

一种产生边缘增强图像的螺旋波带片编码成像技术

范全平¹, 王少义¹, 魏来¹, 杨祖华¹, 张强强¹, 陈勇¹, 巫殷忠¹, 曹磊峰^{1,2,3}¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;²中国工程物理研究院等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900;³上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240

摘要 为了获得高能 X 射线、 α 射线、 γ 射线和中子等粒子源的边缘增强图像, 提出一种以螺旋波带片编码成像 (ZPCI) 技术。螺旋波带片同时具备径向希尔伯特变换和菲涅耳波带片聚焦的特点, 因此, 该技术相当于在采用菲涅耳 ZPCI 技术获得解码图像的基础上再进行一次径向希尔伯特变换。对该技术产生的边缘增强图像进行模拟计算和实验诊断, 结果显示具有可行性。该技术在天文学、核医学和激光惯性约束聚变研究等领域具有广泛的应用前景。

关键词 图像处理; 编码成像技术; 螺旋波带片; 边缘增强成像; 径向希尔伯特变换

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031003

Spiral Zone Plate Coded Imaging Technique With Edge Enhancement

Fan Quanping¹, Wang Shaoyi¹, Wei Lai¹, Yang Zuhua¹, Zhang Qiangqiang¹,
Chen Yong¹, Wu Yinzhong¹, Cao Leifeng^{1,2,3}¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang,
Sichuan 621900, China;²Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Mianyang,
Sichuan 621900, China;³IFSA Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract To obtain edge-enhancement images of particle sources, such as high-energy X-rays, α -rays, γ -rays, and neutrons, we propose a spiral zone plate coded imaging (ZPCI) technique, which takes the spiral zone plate as the coded aperture. The spiral zone plate has the properties of both radial Hilbert transformation and Fresnel zone plate focusing, which is equivalent to a further radial Hilbert transformation of the decoded image obtained by Fresnel ZPCI technique. The feasibility of this proposed technique is verified via both numerical simulations and demonstrative experiments to generate edge-enhancement images. This technique can be widely used in many fields such as astronomy, nuclear medicine, and laser inertial confinement fusion.

Key words image processing; coded imaging technique; spiral zone plate; edge-enhancement imaging; radial Hilbert transforms

OCIS codes 100.3010; 340.7430; 350.4990

1 引言

编码成像技术主要应用于衍射效应可忽略的短波长辐射或粒子源(如高能 X 射线、 α 射线、 γ 射线和中子等)成像,在天文学^[1]、核医学^[2-4]和激光惯性

约束聚变(ICF)研究^[5-7]等领域具有广泛的应用。编码成像技术主要包括两个步骤^[8]:1) 基于编码孔的点扩展函数建立粒子源(或短波长辐射源)发射的辐射或粒子的空间分布与编码图像之间的数学对应关系;2) 通过适当的解码算法对编码图进行反演,

收稿日期: 2017-08-15; 收到修改稿日期: 2017-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(11375160)、国家重大仪器设备开发专项(2012YQ130125)

作者简介: 范全平(1988—),男,博士,助理研究员,主要从事激光与物质相互作用及诊断方面的研究。

E-mail: fanquanping@sina.cn

* 通信联系人。E-mail: leifeng.cao@caep.cn

获得粒子源的辐射或粒子图像。

根据编码孔的不同,相继发展出多种编码成像技术。常用的编码成像技术主要包括环孔编码显微成像(RAM)技术^[9-11]、半影编码显微成像(PAM)技术^[12-14]、均匀冗余阵列编码成像(URA)技术^[15]和波带片编码成像(ZPCI)技术^[16-18]等,其中 ZPCI、RAM 和 PAM 技术应用最为广泛。在这三种技术中,ZPCI 技术最好^[19],但 RAM 和 PAM 技术的编码孔更易制作,因此在后来的 ICF 研究中反而应用更多。然而,无论是以上哪种编码成像技术,最终解码获得的都是与粒子源具有相同强度分布特征的解码图像,不存在边缘增强特征。

边缘增强成像可以提高目标物体边界区域的成像质量,突出物体的细节信息,提高图像的清晰度,目前已在数值图像处理 and 折射(或衍射)成像中得到一些应用。在粒子源成像领域,采用编码成像技术直接解码获得具有边缘增强特征的粒子源图像的研究迄今鲜见报道。在天文学、核医学和 ICF 研究等领域,边缘增强成像对于估计粒子源的尺寸及边界轮廓、提高成像质量、突出细节信息等具有重要意义。对于衍射(或折射)成像,螺旋波带片结合了径向希尔伯特变换和菲涅耳波带片聚焦的特点,已有相关报道将其用作成像器件获得边缘增强图像^[20-21]。然而对于衍射效应可忽略的粒子成像,螺旋波带片的聚焦特性消失,无法直接作为成像器件使用。

在菲涅耳 ZPCI 技术中,点扩散函数是其波带片结构的投影,在解码中利用该波带片投影的聚焦特性对图像进行复原。螺旋波带片不仅具有菲涅耳波带片的聚焦特性,还包含了径向希尔伯特变换的特征。若将螺旋波带片应用于 ZPCI,在解码过程中就相当于在原来的基础上对复原图像再进行一次径向希尔伯特变换。因此,从理论上讲,采用螺旋 ZPCI 技术获得的解码图像应该具有边缘增强特征。本文从数值模拟和演示实验两个方面验证采用该技术获得粒子源边缘增强图像的可行性,为粒子源成像提供新的技术途径。

2 基本原理

2.1 理论基础

假设粒子源的强度分布为 $f(x, y)$,二值化螺旋波带片的透过率函数为 $g(x, y) = g(r, \theta) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left[\cos \left(\frac{\pi}{r_1^2} r^2 - p \cdot \theta \right) \right]$,其中 r, θ 表示在极坐标

下波带片透过率的坐标位置, r_1 为螺旋波带片的第一环半径, p 为螺旋波带片的拓扑荷数, $\operatorname{sgn}[\cdot]$ 为阶跃函数,则粒子源上各点发射出的粒子束经过二值化螺旋波带片编码后在记录介质上形成的编码图可表示为二者的卷积,即

$$h(x', y') = \frac{s+l}{s} \cdot f \left(\frac{s}{s+l} x', \frac{s}{s+l} y' \right) * g \left(\frac{s}{s+l} x', \frac{s}{s+l} y' \right), \quad (1)$$

式中 x', y' 表示在接收屏上的横纵坐标, $*$ 表示二者的卷积, s 表示粒子源到二值化螺旋波带片的距离, l 表示螺旋波带片到记录介质的距离。

对于编码图,采用光学仿真方法进行解码,最终获得粒子源的边缘增强图像。采用波长为 λ 的单色平行光垂直照射编码图,则在焦点处获得与粒子源对应的边缘增强图像。该光学仿真方法主要用到傅里叶变换形式下的菲涅耳衍射积分:

$$U(x, y) = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp \left[j \frac{k}{2z} (x^2 + y^2) \right] \times \mathcal{F} \left\{ U(x_0, y_0) \exp \left[j \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 j 为虚数单位, $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示对目标函数的傅里叶变换, x_0, y_0 为编码图平面的横纵坐标, x, y 为焦点平面的横纵坐标, z 为焦点平面到编码图平面的距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为入射光的波长。实际计算中取 $z = F = r_1^2/\lambda$,且 $U(x_0, y_0) = h(x', y')$ 。需要说明的是,在 ZPCI 技术中,解码过程是通过利用波带片投影编码的聚焦特性实现的,因此这里需要用到物理光学的衍射传播理论来进行解码。

2.2 数值模拟

一般而言,一套螺旋 ZPCI 装置主要由粒子源、螺旋波带片和记录介质等构成。其中粒子源是编码成像装置的待测目标物体;螺旋波带片是编码孔,用于对待测目标物体进行编码;记录介质用于记录编码图的强度分布信息,对于不同的粒子源需选取不同的材料或设备。

图 1 给出了螺旋 ZPCI 技术的工作原理示意图。主要包括:1) 粒子源上各点发射的粒子束经过螺旋波带片结构编码在记录介质上形成编码图,如图 1(a) 所示;2) 通过光学仿真方法对编码图进行解码处理,假设单色平行光垂直照射编码图,在焦点处获得粒子源的边缘增强图像,如图 1(b) 所示。

在数值模拟计算中,假设粒子源满足如图 2(a) 所示的强度分布(白色为发射粒子束的部分,黑色为不发射粒子束的部分),粒子源的形状为等腰三角

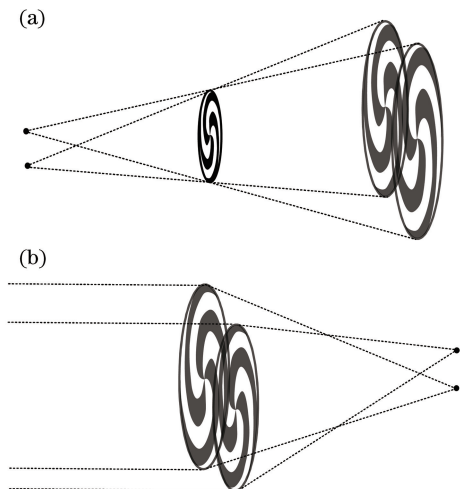


图1 螺旋 ZPCI 工作原理。(a)编码过程;(b)解码过程

Fig. 1 Schematic of spiral ZPCI. (a) Encoding process; (b) decoding process

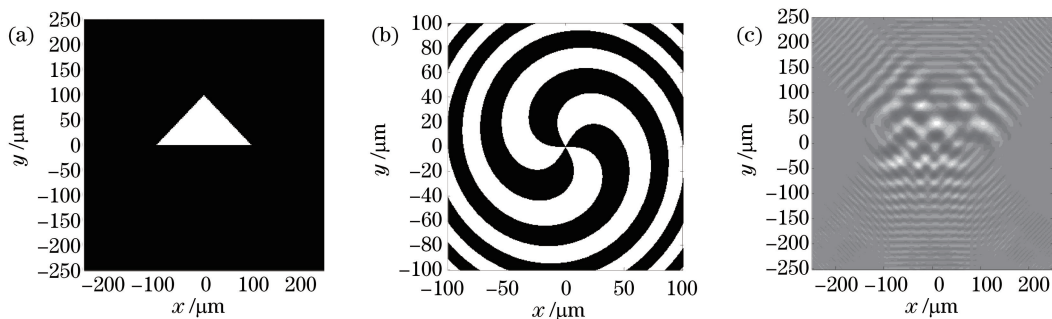


图2 (a)粒子源强度分布;(b)螺旋波带片结构($p=3$);(c)经编码形成的编码图

Fig. 2 (a) Intensity distribution of particle source; (b) structure of spiral zone plate with $p=3$; (c) coded image after encoding

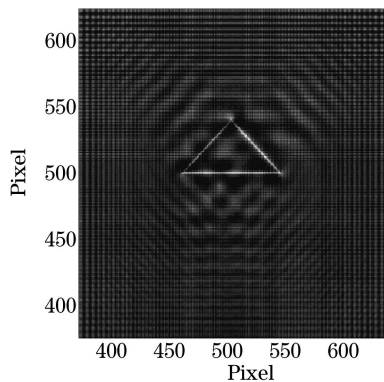


图3 经光学仿真方法解码获得的粒子源边缘增强图像

Fig. 3 Edge-enhancement image of particle source obtained by optical simulation method

在相同参数条件下,计算采用菲涅耳 ZPCI 技术对该粒子源成像所获得的解码图像(图 4)。对比图 4 与图 3 可知,采用菲涅耳 ZPCI 技术只能获得粒子源的强度分布图像,无法获得粒子源边缘增强图像。

形,底边长 $200 \mu\text{m}$,高 $100 \mu\text{m}$ 。采用拓扑荷数 $p=3$ 的二值化螺旋波带片做为编码孔对粒子源进行编码,螺旋波带片结构如图 2(b)所示(白色为粒子束透射部分,黑色为粒子束阻挡部分)。二值化螺旋波带片的第一环半径 r_1 取 $50 \mu\text{m}$,环数取为 100。根据(1)式可得经过二值化螺旋波带片后在记录介质上获得的编码图强度分布,如图 2(c)所示。

根据(2)式,采用光学仿真方法对该编码图进行解码处理,获得粒子源的边缘增强图像。光学仿真计算中,假设波长为 5 nm 的单色平行光垂直照射到透过率函数如图 2(c)所示的编码图上,采用傅里叶变换形式的菲涅耳衍射积分方法计算在焦点 ($z=f=500 \text{ mm}$) 处的衍射光强分布,即可获得与粒子源对应的边缘增强图像(图 3)。通过螺旋 ZPCI 技术该粒子源的边界信息被有效地提取出来。

根据(2)式,采用光学仿真方法对该编码图进行解码处理,获得粒子源的边缘增强图像。光学仿真计算中,假设波长为 5 nm 的单色平行光垂直照射到透过率函数如图 2(c)所示的编码图上,采用傅里叶变换形式的菲涅耳衍射积分方法计算在焦点 ($z=f=500 \text{ mm}$) 处的衍射光强分布,即可获得与粒子源对应的边缘增强图像(图 3)。通过螺旋 ZPCI 技术该粒子源的边界信息被有效地提取出来。

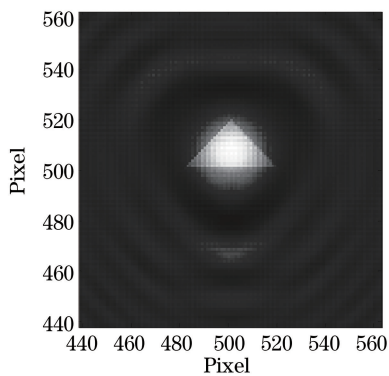


图4 采用菲涅耳 ZPCI 技术获得的粒子源解码图像

Fig. 4 Decoded image of particle source obtained by Fresnel ZPCI method

3 演示实验

以波长为 633 nm 的可见光焦斑为粒子源进行螺旋 ZPCI 演示实验。需要说明的是,ZPCI 技术主要用于高能 X 射线、 α 射线、 γ 射线和中子等粒子成

像,这里以可见光焦斑为粒子源只是为了从原理上验证螺旋 ZPCI 技术的可行性。实验排布如图 5 所示,主要对红光激光器的非均匀强度分布焦斑进行边缘增强成像。其中:红光激光器用于产生波长为 663 nm 的非均匀平行光;聚焦透镜 1 用于对平行光聚焦,从而产生强度非均匀分布的激光焦斑;螺旋波带片是该演示实验的编码孔,用于对激光焦斑进行编码,从而形成编码图;由于产生的编码图尺寸较大,而可见光 CCD 的探测面积很小,无法将其全部测量,因此在编码孔后面添加聚焦透镜 2,用于将产

生编码图的尺寸缩小到可见光 CCD 可全部探测的范围;可见光 CCD 是编码图的记录介质,用于探测和储存经螺旋波带片编码后形成的编码图。需要说明的是,图 5 的实验排布与图 1 展示的工作原理略有不同,实际上在 ZPCI 实验中不会加入聚焦透镜 1 和聚焦透镜 2。这里添加聚焦透镜 1 只是为了将激光器产生的平行光聚焦形成激光焦斑,也就是该演示实验的待成像物体;添加聚焦透镜 2 只是为了缩小所产生编码图的几何尺寸,使其能够在可见光 CCD 接收面上被完全探测到。

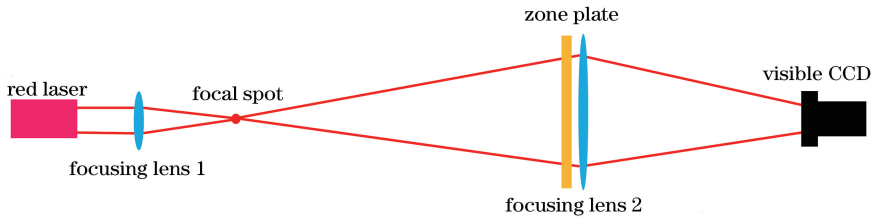


图 5 可见光演示实验布局

Fig. 5 Layout of visible light demonstrative experiment

图 6(a)给出了经螺旋波带片编码后通过可见光 CCD 探测到的激光焦斑编码图,图 6(b)给出了采用光学仿真方法解码获得的激光焦斑边缘增强图

像。可以看出,采用螺旋 ZPCI 技术可获得激光焦斑清晰的边界信息,更有利于估计和分析待测粒子源的尺寸和细节信息。

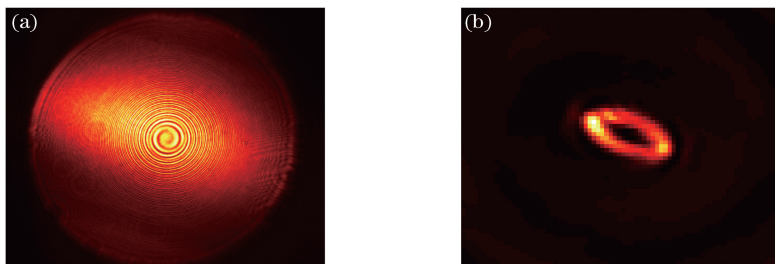


图 6 (a)经螺旋波带片编码形成的编码图;(b)采用光学仿真方法解码获得的解码图像

Fig. 6 (a) Coded image after spiral zone plate encoding; (b) decoded image obtained by optical simulation method

图 7 给出了采用传统的菲涅耳 ZPCI 技术获得的激光焦斑图像。其中,图 7(a)是激光焦斑经过菲涅耳波带片作为编码孔进行编码而获得的编码图,图 7(b)是采用光学仿真方法进行解码而获得的激

光焦斑图像。对比图 7 与图 6 可知,传统的菲涅耳 ZPCI 技术只能获得待测粒子源的强度分布图像,而本文技术可获得待测粒子源的边缘增强图像,更能突出其边界信息。

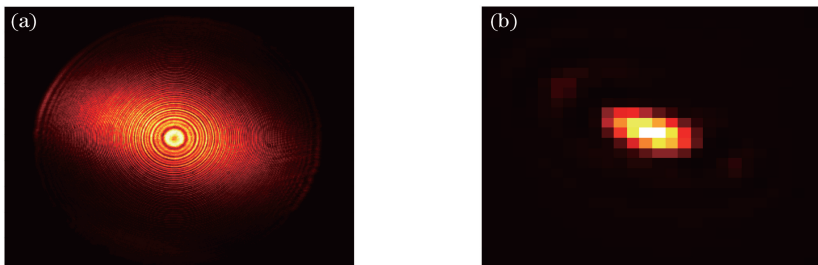


图 7 (a)经菲涅耳波带片编码形成的编码图;(b)采用光学仿真方法解码获得的解码图像

Fig. 7 (a) Coded image after Fresnel zone plate encoding; (b) decoded image obtained by optical simulation method

4 结 论

针对粒子源成像提出一种产生边缘增强图像的螺旋 ZPCI 技术,并从理论模拟和演示实验两个方面验证该技术产生具有边缘增强特征的粒子源图像的可行性。本文技术获得的解码图像更能突出边界信息,更有利于估计和分析待测粒子源的尺寸和细节信息。总而言之,该技术是 ZPCI 成像技术的扩展,在天文学、核医学和 ICF 研究等领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Chakrabarti S K, Palit S, Debnath D, *et al.* Fresnel zone plate telescopes for X-ray imaging I: experiments with a quasi-parallel beam [J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 24(1/2/3): 109-126.
- [2] Dicke R H. Scatter-hole cameras for x-rays and gamma-rays[J]. *Astrophysical Journal*, 1968, 153: 101-106.
- [3] Barrett H H, Horrigan F A. Fresnel zone plate imaging of gamma rays; theory[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(11): 2686-2702.
- [4] Barrett H H, DeMeester G D. Quantum noise in Fresnel zone plate imaging [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(5): 1100-1109.
- [5] Ceglio N M, Coleman L W. Spatially resolved α emission from laser fusion targets [J]. *Physical Review Letters*, 1977, 39(1): 20-24.
- [6] Ceglio N M, Larsen J T. Spatially resolved suprathermal x-ray emission from laser-fusion targets [J]. *Physical Review Letters*, 1980, 44(9): 579-582.
- [7] Ceglio N M, Attwood D T, George E V. Zone-plate coded imaging of laser-produced plasmas[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(4): 1566-1569.
- [8] Solanki G S. Enhanced Fresnel zone plate coded microscopy of large-size objects [J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science and Vision*, 2004, 21(4): 517-522.
- [9] Ress D, Bell P M, Bradley D K. A time-resolved x-ray ring coded-aperture microscope for inertial confinement fusion applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(6): 1404-1406.
- [10] Cao L F, Zheng Z J, Ding Y K, *et al.* Investigation of X-ray ring aperture coded imaging technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 764-768.
- 曹磊峰, 郑志坚, 丁永坤, 等. X 光环孔编码成像技术研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(8): 764-768.
- [11] Ress D, DaSilva L B, London R A, *et al.* Novel x-ray imaging methods at the Nova laser facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 579-584.
- [12] Zhao Z Q, Ding Y K, Liu D J, *et al.* Numerical simulation of neutron penumbral imaging [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1203-1207.
- 赵宗清, 丁永坤, 刘东剑, 等. 中子半影成像的数值模拟 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(7): 1203-1207.
- [13] Pollaine S M, Bradley D K, Landen O L, *et al.* National Ignition Facility scale hohlraum asymmetry studies by thin shell radiography [J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2357-2364.
- [14] Yu B, Ying Y J, Xu H B. Two nonlinear reconstruction methods of neutron penumbral imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5351-5357.
- 余波, 应阳君, 许海波. 中子半影成像的两种非线性重建方法研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5351-5357.
- [15] Accorsi R. Design of a near-field coded aperture cameras for high-resolution medical and industrial gamma-ray imaging [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2001: 19-117.
- [16] Zheng Z J, Cao L F, Zhang B H, *et al.* Primary investigation of X-ray tomography with Gabor zone plate encode holography technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 759-763.
- 郑志坚, 曹磊峰, 张保汉, 等. X 光 Gabor 波带片编码成像技术实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(8): 759-763.
- [17] Barrett H H, Wilson D T, DeMeester G D, *et al.* Fresnel zone plate imaging in radiology and nuclear medicine [J]. *Optical Engineering*, 1973, 12(1): 120108.
- [18] Wang X Y, Fan Q P, Wei L, *et al.* High-resolution reconstruction of Fresnel zone plate coded imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5): 054203.
- 王心怡, 范全平, 魏来, 等. Fresnel 波带片编码成像的高分辨重建 [J]. *物理学报*, 2017, 66(5): 054203.
- [19] Wen S H, Ding Y K. Laser inertial confinement fusion diagnostics [M]. Beijing: National Defend

Industry Press, 2012: 270-286.

温树槐, 丁永坤. 激光惯性约束聚变诊断学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 270-286.

- [20] Yi T, Dong J J, Zhu X L, *et al.* Study on the imaging performance of spiral zone plate [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 753-757.

易涛, 董建军, 朱效立, 等. 螺旋型波带片成像特性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 753-757.

- [21] Sharma M K, Singh R K, Joseph J, *et al.* Fourier spectrum analysis of spiral zone plates [J]. Optics Communications, 2013, 304(1): 43-48.