu\text{m}$,其中螺旋光子筛微孔直径与对应螺旋波带片背景中对应环带的宽度比值 d/w 取优化值 1.5 ^[16].图1为所设计的螺旋光子筛和其光透过率分布.

根据光的叠加原理,螺旋光子筛在其后焦平面上任意一点的聚焦光场分布为其上各个透光微孔在焦面上该点光场的叠加之和.图2为数值计算获得的特征尺寸为 $3 \mu\text{m}$ 的螺旋波带片和螺旋光子筛焦平面上沿径向分布光强对数分布图.



(a) Spiral photon sieves



(b) Light transmittance

图1 螺旋光子筛及其光透过率

Fig.1 Spiral photon sieves and light transmittance

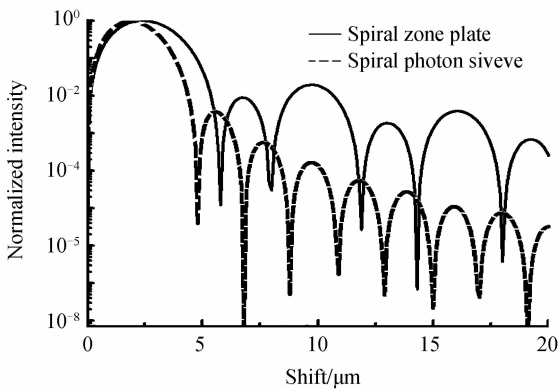


图2 焦平面光强分布

Fig.2 Distribution of light intensity on the focal plane

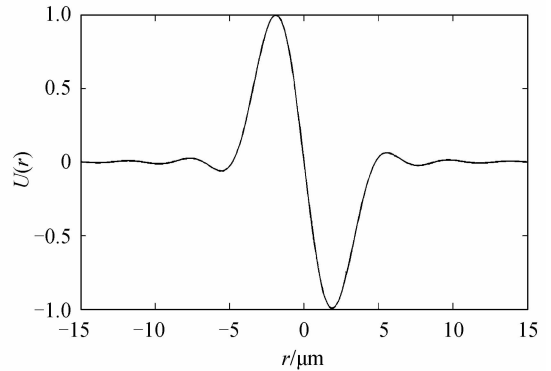
从图2中可知,螺旋波带片和类-贝塞尔函数调制后的螺旋光子筛相比,经类-贝塞尔函数调制的螺旋光子筛主瓣宽度更小同时其旁瓣相对值幅度也大幅降低,因此其空间分辨率和成像对比度都优于相同特征尺寸的螺旋波带片.高的空间分辨率对于相衬成像而言将能够分辨出更近距离的位相跳变,同时,较低的旁瓣效应将有利于提高成像的衬比度,极大地降低相衬成像所获图片的“浮雕”效应^[17],减小近距离物体成像之间的串扰现象,有利于精确判断物体的位相变化位置关系.

2 螺旋光子筛与螺旋波带片相衬成像模拟与分析

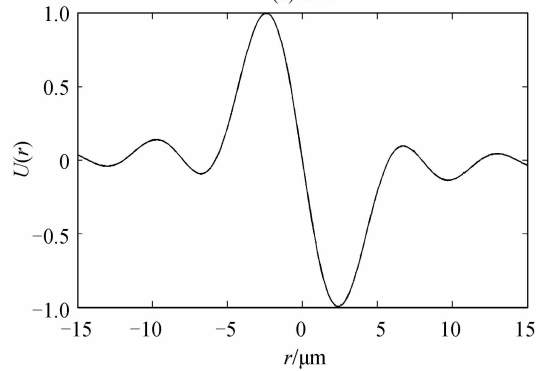
设位相物体的物函数为 $g(x,y)$,则输出像函数为输入位相物体的物函数 $g(x,y)$ 与1阶螺旋波带片或者光子筛点扩散函数 $U(x,y)$ 的卷积,即

$$\bar{g}(x,y) = g(x,y) * U(x,y) \quad (4)$$

螺旋光子筛和螺旋波带片的点扩散函数^[18]分布(r 为沿径向半径),如图3.



(a) SPS



(b) SZP

图3 SPS和SZP点扩散函数

Fig.3 Point spread function (SPS and SZP)

螺旋波带片和螺旋光子筛都集成了径向希尔伯特变换功能,根据式(4),点扩散函数主极大分布的卷积结果会使输入物函数相位变化的地方凸显出来,即对物函数相位跳变的地方实现增强而相位分布均匀的地方卷积结果为0,光强为0.同时,点扩散函数中的次极大分布与输入图像卷积会在边沿增强条纹附近产生弱小的光强分布,这些弱光强分布的存在使得边沿增强获得的图像具有类似“浮雕”的效果,这在一定程度上给图像的观察带来了不利的影响.当位相物体内部位相跳变的位置更为密集的时候,这种“浮雕”效果会更加不利于对图像的观察.通过螺旋波带片和螺旋光子筛点扩散函数的归一化振幅分布可见螺旋光子筛主极大更窄,次极大更小.因此,利用螺旋光子筛成像将能够具有更高空间分辨同时无明显的“浮雕”效应.

以最为简单的圆盘状位相物体为模拟对象(圆盘与其它地方的位相跳变差为 0.2π , 圆盘半径为 $20\ \mu\text{m}$), 图 4(b)~(e) 分别为其在螺旋波带片和螺旋

光子筛下获得的边沿增强图像及其强度沿着径向的分布图.

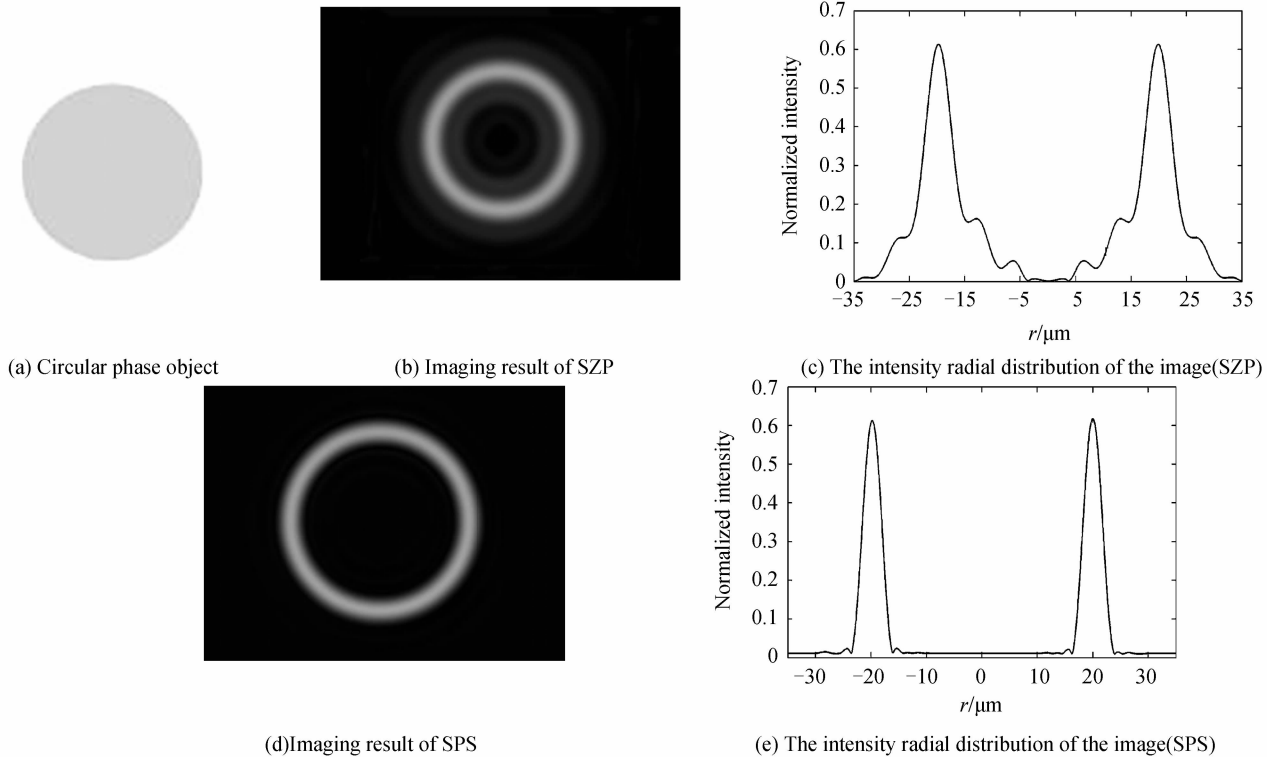


图 4 成像图像及其径向光强分布(SZP 和 SPS)

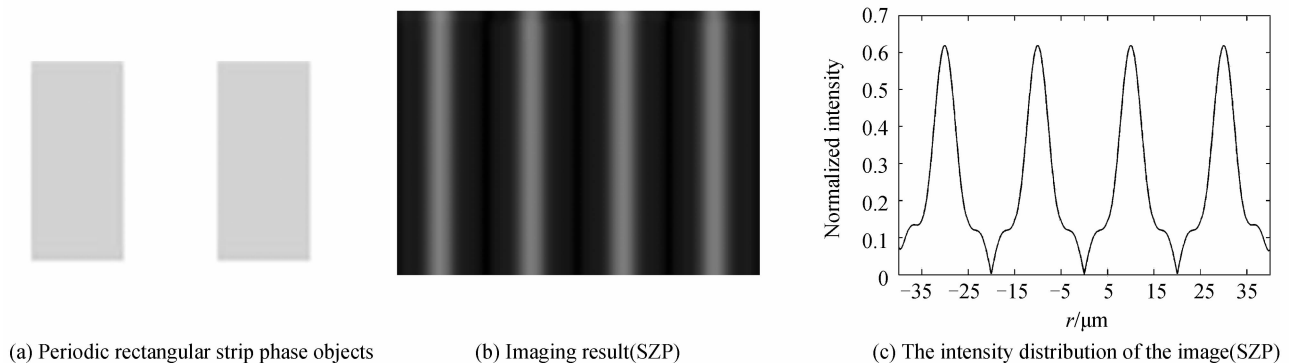
Fig. 4 Imaging and its radial intensity distribution(SZP and SPS)

由图 4 可以看出, 圆盘状位相型物体在经过螺旋光子筛之后的相衬成像效果要优于螺旋波带片, 其聚焦边沿轮廓的线条更加清晰、精细且其边沿增强图像没有前面提到的“浮雕”效应. 图 4(b)、(c) 中的“浮雕”效应是由于点扩散函数中的次极大分布与输入圆盘状位相物体物函数卷积后在边沿增强环附近产生的, 这在一定程度上给图像的观察带来了不利的影响. 图 4(d)、(e) 中的成像线条更细体现了螺旋光子筛的点扩散函数第一主极大环更小, 螺旋光子筛的分辨率更高.

以类似周期矩形条状分布的位相物体为例(其中,

条状分布的空间间距为 $20\ \mu\text{m}$ 且矩形条状区(灰色部分)与其它地方的位相跳变差为 0.2π), 分别在螺旋波带片和螺旋光子筛下的相衬成像效果如图 5.

从图 5(b)、(c) 可以看出, 螺旋波带片对该物体的成像存在较为严重的“浮雕”效应. 当位相跳变更为密集的时候, “浮雕”处的强度会进一步叠加增强, 将严重降低图像的对比度, 影响对图像的观察. 由图 5(d)、(e) 可知, 经过类-贝塞尔函数调制后的螺旋光子筛能够有效降低有用信号之间的串扰, 同时几乎没有“浮雕”效应, 各个边沿增强处互不影响, 目标图像的信噪比较高, 衬度较好.



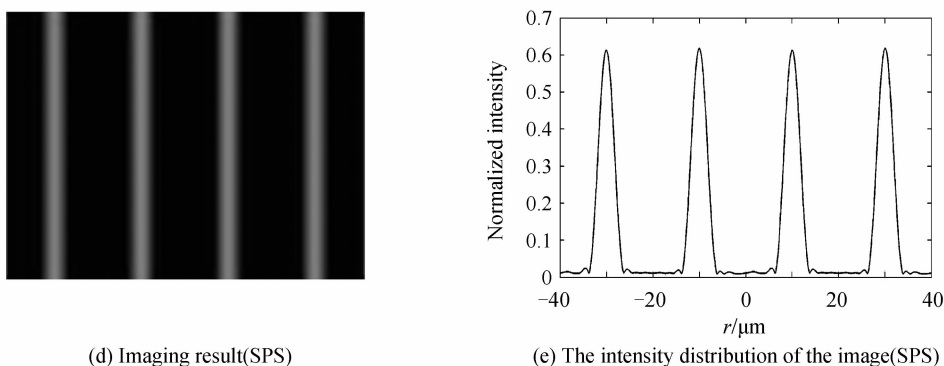


图5 成像图像及其光强分布(SZP和SPS)

Fig. 5 Imaging and its intensity distribution(SZP and SPS)

进一步缩小周期型矩形条状位相物体之间的间距到 $5\ \mu\text{m}$,使其位相跳变更加密集,分别在螺旋波带片和螺旋光子筛下成像,成像效果如图6所示.通过图6可以得出,当位相跳变的空间距离为 $5\ \mu\text{m}$ 时,螺旋波带片对其成像效果已十分差,物体能够清晰地被分辨

部分减少,靠近边缘处的边缘增强图像的形状已有所畸变.而利用螺旋光子筛对其成像的效果却依旧十分清晰,衬度较好,图像边缘并没有发生畸变.这充分说明了螺旋光子筛能够分辨出更近距离的位相跳变,具有比螺旋波带片更高的空间分辨能力.

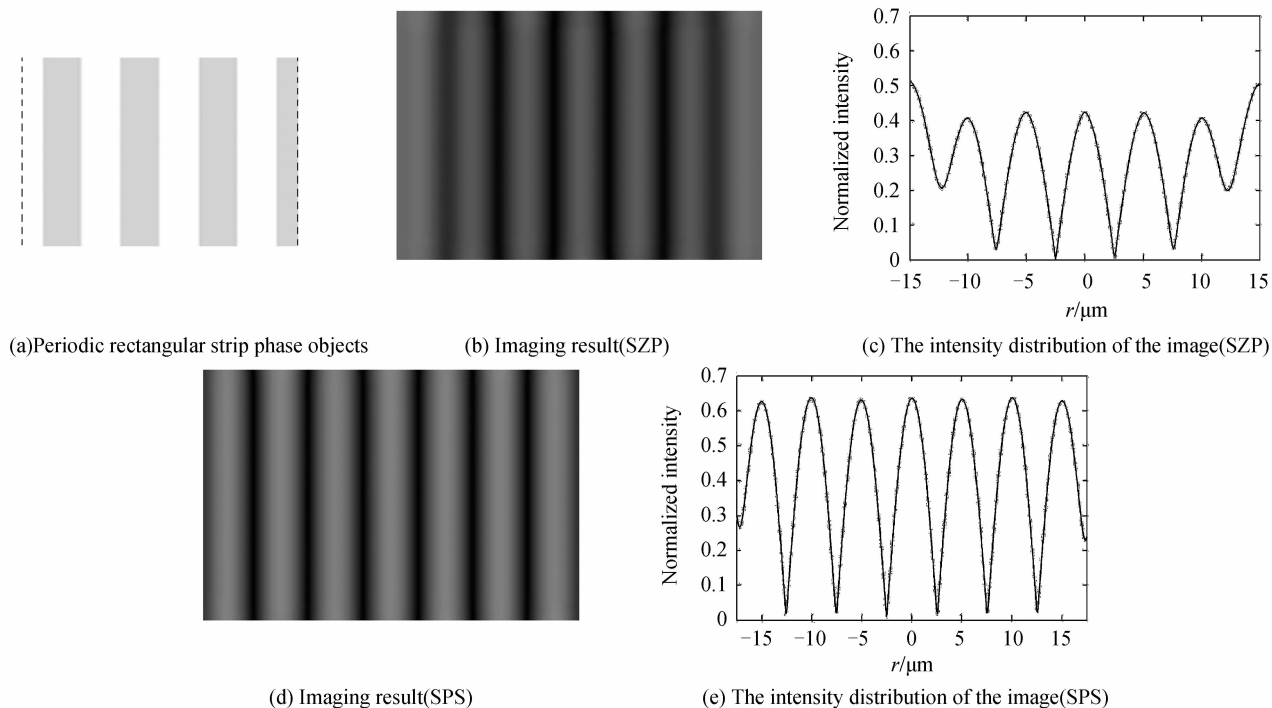


图6 成像图像及其光强分布(SZP和SPS)

Fig. 6 Imaging and its intensity distribution(SZP and SPS)

对三种不同形状位相物体的模拟结果表明:用螺旋光子筛对位相物体成像,空间分辨率和成像对比度更好.因此,相同特征尺寸的螺旋光子筛替代螺旋波带片用于相衬成像将更具优势.

度.研究表明:螺旋光子筛实现相衬成像不仅可以获得较高空间分辨率而且也能获得较高的成像对比度.利用携带了径向希尔伯特变换功能和聚焦成像功能的单个元件对位相物体成像,实验光路十分简单且调节也较为方便.

3 结论

设计了一种以类-贝塞尔函数作为振幅调制窗函数下的螺旋光子筛.通过控制螺旋光子筛微孔分布的大小和数量,实现了对光子筛中不同环带通光面积的灵活调制,抑制了旁瓣和高阶衍射,提高了成像的衬比

参考文献

[1] JAKUBEK J, GRANJA C, DAMMER J, *et al.* Phase contrast enhanced high resolution X-ray imaging and tomography of soft tissue [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, **57**(1): 69-72.
 [2] WEITKAMP T, DIAZ A. X-ray phase imaging with a grating interferometer [J]. *Optical Society of America*, 2005, **12**

- (16): 6296-6304.
- [3] XINGCHEN P, PVEETIL S, LIU C, *et al.* High-contrast imaging for weakly diffracting specimens in coherent diffraction imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(2): (021103-1)-(021103-3).
- [4] POGANY A, GAO D. Contrast and resolution in imaging with a microfocus x-ray source [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(7): 2774-2782.
- [5] DAVIS J A, MCNAMARA D E, COTTRELL D M, *et al.* Imaging processing with the radial Hilber transformation : theory and experiment[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(2): 99-101.
- [6] SHIBIAO W, JING B, SIWEI Z, *et al.* Image edge-enhancement in optical microscopy with a phase mismatched spiral phase plate[J]. *Chinese Optics Letter*, 2011, **9**(3): (031001-1)-(031001-4).
- [7] SAKDINAWAT A, LIU Y. Soft-x-ray microscopy using spiral zone plates[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(18): 2635-2637.
- [8] BOKOR N, IKETAKI Y. Laguerre-Gaussian radial Hilber transform for edge-enhancement Fourier transform x-ray microscopy[J]. *Optics Letters*, 2009, **17**(7): 5533-5539.
- [9] YI Tao, CAO Lei-feng, YANG Guo-hong, *et al.* Edge enhancement imaging using spiral zone plate[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(9): 2075-2078.
易涛, 曹磊峰, 杨国洪, 等. 利用螺旋型波带片进行边沿增强成像[J]. *强激光与离子束*, 2010, **22**(9): 2075-2078.
- [10] YI Tao, CAO Lei-feng, LIU Shen-ye, *et al.* Study on the spatial resolution of spiral zone plate imaging[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(7): 1089-1092.
易涛, 曹磊峰, 刘慎业, 等. 螺旋型波带片成像的空间分辨率研究[J]. *光电子 • 激光*, 2010, **21**(7): 1089-1092.
- [11] CHANGQING X, XIAOLI Z, LINA S, *et al.* Spiral photon sieves apodized by digital prolate spheroidal window for the generation of hard-x-ray vortex[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(11): 1765-1767.
- [12] CAO Q, JAHNS J. Comprehensive focusing analysis of various Fresnel zone plates[J]. *Optics Letters*, 2004, **21**(4): 561-571.
- [13] YI Tao, YANG Guo-hong, WEI Min-xi, *et al.* Study on focusing properties of spiral zone plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): (0705004-1)-(0705004-5).
易涛, 杨国洪, 韦敏习, 等. 螺旋型波带片聚焦成像特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(7): (0705004-1)-(0705004-5).
- [14] CHEN J, YUAN X C, ZHAO X, *et al.* Generalized approach to modifying optical vortices with suppressed sidelobes using Bessel-like functions [J]. *Optics Letter*, 2009, **34**(21): 3289-3291.
- [15] CHEN J, ZHAO X, FANG Z, *et al.* Explicit relations and optimal parameters for sidelobe suppression in optical vortices with a modified Bessel function[J]. *Optics Letters*, 2010, **27**(4): 935-940.
- [16] KIPP L, SKIBOWSKI M, JOHNSON R L, *et al.* Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves [J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 184-188.
- [17] CHEN Jun, CUI Xiang-xia, XIAO Jing, *et al.* Properties of image edge enhancement using radial Hilbert transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 483-486.
陈君, 崔祥霞, 肖静, 等. 基于径向希尔伯特变换的图像边沿增强成像特性研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 483-486.
- [18] SHARMA K M, SINGH K R, JOSEPH J, *et al.* Fourier spectrum analysis of spiral zone plates [J]. *Optics Communications*, 2013, **30**(4): 43-48.