

动量加速方法提高层叠衍射成像的质量

陶旭磊^{1,2,3} 许子健^{1,2} 王春鹏^{1,2} 邵仁忠^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 X射线层叠衍射成像技术(Ptychography)所采用的图像重建迭代算法是一种传统的梯度下降算法。该算法从一组猜测函数开始,实验中探测到的正确信息被不断代入循环迭代中来修正猜测函数,最终达到收敛。这种算法存在一个问题就是容易出现收敛停滞的现象,也就是所谓的陷入局域最小值。造成这种现象出现的原因是局域最小值附近的梯度极小导致梯度下降的幅度极小。为了解决这一问题,最近“动量”这一概念被引入Ptychography算法中,产生了动量加速层叠衍射迭代引擎(momentum Ptychographical Iterative Engine, mPIE)算法。加入“动量”相当于给迭代重建过程赋予了“惯性”性质,当前梯度下降的幅度不仅由当前梯度决定,还会受到之前变化的幅度影响。所以即便是在梯度极小的局域最小值附近,目标函数仍然可以跳出停滞,继续变小。为了验证“动量”的引入对图像重建的提升效果,详细比较了动量mPIE算法和传统的拓展层叠衍射迭代引擎(extending Ptychographical Iterative Engine, ePIE)算法对同一套扫描相干衍射成像实验数据的重建图像质量。重建结果表明:相对于传统重建算法,动量加速算法可以获得更好的图像重建质量。

关键词 X射线扫描相干衍射成像,动量,X射线显微,相位恢复迭代算法

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.050102

Improving the reconstructed image quality in ptychography with momentum acceleration

TAO Xulei^{1,2,3} XU Zijian^{1,2} WANG Chunpeng^{1,2} TAI Renzhong^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

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

Abstract [Background] The image retrieval algorithm of ptychography is a kind of conventional gradient descent algorithm. This algorithm begins with a set of guessing functions, and the signals collected in the experiment are continuously input into the iteration process to achieve final convergence. However the reconstructed process often falls into stagnation because of the low gradient around the local minima and the extent of the gradient descent is too small. [Purpose] This study aims to solve the convergence stagnation problem of conventional gradient descent algorithm by using momentum ptychographical iterative engine (mPIE). [Methods] The concept of "momentum" was introduced into the ptychography algorithm to update conventional algorithm, called the momentum ptychographical

国家自然科学基金(No.11575283、No.11875316、No.U1832146)、国家重点研发计划(No.2017YFA0403400)资助

第一作者:陶旭磊,男,1992年出生,2014年毕业于武汉大学,现为博士研究生,研究领域为X射线显微成像、相干衍射成像

通信作者:许子健, E-mail: xuzijian@sinap.ac.cn; 邵仁忠, E-mail: tairenzhong@sinap.ac.cn

收稿日期:2019-01-15, 修回日期:2019-03-07

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11575283, No. 11875316, No. U1832146), National Key Development Plan (No. 2017YFA0403400)

First author: TAO Xulei, male, born in 1992, graduated from Wuhan University in 2014, doctoral student, focusing on X-ray microscopy and coherent diffraction imaging

Corresponding author: XU Zijian, E-mail: xuzijian@sinap.ac.cn; TAI Renzhong, E-mail: tairenzhong@sinap.ac.cn

Received date: 2019-01-15, revised date: 2019-03-07

iterative engine (mPIE). Adding momentum to an algorithm means that the iterative process has the characteristic of inertance. The extent of gradient descent relies on the previous steps and the gradient of current step. With the momentum, convergence can escape stagnation, and the reconstructed process can continue even around the local minima with a gradient is very small. The same set of coherent diffraction imaging experimental data was used to test the reconstructed image quality of mPIE algorithm and compare with that of extending Ptychographical iterative engine (ePIE) algorithm. **[Results]** The experimental results showed that mPIE algorithm outperformed ePIE algorithm with smaller convergence value of objective function, and better final reconstructed image quality. **[Conclusion]** The result indicates that a better reconstructed result can be achieved with mPIE algorithm compared with the traditional ePIE algorithm.

Key words X-ray Ptychography, Mixed state, X-ray microscopy, Iterative phase retrieval algorithm

相干衍射成像 (Coherent Diffraction Imaging, CDI) 方法是一种近年来发展迅速的主要用于 X 射线波段的显微成像技术^[1]。该方法利用电荷耦合元件 (Charge-coupled Device, CCD) 等成像元件采集样品被相干 X 射线照射后在远场的衍射花样强度, 再利用计算机计算迭代恢复样品图像。由于 CDI 方法不受成像元件数值孔径和加工精度的限制, 其成像分辨率理论上仅受限于 X 射线的波长及探测器的空间张角, 因此可以达到非常高的成像分辨率。经过多年发展, CDI 方法已经在同步辐射光源^[1-3]、自由电子激光光源^[4-6]、桌面软 X 射线光源^[7-9]等光源上得到了广泛应用。与传统的 X 射线晶体衍射学不同, CDI 方法可以对长程无序的非晶样品进行成像, 不要求样品必须是晶体。因此, CDI 方法已经被广泛地应用在材料、生物、环境等领域的样品的 X 射线成像^[10-19]。

层叠衍射成像技术 (Ptychography) 方法是相干衍射成像方法中的一个重要分支。在该方法中, 入射光 (探针) 对样品进行逐点曝光, 每一个曝光区域与相邻的其它曝光区域都有部分重叠, 每一次曝光产生一幅衍射花样, 所有的衍射花样被同时用相位恢复迭代算法计算并且最终得到样品的复振幅图像。由于重叠区域的存在, 衍射花样之间有着非常强的关联性, 因此, 相对于传统的 CDI 方法, Ptychography 具有收敛快、成像质量好、可以同时重建探针和样品函数等优点。

相位恢复迭代算法是 Ptychography 重建过程中重要的一部分, 自从 Faulkner 和 Rodenburg 于 2004 年提出 PIE (Ptychographical Iterative Engine) 算法后, 相继出现了 ePIE (extended Ptychographic Iterative Engine)、pPIE (parallel Ptychographical Iterative Engine) 等改进算法。目前, 主流的算法是 ePIE 算法, 该算法具有收敛速度更快、鲁棒性更好的特点。ePIE 算法是一种梯度下降算法, 通过不断迭代循环, 探测到的一系列衍射图像不断被输入, 初始

的猜测函数会逐渐修正逼近真实值。

传统的 ePIE 算法利用目标函数的梯度实现收敛, 目标函数梯度越大, 每一步迭代的步幅就越大, 反之则越小。但是, 对于相干衍射方法而言, 求解的未知数数量巨大, 其目标函数是一个非常复杂的函数, 存在着非常多的梯度零点, 也就是局域最小值, ePIE 算法常常会陷入这种局域最小值, 导致收敛停滞, 进而影响图像的重建效果。为了避免这种情况的出现, Maiden 等^[20]引入“动量”的概念, 利用动量加速层叠衍射迭代引擎算法 (momentum Ptychographical Iterative Engine, mPIE) 处理实验数据。本文对同一套实验数据运用两种算法进行了精确重建, 详细比较了 mPIE 算法和 ePIE 算法的重建过程和图像质量, 验证了动量加速对于 Ptychography 方法结果的提升效果。

1 算法原理

1.1 动量加速

相位恢复算法迭代循环是一个猜测衍射信号值与探测到的真实衍射信号值之间的误差不断变小的过程。整个迭代循环是一个寻找目标函数最小值的过程, 目标函数的定义是:

$$E = \sum_j^m (|O_{rj} \times P_{r-R_j}|^2 - I_{rj}) \quad (1)$$

式中: m 代表衍射图像的数量。目标函数函数越小也就意味着猜测衍射花样越逼近真实的衍射花样。如图 1(a) 所示, 每一次迭代都会让目标函数向着更小的方向前进一步, 直到达到全局最小值。在传统的相位恢复算法 ePIE 算法中, 每一次迭代目标函数下降的幅度取决于“梯度”, 也就是振幅替代之前和之后的样品复振幅之差。这种收敛方式的一个缺陷就是容易让目标函数陷入局域最小值之中。如图 1(b) 所示, 误差会一直向着不断变小的方向前进, 但是由于这种下降方式完全依赖于梯度, 而梯度为零

的地方远不止全局最小值一处,因此目标函数很容易就会停留在a点(局域最小值),而不能到达b点(全局最小值)。加入“动量”这一概念可以帮助我们克服这一问题。动量加速这一概念来源于神经网络,在添加动量的情况下,误差每一次下降的幅度不仅取决于当前梯度,还会受到之前若干步下降的幅度影响。换句话说,给迭代过程赋予了“惯性”这一性质,即便是在像a点这样的梯度为0的局域最小

值,因为之前的下降过程产生了惯性,误差会继续前进,越过局域最小值,最终到达全局最小值的b点。加入动量这一概念对于相位恢复迭代算法的好处是:1)避免了收敛停滞现象的出现,误差一般可以收敛到一个比较小的值,从而得到一个更好的结果;2)加快了收敛速度,由于有动量(惯性)的存在,收敛速度得以加快。

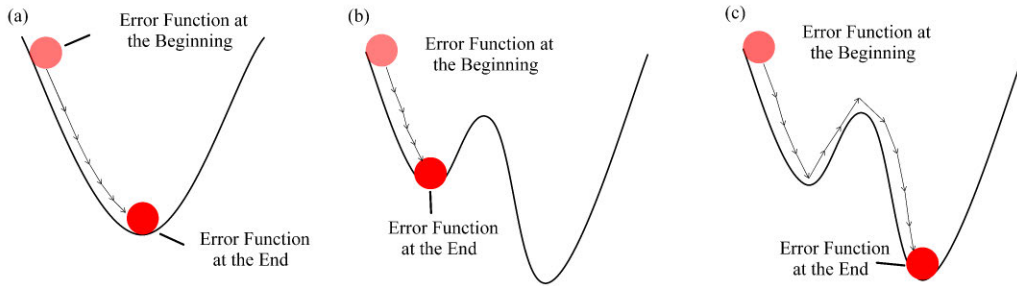


图1 动量加速对于目标函数下降的影响

- (a) 目标函数依靠梯度下降达到全局最小值, (b) 没有动量情况下目标函数停滞于局域最小值, (c) 有动量情况下目标函数达到全局最小值

Fig.1 The impacts of momentum on error function decline

- (a) Error function reaches the global minimum point with gradient descent, (b) Error function stagnates at a local minimum point without momentum, (c) Error function reaches the global minimum point with momentum

1.2 ePIE算法原理

ePIE算法是由Maiden与Rodenburg于2004年提出的相位恢复算法,在每一次迭代中,所有的衍射花样会以随机顺序依次带入算法中,样品和探针函数不断进行升级。在这里,我们采用 r 表示实空间坐标; q 表示傅里叶空间坐标; F 表示傅里叶变换;下标 j 表示第 j 个扫描点; R_j 表示该扫描点探针与样品的相对位置。每一次迭代循环的步骤如图2所示。

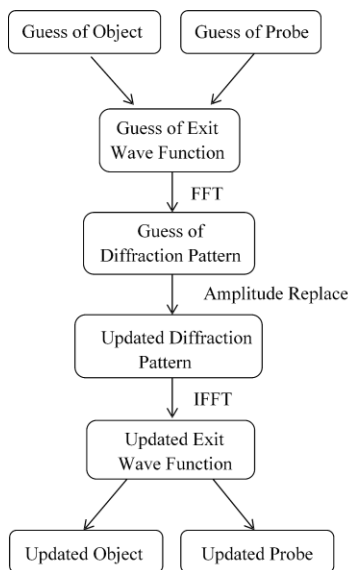


图2 ePIE算法一次迭代升级流程示意图

Fig.2 The flow chart of one iterative update of ePIE

1)随机打乱所有曝光位置的顺序,探针曝光在第 j 个点的出射波函数可以表示为:

$$\psi_{r,j} = O_{r,j} \times P_{r-R_j} \quad (2)$$

式中: $\psi_{r,j}$ 、 $O_{r,j}$ 和 P_{r-R_j} 分别为出射波函数、样品猜测函数、探针猜测函数。

2)在满足远场条件的情况下,出射波函数传播一段距离以后的远场衍射函数可以近似看做是出射波函数的傅里叶变换:

$$\varphi_{q,j} = \mathcal{F} \{ \psi_{r,j} \} \quad (3)$$

3)这里我们得到的远场衍射函数是猜测函数的傅里叶变换,这时引入探测到的光强信息,做振幅替代,得到更新后的远场衍射函数:

$$\varphi_{q,j}^* = \frac{\varphi_{q,j}}{\sqrt{I_{q,j}}} \sqrt{I_{q,j}^M} \quad (4)$$

4)更新远场衍射函数后做逆傅里叶变换,得到更新后的出射波函数:

$$\psi_{r,j}^* = \mathcal{F}^{-1} \{ \varphi_{q,j}^* \} \quad (5)$$

5)同时升级样品函数和探针函数,每一次升级时样品函数和探针函数的变化幅度取决于出射波函数更新前和更新后的差,也就是上文所说的“梯度”。其升级函数如下:

$$O_{r,j}^* = O_{r,j} + \alpha \frac{P_{r-R_j}^*}{|P_{r-R_j}|_{\max}^2} (\psi_{j,r}^* - \psi_{j,r}) \quad (6)$$

$$P_{r-R_j}^* = P_{r-R_j} + \beta \frac{O_{r_j}^*}{|O_{r_j}|_{\max}^2} (\psi_{j,r}^* - \psi_{j,r}) \quad (7)$$

6)对下一个曝光点重复第1到5步,直到所有的曝光点都升级完毕,这样就完成了一次迭代。重复这一过程直到探针和样品函数都收敛到一个稳定的值。

1.3 mPIE算法原理

动量加速层叠衍射迭代引擎算法(mPIE)是由Maiden等^[20]于2017年提出的新算法。在mPIE算法中,每隔固定迭代次数 T 就会同时对探针和样品函数施加一次动量,每一次施加动量之前会先计算动量:

$$\begin{aligned} v_{j,r}^o &= \eta_{\text{obj}} v_{j-T,r}^o + (O_{j,r}^* - O_{j+1-T,r}) \\ v_{j,r}^p &= \eta_{\text{pro}} v_{j-T,r}^p + (P_{j,r}^* - P_{j+1-T,r}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $v_{j,r}^o$ 表示本次施加给样品函数的动量; $v_{j-T,r}^o$ 表示上一次施加的动量; η_{obj} 和 η_{pro} 为参数,需要调节以找到一个合适的值。之后动量函数会添加到探针和样品函数的升级中:

$$\begin{aligned} O_{j+1,r} &= O_{j,r}^* + \eta_{\text{obj}} v_{j,r}^o \\ P_{j+1,r} &= P_{j,r}^* + \eta_{\text{pro}} v_{j,r}^p \end{aligned} \quad (9)$$

图3展示了mPIE算法的流程和如何将动量添加到迭代过程中,相比较于ePIE算法,mPIE算法每隔若干步升级就会同时对样品和探针施加动量。

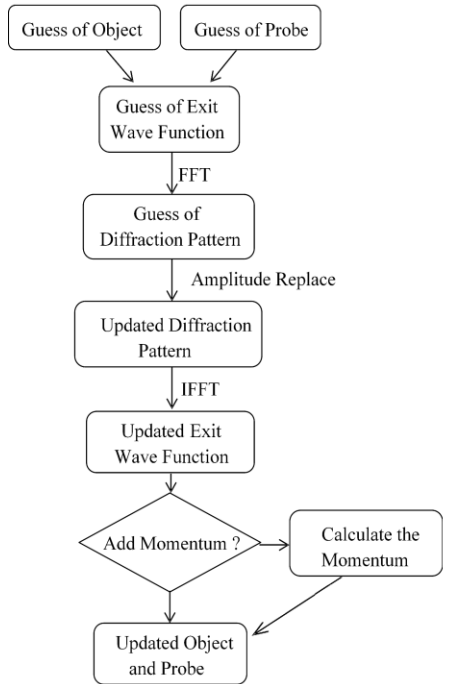


图3 mPIE算法一次迭代升级流程图
Fig.3 The flow chart of one iterative update of mPIE

2 实验结果及讨论

2.1 实验参数设置

为了验证添加动量(mPIE算法)的效果,我们在上海同步辐射光源谱学显微线站^[21-25](BL08U1A)进行了X射线层叠衍射成像验证实验。BL08U1A束线装置产生的相干X射线被菲涅尔波带片聚焦,实验所采用的波带片为购买自美国Xradia公司的波带片,其直径为200 μm,最外环宽度为30 nm,理论上可以将X射线聚焦到30 nm大小的光斑。聚焦光经过70 μm小孔的选择,高级次的衍射光和直透光全部被遮挡。实验过程中样品向光路下游移动,处于离焦状态,这样可以获得更大的光斑,提高实验效率。实验中通过调整离焦距离,获得的探针光斑尺寸约2 μm。实验中CCD的曝光时间为400 ms,探针扫描步长为400 nm,扫描点阵为12×12,总共记录144幅衍射图样。

实验中使用的样品是表面有Fe₃O₄颗粒的聚合物小球,小球尺寸在2~3 μm,实验时所用的入射光能量是709 eV。

2.2 重建结果展示与比较

我们对采集到的同一组数据分别用mPIE和ePIE算法进行计算,两种算法的初始探针和样品猜测函数是同样的随机函数。弛豫参数全部都经过了优化,ePIE算法优化后的参数为: $\alpha=0.9, \beta=0.9$ 。mPIE算法中参数: $\alpha=0.1, \beta=0.2, \eta_{\text{obj}}$ 和 η_{pro} 分别为0.05和0.9, T 为30。mPIE算法中, α 与 β 相较于ePIE算法显著变小,是因为mPIE算法中目标函数下降的幅度在不断累积,如果参数设置过大那么重建过程容易走向发散不收敛。每一种算法分别迭代了500步,迭代完成后得到所得到的样品和探针重建图像如图4所示。图4(a)展示的是利用ePIE算法得到的重建结果,从左到右分别为重建振幅图像、振幅图像一部分细节、重建相位图像、相位图像一部分细节,图4(b)展示的是利用mPIE算法得到的重建结果。

对比样品的振幅和相位重建图像可以看出来,尽管利用ePIE算法得到的重建图像已经比较清晰,但是相对于mPIE算法计算得到的结果来讲,ePIE算法的结果在一些细节上仍然不够好,例如不够清晰,衬度对比不够明显,部分地方有重建产生的条纹噪声等。

图4(c)对两种算法的目标函数收敛曲线进行了比对。相对于不施加动量的情况,施加动量的mPIE算法虽然在一开始迭代的时候目标函数比较大,但是随着迭代的进行,目标函数下降的速度很快,并且

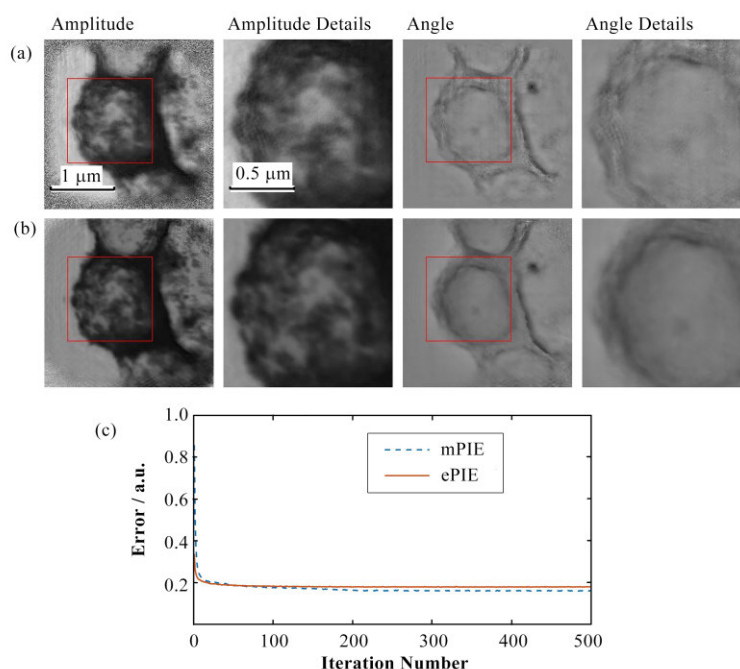


图4 ePIE算法与mPIE算法得到的结果对比 (a) ePIE算法得到的结果,(b) mPIE算法得到的结果,(c) 两种算法收敛曲线
Fig.4 The comparison of the results by ePIE and mPIE

(a) The result calculated by ePIE, (b) The result calculated by mPIE, (c) Two convergence curves by ePIE and mPIE

最终施加动量的mPIE算法的目标函数收敛值要小于不施加动量的ePIE算法。

同时,我们比较了两种算法重建得到的探针图像,如图5所示。我们的探针是由波带片对一束平面波聚焦得到的,因此探针的波前应当是比较均匀的,类中心对称的环状结构。比较两者可以发现,ePIE算法得到的探针起伏比较大,探针中有不少明亮的光斑,而mPIE算法得到的探针就比较均匀。这也从侧面佐证了mPIE算法对于重建质量的改善效果。

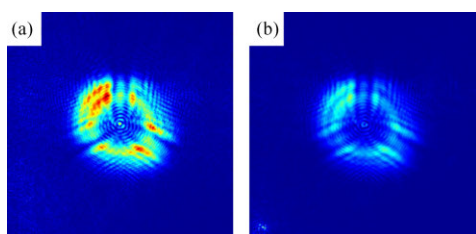


图5 两种算法得到的探针振幅图 (a) ePIE,(b) mPIE
Fig.5 The amplitude patterns of reconstructed probes calculated by two algorithms (a) ePIE, (b) mPIE

2.3 实验结果讨论

通过两种算法的结果对比,我们可以看到,相对于ePIE算法,mPIE算法的目标函数可以收敛到一个更小的值,并且mPIE算法所得到的最终的重建图像质量也要好于ePIE算法。这证明了通过施加动

量的方法,确实可以有效改善相干衍射成像方法的图像质量。

同时值得一提的是,mPIE算法对于弛豫参数有一定的要求,在本次实验中,所有的弛豫参数都经过了一定的优化。在实验参数、样品类型不一样的情况下,对弛豫参数进行优化是获得好的实验结果的必要条件。

3 结语

本文介绍了一种改进型的扫描相干衍射相位恢复算法mPIE,该算法引入了动量这一原本出现在神经网络中的概念,通过将之前若干次迭代中的探针函数和目标函数变化的幅度累加到当前迭代中,提高了重建函数的收敛速度,让目标函数可以快速收敛到全局最小值,从而提高了最后的图像恢复质量。本研究通过一组X射线实验数据的重建结果分析和比较,证明了添加向量后算法对于图像重建具有显著的提升效果。

参考文献

- 1 Miao J W, Charalambous P, Kirz J, *et al.* Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens[J]. *Nature*, 1999, **400**(6742): 342-344. DOI: 10.1038/22498.
- 2 Miao J, Ishikawa T, Johnson B, *et al.* High resolution 3D

- X-ray diffraction microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(8): 088303. DOI: 10.1103 / PhysRevLett. 89. 088303.
- 3 Shapiro D, Thibault P, Beetz T, *et al.* Biological imaging by soft X-ray diffraction microscopy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(43): 15343–15346. DOI: 10.1073/pnas.0503305102.
- 4 Chapman H N, Barty A, Bogan M J, *et al.* Femtosecond diffractive imaging with a soft-X-ray free-electron laser [J]. *Nature Physics*, 2006, **2**(12): 839–843. DOI: 10.1038/nphys.461.
- 5 Mancuso A P, Schropp A, Reime B, *et al.* Coherent-pulse 2D crystallography using a free-electron laser X-ray source[J]. *Physical Review Letters*, 2009, **102**(3): 035502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.035502.
- 6 Martin A V, Loh N D, Hampton C Y, *et al.* Femtosecond dark-field imaging with an X-ray free electron laser[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12): 13501 – 13512. DOI: 10.1364/OE.20.013501.
- 7 Sandberg R L, Paul A, Raymondson D A, *et al.* Lensless diffractive imaging using tabletop coherent high-harmonic soft-X-ray beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **99**(9): 098103. DOI: 10.1103 / PhysRevLett. 99. 098103.
- 8 Sandberg R L, Song C Y, Wachulak P W, *et al.* High numerical aperture tabletop soft X-ray diffraction microscopy with 70-nm resolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(1): 24 – 27. DOI: 10.1073 / pnas. 0710761105.
- 9 Ravasio A, Gauthier D, Maia F R N C, *et al.* Single-shot diffractive imaging with a table-top femtosecond soft X-ray laser-harmonics source[J]. *Physical Review Letters*, 2009, **103**(2): 028104. DOI: 10.1103 / PhysRevLett. 103. 028104.
- 10 Jiang H, Ramunno-Johnson D, Song C, *et al.* Nanoscale imaging of mineral crystals inside biological composite materials using X-ray diffraction microscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(3): 038103. DOI: 10.1103/ PhysRevLett.100.038103.
- 11 Schroer C G, Boye P, Feldkamp J M, *et al.* Coherent X-ray diffraction imaging with nanofocused illumination[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **101**(9): 090801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.090801.
- 12 Nelson J, Huang X J, Steinbrener J, *et al.* High-resolution X-ray diffraction microscopy of specifically labeled yeast cells[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(16): 7235–7239. DOI: 10.1073/pnas.0910874107.
- 13 Raines K S, Salha S, Sandberg R L, *et al.* Three-dimensional structure determination from a single view [J]. *Nature*, 2010, **463**(7278): 214–217. DOI: 10.1038/nature08705.
- 14 Miao J, Kirz J, Sayre D. The oversampling phasing method[J]. *Acta Crystallographica Section D*, 2000, **56** (10): 1312–1315. DOI: 10.1107/S0907444900008970.
- 15 Abbey B, Whitehead L W, Quiney H M, *et al.* Lensless imaging using broadband X-ray sources[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(7): 420–424. DOI: 10.1038/nphoton. 2011.125.
- 16 范家东, 江怀东. 相干 X 射线衍射成像技术及在材料学和生物学中的应用[J]. *物理学报*, 2012, **61**(21): 218702. FAN Jiadong, JIANG Huaidong. Coherent X-ray diffraction imaging and its applications in materials science and biology[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61** (21): 218702.
- 17 刘海岗, 许子健, 张祥志, 等. 中心挡板对扫描相干 X 射线衍射成像的影响[J]. *物理学报*, 2013, **62**(15): 150702. LIU Haigang, XU Zijian, ZHANG Xiangzhi, *et al.* Influence of central beamstop on ptychographic coherent diffractive imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(15): 150702.
- 18 Yang W, Huang X, Harder R, *et al.* Coherent diffraction imaging of nanoscale strain evolution in a single crystal under high pressure[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 1680. DOI: 10.1038/ncomms2661.
- 19 Zhang J, Fan J D, Zhang J H, *et al.* Three-dimensional coherent diffraction imaging of Mie-scattering spheres by laser single-orientation measurement[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(9): 094201. DOI: 10.1088/1674-1056/24/9/ 094201.
- 20 Maiden A, Johnson D, Li P. Further improvements to the ptychographical iterative engine[J]. *Optica*, 2017, **4**(7): 736. DOI: 10.1364/OPTICA.4.000736.
- 21 Xue C, Wang Y, Guo Z, *et al.* High-performance soft X-ray spectromicroscopy beamline at SSRF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(10): 103502. DOI: 10.1063/1.3491837.
- 22 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. DOI: 10.3788/AOS201131.0418001.

- 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. DOI: 10.3788/AOS201131.0418001.
- 23 祝江威, 许子健, 刘海岗, 等. 基于 X 射线相干衍射成像的元素分布成像[J]. *核技术*, 2012, **35**(4): 245–250.
- ZHU Jiangwei, XU Zijian, LIU Haigang, *et al.* Three-dimension elemental mapping based on coherent X-ray diffraction imaging[J]. *Nuclear Techniques*, 2012, **35**(4): 245–250.
- 24 Yang S M, Wang L S, Zhao J, *et al.* Developments at SSRF in soft X-ray interference lithography[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, **26**(1): 010101. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.010101.
- 25 Zhang L, Xu Z, Zhang X, *et al.* Latest advances in soft X-ray spectromicroscopy at SSRF[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, **26**(4): 040101. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.040101.