

# 基于多焦点光子筛阵列的同轴相移全息技术

李优<sup>1,2</sup>, 张军勇<sup>1\*</sup>, 张艳丽<sup>1\*\*</sup>, 周申蕾<sup>1</sup>, 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 设计出不同相移步长的多焦点光子筛阵列,利用相移数字全息术对 USAF1951 分辨率板进行成像,在光学波段验证了光子筛阵列的相移功能。实验结果表明,多焦点光子筛阵列在不同相移步长下均可消除零级像和共轭像,系统分辨率均与理论预期结果一致。作为一种振幅型衍射透镜,多焦点光子筛阵列在 X 射线全息术和生物细胞显微等领域有着广阔的应用前景。

**关键词** 全息; 数字全息; 相移; 衍射透镜; X 射线成像

**中图分类号** TN26; O438

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0309003

## In-Line Phase-Shifting Holography Technology Based on Multi-Focal Photon-Sieve Array

Li You<sup>1,2</sup>, Zhang Junyong<sup>1\*</sup>, Zhang Yanli<sup>1\*\*</sup>, Zhou Shenlei<sup>1</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Multi-focal photon-sieve arrays with different phase shift steps are designed. The imaging of the USAF1951 resolution board is obtained by phase-shifting digital holography, and the phase-shifting function of the photon-sieve array is verified in optical waveband. The experimental results shows that multi-focal photon-sieve arrays can eliminate zero-order image and conjugate image under different phase shift steps, and the system resolution is consistent with theoretical expected result. As a kind of amplitude diffractive lens, the multi-focal photon-sieve array has a wide application prospect in the fields of X-ray holography and biological cell microscopy.

**Key words** holography; digital holography; phase shift; diffractive lenses; X-ray imaging

**OCIS codes** 090.1995; 050.5080; 050.1965; 110.7440

## 1 引 言

1948 年, Gabor<sup>[1]</sup> 提出同轴全息术, 采用球面波照射透明物体并由干板记录透射光和物体散射光之间的干涉图样, 再用球面波照射干板, 曝光后可以在底片上得到对应的放大物像。该技术可同时记录物光波的振幅信息与相位信息, 在三维成像领域有着较好的应用前景。然而, Gabor 提出的全息方法存在零级像与共轭像严重干扰成像质量且无法去除的情况, 这成为当时全息术发展的重大难题。1962 年, Leith 等<sup>[2]</sup> 提出了离轴全息术, 通过频谱分离的

方法得到可分离的再现像, 进一步促进了全息术的发展。1967 年出现的数字全息术<sup>[3]</sup> 通过将光电转换元件组成的探测器阵列代替传统的全息干板记录全息图样<sup>[4-5]</sup>, 并结合数字图像处理的方法实现像的再现, 该方法操作简单, 因此极大地促进了全息术的发展。相移数字全息技术<sup>[6-7]</sup> 的出现使同轴全息术得到了更进一步的发展, 该技术克服了同轴全息术产生干扰像的固有缺点, 通过连续拍摄多幅相移图样, 利用计算机进行相移图样处理就可消除零级像与共轭像, 进而得到清晰的放大物像。

在相移全息过程中产生相移的装置称为相移

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-11-15; 录用日期: 2018-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61775222)、中国科学院青年创新促进会(2017292)

\* E-mail: zhangjy829@siom.ac.cn; \*\* E-mail: zhangyl@siom.ac.cn

器,其精度及稳定性直接影响再现像的成像质量与重建精度。传统的相移器在常见的光学波段已经有比较成熟的应用,如压电陶瓷<sup>[8]</sup>、光学波片<sup>[9-14]</sup>、液晶材料<sup>[15]</sup>和空间光调制器<sup>[16-18]</sup>;但对于 X 射线波段,由于材料本身固有的强吸收特性,这类器件在短波段的实际应用中受到极大限制。菲涅耳波带片属于振幅型衍射透镜,可在 X 射线波段使用<sup>[19-20]</sup>,这使其成为了少有可能应用于短波段的衍射器件。21 世纪初,德国物理学家 Kipp 等<sup>[21]</sup>首先设计出光子筛这种新型衍射元件,并利用随机分布的筛孔代替菲涅耳波带片的透光环带,获得了比波带片更高的横向分辨率,且能够有效地抑制轴向高阶衍射和横向旁瓣效应。近年来,科研工作者对光子筛进行了大量的应用研究,在细胞成像、显微成像等领域取得了许多进展。

传统的光子筛只存在单个衍射极限焦点,但基于希腊梯子编码产生的光子筛<sup>[22]</sup>可产生多个衍射极限焦点,利用这一特性,此类光子筛有望在 X 射线的光束分束、波前整形、生物细胞的阵列显微成像等方面具有广泛应用。光子筛本质上同属于菲涅耳波带片,如果遮挡住半波长整数倍的波带片,那么对于奇数波带片与偶数波带片,其焦点上就会出现步长为  $\pi$  的相移。基于这一特点,本文设计了可产生多个不同相位焦点的光子筛阵列,再利用  $4F$  系统输出可携带不同相位的平面参考波,并通过旋转阵列来实现相移全息光路中相移器的功能。首先,设计了相移步长为  $\pi/2$  的多焦点光子筛阵列,并以 USAF1951 分辨率板为实验对象实现了标准的四步相移全息;在此基础上进一步设计了可用于三步和两步相移全息成像的光子筛阵列,其相移步长分别为  $2\pi/3$  和  $\pi/5$ ,再次通过分辨率板实验验证了光子筛阵列的相移功能,实验结果与理论分析结果一致。

由于波带片是振幅型器件,该技术方案同样适用于生物细胞的 X 射线相移全息成像。

## 2 多焦点光子筛阵列

传统菲涅耳波带片的通光环带可被分为等光程的两部分,形成两个新的环形区域,并保留奇环带或偶环带,以此形成一类子单元菲涅耳波带片。奇、偶型菲涅耳波带片可被分割出四类子单元,相应的环带被小孔随机填充,并形成四类对应的光子筛。图 1 所示为四类光子筛环形排列而成的透镜阵列,以顺时针标记为第 1、第 2、第 3 和第 4 子单元,其焦点相位依次为  $0, \pi/2, \pi$  和  $3\pi/2$ 。

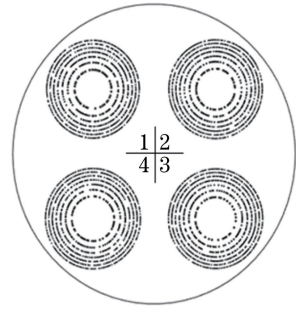


图 1 多焦光子筛阵列示意图

Fig. 1 Schematic of multi-focal photon-sieve array

多焦点光子筛阵列的子单元直径均为  $12.02 \text{ mm}$ ,产生的 3 个焦平面依次位于  $63.88, 106.62, 160 \text{ mm}$  处,每个焦平面上对应 4 个光斑。图 2 所示为第 3 层(对应焦距  $f_3 = 160 \text{ mm}$ )的衍射场分布情况。从图 2 可计算得到:4 个光斑光强相等,且直径均约为  $22 \mu\text{m}$ 。此外,将多焦点光子筛阵列顺时针转动,可发现后 3 个光子筛相对于前面邻近的光子筛光斑相位依次增加  $\pi/2$ ,这一特性为相移干涉操作提供了条件。其他两层衍射场的最大光强相等,且相位值如表 1 所示。与第 3 层光斑表现

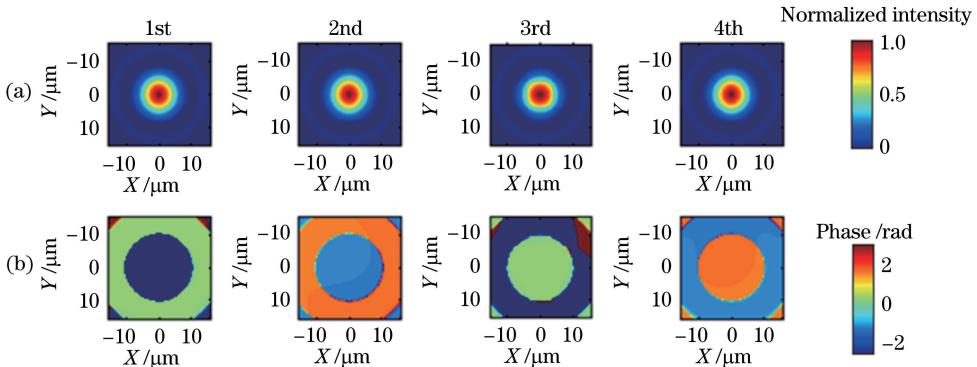


图 2  $f_3 = 160 \text{ mm}$  焦平面上的衍射场。(a)归一化强度分布;(b)相位分布

Fig. 2 Diffraction fields at focal plane  $f_3 = 160 \text{ mm}$ . (a) Normalized intensity distribution; (b) phase distribution

不同的是,第 1 层的后 3 个光斑的相位相对于第 1 个光斑依次增加了  $5\pi/4$ 、 $\pi/2$  和  $7\pi/4$ ,而第 2 层的后 3 个光斑相位相对于第 1 个光斑依次增加  $3\pi/4$ 、 $3\pi/2$  和  $\pi/4$ ,这些相移光斑同样适用于相移干涉操作。

表 1 多焦点光子筛阵列的相移量

Table 1 Phase shifts of multi-focal photon-sieve array

Focal plane	Phase shift		
	$f_1=63.88\text{ mm}$	$f_2=106.62\text{ mm}$	$f_3=160\text{ mm}$
1st	$\equiv 0$	$\equiv 0$	$\equiv 0$
2nd	$5\pi/4$	$3\pi/4$	$\pi/2$
3rd	$\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi$
4th	$7\pi/4$	$\pi/4$	$3\pi/2$

### 3 实验内容与讨论

为了验证多焦点光子筛阵列的相移特性,设计并制作了可见光波段应用的光子筛阵列,并将其应用于相移全息实验。实验中将多焦点光子筛阵列置于可旋转的光具架内,利用第 3 层中的 4 个焦点进行相移操作,实验光路为 Mach-Zehnder 双光束干涉光路。图 3 为利用多焦点光子筛阵列作为相移器的相移全息光路图。首先,将 He-Ne 激光器(波长  $\lambda$  为 632.8 nm,输出功率为 2 mW)发出的光经分

束器 BS1 分束,将物光光路经显微物镜 MO2、针孔 PH2 和焦距为 150 mm 的透镜 L2 组成的扩束系统准直为平面波后照射被测对象——USAF1951 分辨率板,从而获得物光;另一路激光经同样参数的扩束系统后通过多焦点光子筛阵列聚焦在距离 160 mm 处的针孔 PH3,再由焦距为 150 mm 的透镜 L3 准直为平面波,并作为平面参考光,此时将多焦点光子筛阵列的工作区域作为第 1 子单元(图 1);最后,物光与参考光经分束器 BS2 合束,到达电子耦合器件(CCD)(Prosilica GT3300, Allied Vision Technologies 公司,德国,像素为  $3296\text{ pixel}\times 2742\text{ pixel}$ ,像元尺寸为  $5.5\text{ }\mu\text{m}\times 5.5\text{ }\mu\text{m}$ ) 的接收面,记录下第一幅全息图,之后按相位增加方向将光子筛阵列顺时针旋转  $90^\circ$ ,使多焦点光子筛阵列的工作区域作为第 2 子单元,此时参考光的相位处于第 2 个值,记录下第 2 幅全息图。继续两次顺时针转动光子筛阵列  $90^\circ$ ,使多焦点光子筛阵列分别工作在第 3 和第 4 子单元,经过 2 次曝光后可获得第 3 和第 4 幅全息图,最后遮挡物光以单独记录参考光强度图。使用计算机对采集到的全部数据进行处理。

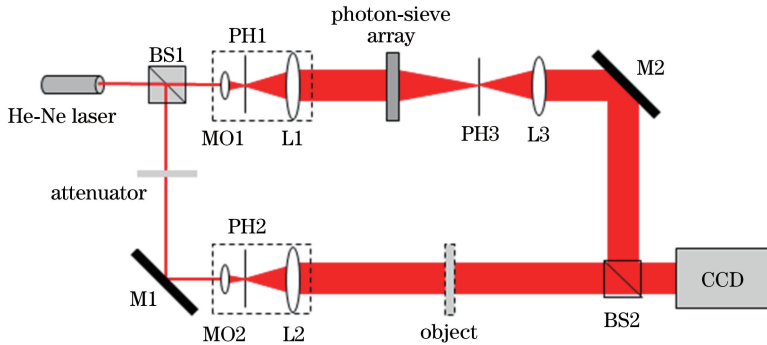


图 3 相移数字全息测量光路示意图

Fig. 3 Schematic of measuring light path of phase-shifting digital holography

四步相移的相移步长均为  $\pi/2$ ,4 幅全息图的光强分别记为  $I_1(\theta=0)$ 、 $I_2(\theta=\pi/2)$ 、 $I_3(\theta=\pi)$  和  $I_4(\theta=3\pi/2)$ ,参考光的强度记为  $I_r$ ,通过相移算法<sup>[6]</sup>可计算出接收面上的物光复振幅  $O(x, y) \cdot \exp[i\varphi(x, y)]$ :

$$O(x, y)\exp[i\varphi(x, y)] = \frac{1}{4\sqrt{I_r}}[(I_1 - I_3) + i(I_2 - I_4)], \quad (1)$$

式中: $O(x, y)$ 为接收面的振幅分布; $\exp[i\varphi(x, y)]$ 为相位分布。

图 4 是实验中 CCD 记录的 4 幅全息图,图 4(a)~(d)对应的平面参考光的相位依次为  $0$ 、 $\pi/2$ 、 $\pi$  和

$3\pi/2$ 。在数字全息图重建过程中,使用 Tamura 系数<sup>[23]</sup>进行自动对焦就可以准确获取全息再现像的记录距离。而自动对焦曲线如图 5(a)所示,其对应的记录距离为 193.75 mm。此时全息系统对应的理论分辨率<sup>[24]</sup>约为  $9.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

分辨率板的实验结果如图 5(b)所示,可以看到,重建像的分辨率约为 5 组 4 级,并且边界轮廓清晰可见,信号区域纹理均匀。若剔除实验过程中的外界环境振动、激光器稳定性及 CCD 噪声的影响,实验结果与理论预期值相吻合,从而直接验证了多焦光子筛阵列的相移功能。

为进一步说明多焦点光子筛阵列的相移功能,

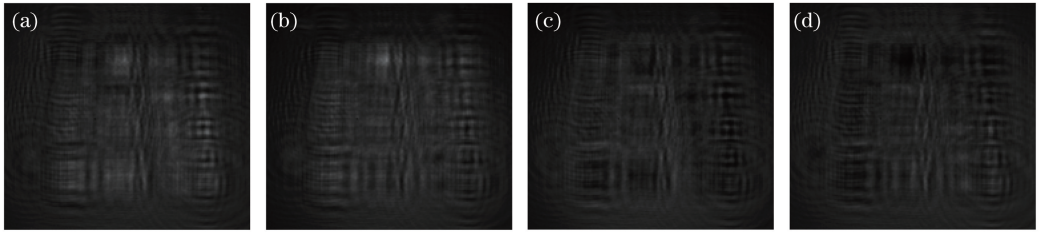


图 4 不同平面参考光相位的四步相移数字全息图。(a)  $\theta=0$ ; (b)  $\theta=\pi/2$ ; (c)  $\theta=\pi$ ; (d)  $\theta=3\pi/2$

Fig. 4 Four-step phase-shifting digital holograms with different phases of plane reference light.

(a)  $\theta=0$ ; (b)  $\theta=\pi/2$ ; (c)  $\theta=\pi$ ; (d)  $\theta=3\pi/2$

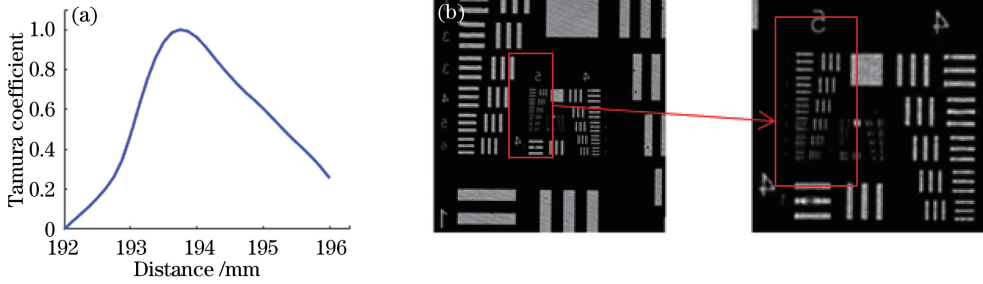


图 5 分辨率板实验结果。(a)自动对焦曲线;(b)再现像

Fig. 5 Experimental result of resolution board. (a) Auto-focusing curve; (b) reconstructed image

分别设计了可用于三步相移的光子筛阵列及可用于两步相移的光子筛阵列,所有子透镜的实验焦距均为 160 mm。图 6(a)~(c)依次给出了相移为  $0, 2\pi/3$  和  $4\pi/3$  的全息图,图 6(d)为三步相移全息再现像的自动对焦曲线,其再现像的记录距离为 193.85 mm,重建像的分辨率为 5 组 4 级,如图 6(e)所示。图 7(a)、(b)依次给出了相移为 0 和  $\pi/5$  的全息图,图 7(c)为两步相移全息再现像的自动对焦曲线,其再现像的记录距离为 194.30 mm,重建像如图 7(d)所示,其分辨率仍为 5 组 4 级。从同轴相移全

息的自动对焦曲线来看,再现像的记录距离偏差仅为数百微米,这可能是由实验过程中更换夹持器引起的。从再现像质来看,在正确消除了零级像与共轭像后,其重建像的分辨率均为 5 组 4 级,再现像的记录距离的微小偏差对再现像的分辨能力并无实质影响,符合理论预期值。因此,不同相移步长的同轴全息实验均说明此类器件可实现预期的相位改变,并再次验证了多焦点光子筛用于相移全息技术的可行性;由于多焦点光子筛是振幅型器件,这也为未来 X 射线相移全息提供了一个新的技术途径。

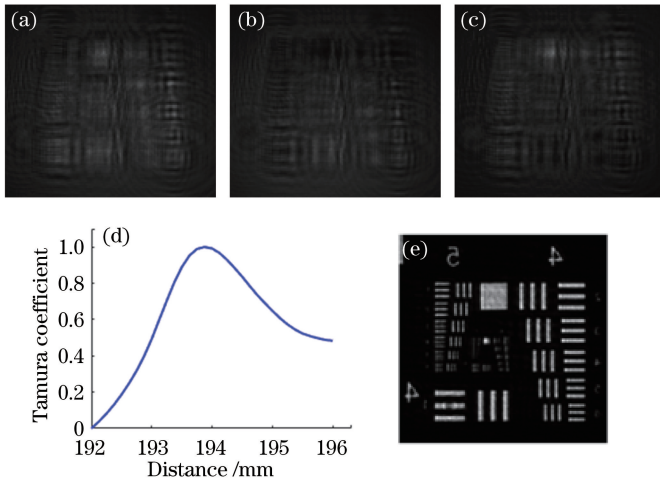


图 6 三步相移实验结果。(a)  $\theta=0$  的全息图;(b)  $\theta=2\pi/3$  的全息图;(c)  $\theta=4\pi/3$  的全息图;(d)自动对焦曲线;(e)再现像

Fig. 6 Experimental results of three-step phase-shifting. (a) Hologram of  $\theta=0$ ; (b) hologram of  $\theta=2\pi/3$ ;

(c) hologram of  $\theta=4\pi/3$ ; (d) auto-focusing curve; (e) reconstructed image

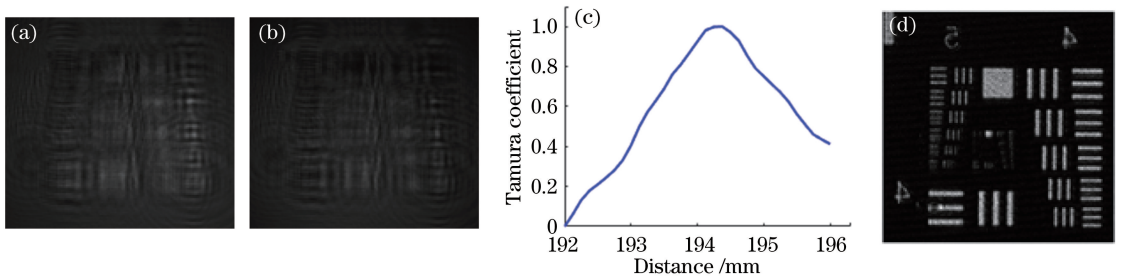


图 7 两步相移实验结果。(a)  $\theta=0$  的全息图;(b)  $\theta=\pi/5$  的全息图;(c) 自动对焦曲线;(d) 再现像

Fig. 7 Experimental results of two-step phase-shifting. (a) Hologram of  $\theta=0$ ; (b) hologram of  $\theta=\pi/5$ ; (c) auto-focusing curve; (d) reconstructed image

## 4 结 论

提出了利用多焦点光子筛阵列实现相移全息的技术方案,成功消除了零级像和共轭像。针对可见光波段的相移数字全息技术,设计并加工了多焦点光子筛阵列相移器,以此来代替常规的光学波片或液晶器件,通过旋转光子筛阵列可输出具有不同相位值的平面参考光波,实现相移全息成像。相比于以往实验中的平移装置,本实验采用的旋转装置可提高器件的稳定性,更有利于进行相移操作。具有多层不同相位焦点的光子筛,为相移全息在三维空间的操作和选择提供了更大的自由度,极大地方便了光路的改进和优化,可满足全息技术在不同实际状况下的需求。作为振幅型器件,多焦点光子筛阵列有望在极紫外光至 X 射线波段的全息成像和生物细胞分子显微成像等领域得到进一步应用。

### 参 考 文 献

[1] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.  
 [2] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1962, 52(10): 1123-1130.  
 [3] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Applied Physics Letters, 1967, 11(3): 77-79.  
 [4] Schnars U, Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction[J]. Applied Optics, 1994, 33(2): 179-181.  
 [5] Schnars U, Falldorf C, Watson J, et al. Digital holography and wavefront sensing-principles, techniques and applications [M]. Berlin: Springer Verlag, 2015: 39-66.  
 [6] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography[J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1268-

1270.  
 [7] Yamaguchi I, Kato J I, Ohta S, et al. Image formation in phase-shifting digital holography and applications to microscopy [J]. Applied Optics, 2001, 40(34): 6177-6186.  
 [8] Bruning J H, Herriott D R, Gallagher J E, et al. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. Applied Optics, 1974, 13(11): 2693-2703.  
 [9] Zhu Z Q, Li Y, Feng S T, et al. Theoretical and experimental study on digital phase-shifting holography based on circular polarized light interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0409004.  
 朱竹青, 李杨, 冯少彤, 等. 基于圆偏振光干涉的相移数字全息术理论与实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0409004.  
 [10] Kato J I, Yamaguchi I, Matsumura T. Multicolor digital holography with an achromatic phase shifter [J]. Optics Letters, 2002, 27(16): 1403-1405.  
 [11] Kiire T, Nakadate S, Shibuya M. Simultaneous formation of four fringes by using a polarization quadrature phase-shifting interferometer with wave plates and a diffraction grating[J]. Applied Optics, 2008, 47(26): 4787-4792.  
 [12] Wang Z P, Li Q B, Tan Q, et al. Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow axis of quarter-wave plate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 523-528.  
 王政平, 李庆波, 谭巧, 等. 测量  $\lambda/4$  波片实际相移量并判定快慢轴的方法 [J]. 中国激光, 2005, 32(4): 523-528.  
 [13] Lang H T, Pan Y, Pan W Q, et al. Single-exposure cepstrum phase-shifting in-line digital holography based on dual-CCD[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(s2): s209010.  
 郎海涛, 潘云, 潘卫清, 等. 基于双 CCD 的单曝光倒频谱相移同轴数字全息技术 [J]. 中国激光, 2012, 39(s2): s209010.

- [14] Zhang J, Ye Y T, Xie Y, *et al.* Synchronous multi-channel phase-shifting digital holographic technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1009002.  
张静, 叶玉堂, 谢煜, 等. 同步多路相移数字全息技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1009002.
- [15] Barnes T H, Eiju T, Matusda K, *et al.* Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(22): 4845-4852.
- [16] Griffin D W. Phase-shifting shearing interferometer [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(3): 140-141.
- [17] Konforti N, Marom E, Wu S T. Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(3): 251-253.
- [18] Rong Z Y, Guo C S, Zhang L, *et al.* Computer-generated holographic phase shifter with liquid crystal display[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(6): 693-697.  
荣振宇, 国承山, 张莉, 等. 液晶光调制计算全息相移器[J]. *中国激光*, 2004, 31(6): 693-697.
- [19] 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.
- [20] Suzuki Y, Takeuchi A, Takano H, *et al.* Performance test of fresnel zone plate with 50 nm outermost zone width in hard X-ray region [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(4A): 1994-1998.
- [21] 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.
- [22] Zhang J Y. Three-dimensional array diffraction-limited foci from Greek ladders to generalized Fibonacci sequences [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30308-30317.
- [23] 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.
- [24] Hao Y, Asundi A. Resolution analysis of a digital holography system [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(2): 183-193.