# 阵列抽样衍射成像中记录孔径对再现像的影响

### 张新廷 国承山

(山东师范大学物理与电子科学学院,山东 济南 250014)

摘要 从标量衍射理论出发,对基于阵列抽样的相干衍射成像中物波抽样针孔大小和图像传感器有效记录孔径对 重现物波的影响进行了理论分析,给出了描述抽样孔径和记录孔径对波前再现像影响的数学公式。理论分析表 明,在抽样波前的重现过程中记录孔径的有限大小会导致相邻抽样孔径间发生串扰;这种串扰效应是产生波前重 现误差及由此引起的成像噪声的主要来源。通过数值分析串扰次函数极大幅度随记录孔径的变化情况,发现这种 串扰效应随着记录孔径的增大振荡减弱。基于该理论分析,给出了最佳记录孔径的定义及其计算公式。并通过一 个实验测量实例进一步验证了当记录孔径大小等于最佳记录孔径时得到的衍射像的信噪比最大。

关键词 衍射;相干成像;衍射成像;抽样

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0311001

## Influence of Recording Aperture on Image Quality of Coherent Diffractive Imaging Based on Sampling Array

Zhang Xinting Guo Chengshan

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China)

**Abstract** The influence of the sampling pinholes and recording aperture on imaging quality in coherent diffractive imaging based on sampling array is analyzed using scalar diffraction theory. A mathematical formula for describing the influence is derived. The theoretical analysis shows that the limited size of the recording aperture can result in a crosstalk between adjacent sampling pinholes. This crosstalk effect is the main source of the wavefront reconstruction error and the imaging noise. Through digital analysis of the changes of the sub maximum of the crosstalk function under different recording aperture conditions, it is found that the sub maximum does not descend monotonously when the size of the recording aperture increases, while it oscillatorily decreases with enlargement of the recording aperture. An optimal size of the recording aperture is defined and an analytical formula is given. Further experimental results show that the background noise will descend to its minimum when the radius of the recording aperture is just equal to the optimal size.

Key words diffraction; coherent imaging; diffractive imaging; sampling OCIS codes 090.1970; 110.1650; 110.3010; 100.3190

1 引

言

相干衍射成像(CDI)是一种基于物波衍射光场 的强度分布实现波前检测和成像的新技术,已经在 显微成像、三维轮廓测量、自适应光学、X射线或电 子衍射成像等领域得到实际应用<sup>[1-11]</sup>。已有的相 干衍射成像方法中,除了传统的共轴或离轴光学全 息技术<sup>[1-5]</sup>,另一较常用的方法是相位反演波前成 像技术<sup>[6-10]</sup>,该技术主要采用迭代算法从物波的衍 射强度图样中重现出物波的波前信息(包括振幅和 相位信息)。但是迭代算法通常存在计算量大和迭 代收敛性问题。

近年来人们又提出了一种基于波前调制或抽样 的波前检测和衍射成像方法<sup>[12-21]</sup>。这类方法的基 本思路是:1)在被测样品和图像传感器记录平面之

**基金项目:**国家自然科学基金(11074152,10934003)

**收稿日期**: 2013-09-06; 收到修改稿日期: 2013-11-04

作者简介:张新廷(1971—),男,博士研究生,主要从事相干衍射成像方面的研究。E-mail: jnzhangxt@163.com

**导师简介:**国承山(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: guochsh@sdnu.edu.cn (通信联系人)

间引入某种具有特定透射率分布的波前调制或抽样 元件;2)记录物波经波前调制或抽样后的衍射光场 的强度分布图样;3)基于所用波前调制元件的衍射 特性建立相应的波前或相位恢复算法,在计算机中 实现数字波前重现和数字衍射成像。如 Zhang 等<sup>[12-14]</sup>研究了基于纯相位板调制的相干衍射成像 方法;Nakajim<sup>[15-16]</sup>研究了基于阵列针孔滤波和整 函数特性的波前相位恢复和成像方法等。最近提出 的基于卷积可解阵列抽样的波前重现方法<sup>[20-21]</sup>也 属于这类非迭代方法。该方法已经在相干 X 射线 衍射成像,涡旋轨道角动量和三维坐标测量等方面 得到成功应用。

本文在上述工作的基础上,进一步研究了基于阵 列针孔调制的相干衍射成像中抽样针孔大小和记录孔 径大小对重现波前的影响。通过理论分析首次给出了 描述抽样孔径和记录孔径尺寸对波前测量影响的数学 公式给出了最佳记录孔径的定义和计算公式。

#### 2 理论分析

下面以夫琅禾费型阵列抽样衍射成像系统为 例。图 1(a)所示是该成像方法的原理示意图,图中 Fr和  $Fr^{-1}$ 分别代表菲涅耳衍射及其逆衍射, FT 和 FT<sup>-1</sup>分别代表夫琅禾费衍射及其逆衍射。在相干 照明条件下(如用单色平面波照明被测物体),让物 波的衍射光场先通过一个特殊设计的多针孔阵列抽 样板(CSSA),如图1(b)所示;被抽样波前再经过 一个夫琅禾费衍射到达图像传感器(如 CCD)的记 录平面,由 CCD 记录该夫琅禾费衍射光场的强度 分布图样并输入计算机或图像处理器:对所记录的 衍射光场强度图样做傅里叶变换得到该强度图样的 空间频谱函数,再通过一个与 CSSA 对应的阵列抽 样空间滤波器对该频谱函数进行抽样滤波就可以得 到待测抽样波前的振幅和相位分布「如图 1(c)所 示了。被抽样波前的夫琅禾费衍射图样也可通过在 图 1(a) 所示的 CSSA 和 CCD 之间插入一个傅里叶 变换透镜并将 CCD 记录平面置于傅里叶变换透镜 的后焦面上来获得。由于从该夫琅禾费衍射光场强 度图样的傅里叶变换中求解被测波前在数学上等价 于一个解卷积过程,因此将以上所用多针孔抽样板 命名为卷积可解阵列抽样板并将上述波前探测方法 称为卷积可解阵列抽样法。

为便于数学分析,假设 CSSA 上的抽样针孔均 为边长为 a 的正方形孔,则 CSSA 的透射率函数可 表示为



- 图 1 (a) 阵列抽样波前检测和成像原理示意图;(b)多针 孔阵列抽样板实例;(c)波前重现过程中用于提取 被测波前的空间滤波器
- Fig. 1 (a) Schematic of wavefront measuring and imaging based on the sampling array; (b) example of the multi-pinhole sampling array; (c) corresponding spatial filter used for retrieving the sampled complex amplitude

$$P(\mathbf{r}) = \sum_{m=0}^{M} \operatorname{rect}\left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_{m}}{a}\right) = \sum_{m=0}^{M} \operatorname{rect}\left(\frac{x - x_{m}}{a}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{y - y_{m}}{a}\right), \quad (1)$$

式中**r**为抽样针孔板所在平面上的位置矢量, $r_m$ ( $x_m$ , $y_m$ )为第 m 个抽样针孔的中心位置矢量,rect [( $r-r_m$ )/a]表示第 m 个抽样针孔的孔径函数,M为抽样针孔数。物波通过阵列抽样后在记录平面上 得到的夫琅禾费衍射光场的强度分布可表示为

$$I_{F}(\boldsymbol{\rho}) = I_{0} \left| \mathscr{F} \left[ s(\boldsymbol{r}) \sum_{m=0}^{M} \operatorname{rect} \left( \frac{\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_{m}}{a} \right) \right] \right|^{2} \approx I_{0} \left| \sum_{m=0}^{M} \bar{s}(\boldsymbol{r}_{m}) \operatorname{sinc}(a\boldsymbol{\rho}) \exp\left[-j2\pi(\boldsymbol{r}_{m} \cdot \boldsymbol{\rho})\right] \right|^{2}, (2)$$

式中  $s(\mathbf{r})$  是入射到抽样阵列上的待测物波复振幅 函数, $\bar{s}(\mathbf{r}_m)$  为第m个抽样针孔处的物波波前的复振 幅, $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r}/(\lambda f)$  为记录平面的空间频率坐标(f 为傅 里叶变换透镜的焦距, $\lambda$  为波长), $I_0$  为与照明光强 度相关的常数。将(2)式所示的强度图样输入计算 机并作傅里叶变换,得到

$$g(\mathbf{r}) = \mathscr{F}^{-1} [I_F(\mathbf{\rho})] = I_0 \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} \bar{s}_m \bar{s}_n^* \times \mathscr{F}^{-1} \{\operatorname{sinc}^2(a\mathbf{\rho}) \exp[-j2\pi(\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n) \cdot \mathbf{\rho}]\} = I_0 \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} \bar{s}_n \bar{s}_n^* \Lambda\left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_m + \mathbf{r}_n}{a}\right), \quad (3)$$

式中 $\Lambda(\mathbf{r}/a)$ 表示宽度为2a,高度为1的三角形函数, $\overline{s}_m$ 和 $\overline{s}_n^*$ 分别为对应第m个抽样针孔处物波的复振幅和第n个抽样针孔处物波复振幅的复共轭。

(3)式是在只考虑抽样针孔大小而不考虑图像 传感器有效记录孔径情况下得到的结果。由(3)式 可见,在这种情况下只要阵列抽样针孔中相邻针孔 的间隔大于针孔直径的两倍,就可以通过一个与抽 样阵列相同的空间滤波屏将抽样针孔处的物波的复 振幅 *s<sub>m</sub>* 提取出来<sup>[20]</sup>。此时,从理论上波前检测的 误差主要来自各抽样针孔上物波的不均匀性,即实 际得到的是抽样针孔处物波复振幅的均值。

实验中,实际记录和处理的强度图样还要受到 所用图像传感器的像素数和计算机运算速度的限 制。假设图像传感器的有效记录面积为一宽度为 D 的正方形区域,则(3)式在考虑到有限记录孔径的 情况下应写为

$$g(\mathbf{r}) = \mathscr{F}^{-1}\left\{\operatorname{rect}\left(\frac{\rho}{\rho_{0}}\right)I_{F}(\boldsymbol{\rho})\right\} = I_{0}\operatorname{sinc}(\rho_{0}\mathbf{r}) \otimes \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} \bar{s}_{m}\bar{s}_{n}^{*}\Lambda\left(\frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}_{m}+\mathbf{r}_{n}}{a}\right) = I_{0}\sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} \bar{s}_{m}\bar{s}_{n}^{*}\operatorname{sinc}(\rho_{0}\mathbf{r}) \otimes \Lambda\left(\frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}_{m}+\mathbf{r}_{n}}{a}\right) = I_{0}\sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} \bar{s}_{m}\bar{s}_{n}^{*}h\left(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{m}+\mathbf{r}_{n}\right),$$
(4)

式中 $\rho_{\alpha} = D/(\lambda f)$ 为图像传感器记录孔径在空间频 率域中的表示。由(4)式可见,当考虑到记录孔径 的限制效应时,(4)式中的各求和项不再是空间受限 的三角形函数,而是变成了一个三角函数与一个 sinc 函数的卷积。显然,理论上该卷积函数是一个 振荡衰减的无限扩展函数。此时,利用空间滤波的 方法将难以避免各求和项之间的相互影响。由此引 起的串扰效应导致的测量误差可称为串扰误差。 图 2给出了(4)式中的串扰函数  $h(\mathbf{r}) = \operatorname{sinc}(\rho, \mathbf{r}) \otimes$  $\Lambda(\mathbf{r}/a)$ 在记录孔径 D 取不同大小时的空间振荡曲 线(计算该曲线所用参数为:抽样针孔直径 a= 20 μm;物波波长 λ=0.6328 μm;傅里叶变换透镜焦 距 f=180 mm)。计算结果表明,串扰函数的次极 大的振荡幅度总体上是随着记录孔径的增大而减 小。当记录孔径足够大时,各次极大趋于零,串扰 函数趋于三角形函数。但在实际实验中,通过采用 足够大的记录孔径来消除上述串扰效应常常要受到 图像传感器像素数和计算机运算速度的限制。

为了定量分析波前重现中的串扰效应与抽样孔 径和记录孔径大小的关系,进一步计算了不同抽样 孔径情况下的串扰函数的次极大值随记录孔径大小 的变化曲线。图 3 给出了抽样孔径尺寸分别为 10、 20、30  $\mu$ m 时串扰函数次极大振荡幅度随记录孔径 变化情况的计算实例(物波波长  $\lambda$ =0.6328  $\mu$ m,傅 里叶变换透镜焦距 f=180 mm)。由图 3 曲线可以 看到,表征串扰程度的串扰函数次极大并不是随着 记录孔径的增大而线性减弱。例如,抽样孔径为 20  $\mu$ m情况下,记录孔径大小 D=11 mm 时的次级 振荡就明显比 D=17 mm 时的次级振荡要弱得多。 这表明在有限记录孔径条件下,通过适当选取记录



图 2 对应不同记录孔径的串扰函数振荡曲线 Fig. 2 Oscillation curves of crosstalk function under different diameters of the recording aperture



- 图 3 抽样孔径 a 分别为 10、20、30 μm 时的串扰函数 次极振荡幅度随记录孔径 D 的变化曲线
- Fig. 3 Curves of the normalized submaximum of the crosstalk function versus the recording aperture when the size of the sampling pinholes is taken as 10, 20, 30  $\mu$ m, respectively

孔径的尺寸也可以大大降低串扰误差。为此,把随 记录孔径增大次级振荡幅度出现极小值时对应的记 录孔径定义为最佳记录孔径,用 D<sub>opt</sub>表示。该最佳 记录孔径大小 D<sub>opt</sub>与物波波长λ、傅里叶变换透镜焦 距 f、抽样针孔大小 a 等系统参数的关系可以通过 分别计算对应不同参数的串扰函数次极大振荡幅度 随记录孔径的变化曲线来确定(图 3 给出的就是对 应不同抽样针孔参数的该变化曲线的一个计算实 例)。数值分析表明,在抽样针孔为正方形孔的情况 下,最佳记录孔径 D<sub>opt</sub>可表示为

 $D_{opt} = 2K\lambda f/a, K = 1,2,3,....$  (5) 由(5)式可见,K = 1时该最佳记录孔径刚好对应抽 样针孔夫琅禾费衍射轮廓的零级主光斑的大小。显 然,记录孔径尺寸等于(5)式定义的最佳记录孔径 时,记录孔径边缘刚好位于抽样针孔衍射轮廓的零 点附近。因此产生的截断效应最小,从而使串扰误 差在该条件下出现极小值。

以上分析是在 CSSA 上的抽样针孔为正方形的 情况下得出的。该分析结果可直接应用于采用空间 光调制器实现阵列抽样屏的情况,因为多数空间光 调制器的像素通光孔径都可以近似看作正方形或长 方形孔。对于抽样针孔为圆形孔(但图像传感器的 记录孔径仍设定为正方形)的情况,例如通过激光加 工制备的阵列针孔抽样屏,可以将(1)式中 rect(r/ a)函数换成圆孔径函数[如 circ(r/0.5a),这里 a 表 示针孔直径]。此时的串扰函数可写成

$$h(\mathbf{r}) = \operatorname{sinc}(\rho_0 \mathbf{r}) \otimes B(r/a), \qquad (6)$$

式中

$$B(r/a) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos^{-1} \left( \frac{r}{a} \right) - \frac{r}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2} \right], & r \leq a \\ 0, & r > a \end{cases}$$
(7)

类似的数值分析表明,圆形抽样针孔情况下的最佳 记录孔径仍然可近似写成(5)式的形式。

#### 3 实验测量和讨论

为了实验验证上述最佳记录孔径的分析结果, 实际测量了不同记录孔径条件下所得到的相干衍射 成像的信噪比。实验原理图如图 1(a)所示。实验 中,光源采用波长为 0.6328 μm 的 He-Ne 激光,抽 样多针孔板采用图 1(b)所示的六方型阵列抽样板, 其中抽样针孔大小为 72 μm,相邻测量针孔的间距 约为 400 μm。实验光路采用夫琅禾费型记录光路, He-Ne 激光经扩束准直后照明待测物体。抽样针 孔板与图像传感器之间放置了一个焦距为 180 mm 的傅里叶变换透镜(图像传感器的记录平面刚好位 于透镜的后焦面上)。

图 4 给出了上述实验条件下物波经阵列抽样后 在记录平面上的夫琅禾费衍射强度图样的一个实验 记录实例。图 4 所示的衍射图样是由一个像素数为 1024 pixel×1024 pixel、像素大小为 6.2 μm 图像传 感器记录下来的,其记录孔径的物理尺寸约为 6.3 mm×6.3 mm。为了定量计算不同记录孔径下 相干衍射成像的信噪比,可在实验记录的衍射图样 上再迭加一个大小可调的限制孔径作为系统的有效 记录孔径。图 5 是利用图 4 所示的衍射强度图样在 计算机中通过计算机程序得到的被测物体的数字衍 射重现像,其中图 5(a)~(c)分别对应有效记录孔





径大小为 2.1、3.2、4.5 mm 时的再现结果。为了能 看清再现像中较弱的背景噪声情况,图 5 对再现像 的灰度值做了对数化处理。由图 5 可见,并不是记 录孔径越大噪声就越小。

为了定量测量由于记录孔径对衍射图样的截断 效应带来的再现像的背景噪声变化情况,将再现像 的信噪比(SNR)定义为 $R_{SN} = \log(I_s/I_n)$ ,其中 $I_s$ 为 再现像的平均强度, $I_n$ 是背景噪声的平均强度值。 针对实验中采用的透射型物体, $I_n$ 对应的就是透光 部分的再现像的平均强度;实验中,改变记录孔径大 小而保持其他条件不变,测量该 SNR,得到了图 6



图 5 被测物体的数字衍射重现像。其中(a)、(b)和(c)分别对应记录孔径为 2.1、3.2、4.5 mm 时的再现结果 Fig. 5 Reconstructed image of the measured object, where (a), (b) and (c) are the images when the recording apertures

are set to 2.1, 3.2, 4.5 mm, respectively

所示的实验曲线,其中横坐标为记录孔径大小,纵 坐标为对应再现像的 SNR。

由图 6 可见,当记录孔径较小时,再现像的信噪 比也相对比较小;随着记录孔径尺寸的增大,信噪比 迅速增大;当记录孔径增加到约 3.2 mm 时,信噪比 达到最大。之后,随着记录孔径的增加,信噪比则随 之振荡减小。将上述实验所用的波长(0.6328  $\mu$ m)、 抽样 针 孔 尺 寸(72  $\mu$ m)、傅 里 叶 变 换 透 镜 焦 距 (180 mm)等参数代入(5)式,可算得 K=1 时最佳记 录孔径的理论值为  $D_{opt}$ =3.164 mm。由此可见,(5) 式定义的最佳记录孔径与实验测得的具有最大信噪 比的记录孔径是一致的。





4 结 论

对基于 CSSA 的相干衍射成像中物波抽样针孔 大小和图像传感器的有效记录孔径对成像质量的影 响做了理论分析和实验研究。理论分析表明,记录 孔径的有限大小会导致相邻抽样孔径间发生串扰效 应。这种串扰效应是产生波前恢复误差和成像噪声 的一个重要来源。理论分析和实验测量均表明,并 不是图像传感器的记录孔径越大,衍射重现像的信 噪比就越高,而是存在一个获得最大信噪比的最佳 记录孔径。该最佳记录孔径大小由光源波长、抽样 屏到记录平面的距离或傅里叶变换透镜焦距、抽样 针孔的尺寸等参数有关,其关系式如(5)式所示。由 (5)式可以看出,该最佳记录孔径在数值上刚好与 一个抽样针孔在记录平面上的夫琅禾费衍射主光斑 的大小相对应。该研究结果为设计和优化基于 CSSA的相干衍射成像系统提供了理论依据。

#### 参考文献

- 1 S Marchesini, S Boutet, A E Sakdinawat, *et al.*. Massively parallel X-ray holography [J]. Nat Photonics, 2008, 2(9): 560-563.
- 2 L-M Stadler, C Gutt, T Autenrieth, et al.. Hard X ray holographic diffraction imaging [J]. Phys Rev Lett, 2008, 100 (24): 245503.
- 3 W F Schlotter, R Rick, K Chen, *et al.*. Multiple reference Fourier transform holography with soft X-rays [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(16); 163112.
- 4 R L Sandberg, D A Raymondson, C La-o-vorakiat, *et al.*. Tabletop soft-X-ray Fourier transform holography with 50 nm resolution [J]. Opt Lett, 2009, 34(11): 1618-1620.
- 5 Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Wang Zhihua, et al.. Reconstruction of digital inline hologram with compressed sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1109001. 吴迎春, 吴学成, 王智化, 等. 压缩感知重建数字同轴全息[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1109001.
- 6 J R Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Appl Opt, 1982, 21(15): 2758-2769.
- 7 J Miao, T Ishikawa, B Johnson, *et al.*. High resolution 3D X-ray diffraction microscopy [J]. Phys Rev Lett, 2002, 89 (8): 088303.
- 8 J M Zuo, I Vartanyants, M Gao, et al.. Atomic resolution imaging of a Carbon nanotube from diffraction intensities [J]. Science, 2003, 300(5624): 1419-1421.
- 9 Wu Yunyun, Li Min, Li Xinyang. Effect of near-field light intensity on reconstructed effect by linear phase retrieval algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0101002. 武云云,李 敏,李新阳. 近场强度分布对线性相位反演算法复 原效果的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0101002.
- 10 Tan Xingxing, Liu Haigang, Guo Zhi, *et al.*. Simulation of coherent diffraction imaging based on scanning transmission X-ray microscopy of Shanghai synchrotron radiation facility [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0418001.

谭兴兴,刘海岗,郭 智,等.基于上海光源扫描透射 X 射线显

微术的相干衍射成像模拟[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0418001.

- 11 Ren Yuqi, Zhou Guangzhao, Wang Yudan, *et al.*. Study of multi-component sample using quantitative X-ray phase contrast imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0834002. 任玉琦,周光照,王玉丹,等. 复合组分材料的 X 射线定量相衬 成像研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0834002.
- 12 F Zhang, G Pedrini, W Osten. Phase retrieval of arbitrary complex-valued fields through aperture-plane modulation [J]. Phys Rev A, 2007, 75(4): 043805.
- 13 I Johnson, K Jefimovs, O Bunk, et al.. Coherent diffractive imaging using phase front modifications [J]. Phys Rev Lett, 2008, 100(15): 155503.
- 14 Bo Chen, Fucai Zhang, Felisa Berenguer, et al.. Coherent X-ray diffraction imaging of paint pigment particles by scanning a phase plate modulator [J]. New Journal of Physics, 2011, 13(10): 103022.
- 15 N Nakajima. Noniterative phase retrieval from a single diffraction intensity pattern by use of an aperture array [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(22): 223901.

- 16 N. Nakajima. Coherent diffractive imaging beyond the Fresnel approximation using a deterministic phase-retrieval method with an aperture-array filter [J]. Appl Opt, 2013, 52(7): C1-C10.
- 17 C S Guo, L L Lu, G X Wei, *et al.*. Diffractive imaging based on a multipinhole plate [J]. Opt Lett, 2009, 34(12): 1813-1815.
- 18 A V Martin, L J Allen. Direct retrieval of a complex wave from its diffraction pattern [J]. Opt Commun, 2008, 281(20): 5114-5121.
- 19 A J Morgan, A V Martin, A J D'Alfonso, *et al.*. Direct exitwave reconstruction from a single defocused image [J]. Ultramicroscopy, 2011, 111(9-10), 1455-1460.
- 20 C S Guo, K Liang, X T Zhang, et al.. Real-time coherent diffractive imaging with convolution-solvable sampling array [J]. Opt Lett, 2010, 35(6): 850-852.
- 21 Jiang Hao, Zhang Xinting, Guo Chengshan. Lensless coherent diffractive imaging with a Fresnel diffraction pattern [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 244203.
  - 江 浩,张新廷,国承山.基于菲涅耳衍射的无透镜相干衍射成 像[J].物理学报,2012,61(24):244203.

栏目编辑:李志兰