

引用格式: DOU Jian-tai, HU You-you, YANG Zhong-ming. Correction Method for the Wavelength Instability of Ptychography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1211003

窦健泰, 胡友友, 杨忠明. 叠层成像波长不稳定性校正方法研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12):1211003

叠层成像波长不稳定性校正方法研究

窦健泰¹, 胡友友¹, 杨忠明²

(1 江苏科技大学 理学院, 江苏 镇江 212003)

(2 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 366237)

摘要: 在叠层成像中若已知波长与实际波长不符或在工作时波长发生偏移, 则会使重建图像变模糊并降低图像的分辨率. 针对该问题, 本文提出了一种分段校正波长不稳定性方法. 该方法将基于 Tamura 系数的自聚焦方法与叠层成像方法结合, 并在不同阶段通过调整轴向距离来校正波长不稳定性. 基于菲涅耳衍射理论建立了波长不稳定性对重建结果的影响模型, 并指出可通过调整轴向距离来实现对波长不稳定性校正, 并将新的轴向距离代入下一个阶段的迭代计算, 直至相邻两次计算的轴向距离之差满足终止条件时, 保持最后一轮的轴向距离继续代入到迭代计算, 即可校正波长不稳定性, 且校正精度在纳米级. 仿真以及实验均证明了分段校正波长不稳定性方法的可行性.

关键词: 信息光学; 叠层成像; 波长不稳定性; 相位复原; 自聚焦

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204912.1211003

Correction Method for the Wavelength Instability of Ptychography

DOU Jian-tai¹, HU You-you¹, YANG Zhong-ming²

(1 College of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China)

(2 School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 366237, China)

Abstract: If the known wavelength was inconsistent with the actual wavelength or the wavelength was shifted due to the wavelength instability, the reconstructed image would become fuzzy and the resolution of the image would be reduced. A piecewise correction method for the wavelength instability is proposed that is combined of the self-focusing method based on Tamura coefficient and ptychography, and it can correct the wavelength instability by changing the axial distance at different stages. Based on the Fresnel diffraction theory, we establish the model for the wavelength instability, and it points out that adjusting the axial distance can be used to correct the wavelength instability. The axial distance of each phase can be determined by the self-focusing method based on Tamura coefficient, and the new axial distance is taken into the next stage of the iterative calculation, until the difference between the adjacent two calculations of the axial distance meets the termination conditions. The last axial distance is again taken into the ptychography algorithm to correct the wavelength instability and obtain the distinct reconstructed image, and the correction accuracy is in the nanometer level. Simulation and experiment have proved the feasibility of the piecewise correction method for wavelength instability.

Key words: Information optics; Ptychography; Wavelength instability; Phase retrieval; Self-focusing

OCIS Codes: 110.4980; 110.6150; 110.2960

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61905131), 江苏省自然科学基金(No. BK20190954), 江苏省高等学校自然科学研究面上资助项目(No. 19KJB140007), 山东省自然科学基金(No. ZR2019QF013)

第一作者: 窦健泰(1990-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为计算成像、叠层成像. Email: jiantai.dou@just.edu.cn.

通讯作者: 杨忠明(1987-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学精密测试技术、计算成像. Email: zhongming.yang@sdu.edu.cn.

收稿日期: 2020-07-08; **录用日期:** 2020-08-31

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

0 引言

相位复原方法是一种在空域或频域增加光强限制条件重建待测物体相位的方法,在常规相位复原方法中,一系列波前在空域和频域之间来回迭代,且用实际测量的振幅替换计算波前的振幅^[1].采集图像的振幅变化以及相邻振幅之间的区别是相位重建的关键因素,为了提高相邻振幅的变化量,主要途径是增加测量次数,其有效的手段包括增加多个轴向位移平面^[2-3]、多个波长扫描^[4-5]、阵列移动照明光场^[6]以及增加照明光场离焦量^[7].

叠层成像方法(Ptychographical Iterative Engine, PIE)作为阵列移动照明光场方法中的典型例子,其要求待测物相对于照明光,在垂直于光轴的平面上逐行逐列移动,每次移动需保证相邻扫描位置有一定的重叠量,同时记录每次扫描的衍射光强.叠层成像方法成功复原相位的关键,在于相邻扫描位置之间有确定的重叠区域,重叠的信息有利于待测物各个位置相位信息的关联与连接.由于叠层成像方法具有成像范围可扩展、收敛速度快、具有唯一解、抗噪声能力强等诸多特点,使其在诸多领域中得到了重要应用^[8-9].在最初的PIE实验中,假设照明光场是精确已知、完全相干且波长稳定的,阵列扫描位置是准确已知的,采集到的衍射图形是无噪声的,待测样品是薄的.但以上诸多条件在实验过程中是很难满足.为解决需预先已知照明光场的问题,科研人员提出了共轭梯度(Conjugate Gradient, CG)算法^[10]、差异图(Difference Map, DM)算法^[11]和扩展叠层成像(extended Ptychographical Iterative Engine, ePIE)算法^[12],它们可在迭代过程中重建待测物的同时重建出照明光场.为校正扫描误差,提出了共轭梯度算法^[13]、遗传算法^[14]、退火方法^[15]、全局漂移模型^[16]、互相关技术^[17]等算法.为校正轴向距离误差,提出了迭代自聚焦^[18]以及基于图像信息熵的轴向距离误差校正方法^[19].针对照明光部分相干性问题,提出了混合状态的叠层成像方法^[20].针对噪声问题,建立了噪声模型以及自适应策略来抑制噪声对复原结果的影响^[21-22].叠层成像方法应用的前提条件是照明光与物体作用可近似为照明光与物体透过率函数的乘积,且在实验中物体厚度可忽略.但当样品厚度不可忽略时,物体的透过率函数会随照明光和样品相对位置的变化而发生改变,不再满足乘法近似.为解决厚样品成像问题,可将厚物体沿轴向进行切片分层,使每一层物体都满足乘法近似,这样处理可降低对物体厚度的要求,实现三维物体的分层成像处理厚样品^[23-24].

上述提到的迭代方法中,工作波长参与了每一次的衍射传输过程,若已知波长与实际波长不符或在工作时波长不稳定且发生偏移,则会影响最终的重建结果,降低成像分辨率,尤其是在用半导体激光器照明的叠层成像系统中^[25],温度变化会影响输出波长.本文提出了一种分段校正波长不稳定性的方法,该方法将基于Tamura系数的迭代自聚焦方法与叠层成像方法结合,并在重建过程中进行分段校正波长不稳定性,直至满足校正收敛的条件,即可校正波长不稳定性对复原结果的影响.首先,本文基于菲涅耳衍射理论建立了波长不稳定性对重建结果的影响模型,由于在菲涅耳衍射公式中波长与轴向距离的功能等效,所以波长不稳定性对复原结果的影响与轴向距离误差对复原结果的影响也等效.基于波长与轴向距离等效的特性,通过调整轴向距离来实现对波长不稳定性的校正.本文选用基于Tamura系数的自聚焦方法,确定每个阶段的轴向距离,并将新的轴向距离代入下一个阶段的迭代,直至相邻两次计算的轴向距离之差满足终止条件时,同时保持最后一轮的轴向距离继续代入到迭代计算,即可重建出清晰的图像,即实现校正波长不稳定性.

1 理论研究

1.1 波长不稳定性对重建结果的影响模型

叠层成像方法要求待测物相对于照明光,在垂直于光轴的平面上逐行逐列移动,每次移动需保证相邻扫描位置有一定的重叠量,同时记录每次扫描的衍射光强.叠层成像技术相位复原成功的关键,在于相邻扫描位置之间有确定的重叠区域,重叠的信息有利于待测物各个位置相位信息的关联与连接.图1给出了叠层成像系统中物平面和记录平面的坐标关系以及成像光路图.在叠层成像迭代过程中,针对薄物体成像时,照明光与待测物体的作用结果可等效为两个复振幅函数相乘的结果,照明光复振幅 $P(x, y)$ 与物体复振幅 $O(x, y)$ 在物平面上相作用,即照明光与待测物体作用后的出射波前 $U(x, y) = P(x, y) \times O(x, y)$,其中 $P(x, y)$ 为照明光的复振幅, $O(x, y)$ 为待测物体的复振幅, x 和 y 为物平面坐标系.在迭代过程中,需利用衍射公式计算波前 $U(x, y)$ 在记录平面处的复振幅分布 $U_c(\mu, \nu)$ ^[26],其中 μ 和 ν 为记录平面坐标系;同时,将记

录平面实际采集到衍射强度替换 $U_c(\mu, \nu)$ 的强度,然后更新强度后的波前逆向传输回物平面,将传输到物平面的复振幅带入到叠层成像方法的更新函数中,计算新一轮的待测物体的复振幅和照明光复振幅函数.

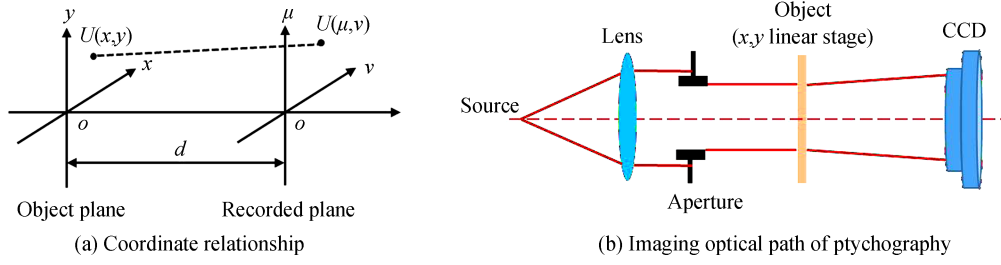


图1 叠层成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of Ptychography

由于借助衍射公式计算波前,每一次的计算波前波长都参与运算,如果实际波长与已知波长不符或波长不稳定时,即光源波长存在不稳定性,其必会影响最终的重建图像和精度.为分析波长不稳定性对重建结果的影响,现以菲涅耳衍射理论建立波长不稳定性对重建结果的影响模型.假设波长不稳定性因子为 α^2 ($\alpha > 0$),已知的波长为 λ_0 , λ_0 也为实际参与衍射运算的波长,实际采集衍射光强的波长为 λ_1 ,这两个波长的数值关系为 $\lambda_1 = \alpha^2 \lambda_0$.通过菲涅耳衍射理论可计算理论情况下记录平面的复振幅 $U_c(\mu, \nu)$ 为

$$U_c(\mu, \nu) = \frac{1}{i\lambda_0 d} \iint U(x, y) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2}{2d}\right] dx dy \quad (1)$$

式中, d 是物平面到记录平面的轴向距离.

但是由于波长不稳定性,记录平面实际接受的复振幅 $U_s(\mu, \nu)$ 的菲涅耳衍射公式为

$$\begin{aligned} U_s(\mu, \nu) &= \frac{1}{i\lambda_1 d} \iint U(x, y) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda_1} \frac{(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2}{2d}\right] dx dy \\ &= \frac{1}{i\alpha^2 \lambda_0 d} \iint U(x, y) \exp\left[i \frac{2\pi}{\alpha^2 \lambda_0} \frac{(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2}{2d}\right] dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

在记录平面处需用实际采集的强度信息替换 $U_c(\mu, \nu)$ 的强度,即式(1)和(2)的模应相等,所以将式(1)进行坐标变换,变换结果如式(3)所示

$$\begin{aligned} U_c(\mu, \nu) &= \frac{\alpha^2}{i\lambda_1 d} \iint U(x, y) \exp\left[i \frac{2\alpha^2 \pi}{\lambda_1} \frac{(\mu - x)^2 + (\nu - y)^2}{2d}\right] dx dy \\ &= \frac{1}{i\lambda_1 d} \iint U(x'/\alpha, y'/\alpha) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda_1} \frac{(\alpha\mu - x')^2 + (\alpha\nu - y')^2}{2d}\right] dx' dy' \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $x' = \alpha x, y' = \alpha y$, 此时物平面坐标系由 (x, y) 转化成 (x', y') .由式(3)可知,当波长存在不稳定或已知的波长与实际波长有偏差时,重建图像的坐标会发生压缩或扩张变化,进而产生弥散性像差,从而使图像模糊.

由菲涅耳衍射理论可知,波长与轴向距离在衍射积分公式中功能是等效的,将式(1)中的轴向距离 d 调整为 d/α^2 ,即可使式(1)等于式(2).以上分析说明波长不稳定性和轴向距离误差对重建结果的影响等效,同时说明可将轴向距离误差校正方法^[17-18]引入到波长不稳定性校正方法中.

1.2 波长不稳定性校正方法

我们前期工作^[18-19]指出叠层成像中的轴向距离误差的校正方法与全息中自聚焦方法接近,自聚焦方法通过计算不同距离处的图像质量指标来确定最清晰位置.为校正波长不稳定性,本文选取 Tamura 系数 $T^{[18]}$ 作为图像质量评价指标,计算公式为

$$T = \frac{\text{std}(|O(x, y)|)}{\sqrt{\text{mean}(|O(x, y)|)}} \quad (4)$$

式中, $|O(x, y)|$ 为重建物函数的模, $\text{std}()$ 和 $\text{mean}()$ 是标准差函数和平均值函数.

为校正波长不稳定性, 本文提出的分段校正波长不稳定性方法具体步骤为

Step 1: 确定设置固定迭代次数, 将已知的波长和轴向距离 d 以及初始的随机猜测 $O_n(x, y)$ 以及根据小孔光阑尺寸大小估算猜测的照明光为 $P_n(x, y)$, 其中 n 表示迭代次数, 初始 $n=0$.

Step 2: 照明光经待测样品后出射光场复振幅分布为 $\psi_n(x, y, R_j) = O_n(x, y, R_j) \times P_n(x, y)$, 并角谱衍射公式将其传输到 CCD 平面, 获得复振幅 $\phi_n(\mu, \nu, R_j)$, 其中 R_j 表示第 j 次扫描位置, $j=1, 2, 3, \dots$.

Step 3: 用 CCD 实际采集到的衍射光强 $I(\mu, \nu, R_j)$ 替换变换得到的复振幅分布 $\phi_n(\mu, \nu, R_j)$ 的振幅, 保持相位部分不变, 即 $\phi'_n(\mu, \nu, R_j) = \sqrt{I(\mu, \nu, R_j)} \frac{\phi_n(\mu, \nu, R_j)}{|\phi_n(\mu, \nu, R_j)|}$.

Step 4: 将更新后的复振幅 $\phi'_n(\mu, \nu, R_j)$ 逆向传输回物平面, 获得新的照明光经待测样品后出射光场复振幅 $\psi'_n(x, y, R_j)$.

Step 5: 分别更新物函数和照明光场, 更新函数为

$$O_{n+1}(x, y) = O_n(x, y) + \frac{P_n^*(x, y)}{|P_n(x, y)|_{\max}^2} \times \alpha [\psi'_n(x, y, R_j) - \psi_n(x, y, R_j)] \quad (5)$$

$$P_{n+1}(x, y) = P_n(x, y) + \frac{O_n^*(x, y)}{|O_n(x, y)|_{\max}^2} \times \beta [\psi'_n(x, y, R_j) - \psi_n(x, y, R_j)] \quad (6)$$

式中, $O_n^*(x, y)$ 和 $P_n^*(x, y)$ 表示对应函数的共轭, α 和 β 表示更新系数, 本文 $\alpha=\beta=1$.

Step 6: 移动照明光场, 重复上述 Step 2~5 直至完成指定迭代次数. 此时待测物函数 $O_{n+1}(x, y)$ 的模随着迭代次数增加变化较小, 可用于计算修复波长不稳定性的新的轴向距离;

Step 7: 确定利用 Tamura 系数自聚焦方法的传输距离范围 $L=[d_l, d_u]$ 以及采样步长 Δd , 将重建出的物函数 $O_{n+1}(x, y)$ 代入到衍射公式中, 计算每个传输距离处的物函数复振幅以及对应的 Tamura 系数 T ;

Step 8: 从计算所得的 Tamura 系数曲线中提取其最大值, 并计算该最大值对应的轴向距离 $d_i (i=1, 2, 3, \dots)$;

Step 9: 将新的轴向距离 d_i 、重建的照明光场函数 $P_{n+1}(x, y)$ 、物函数 $O_{n+1}(x, y)$ 以及已知的波长 λ_0 重新代入叠层成像迭代算法 (Step 2~6) 中, 当达到指定迭代次数时, 可获取新的重建照明光场函数 $P'_{n+1}(x, y)$ 和物函数 $O'_{n+1}(x, y)$, 再一次确定传输距离范围 $[d_l, d_u]$ 以及采样步长 Δd (传输距离可以缩小, 减少计算时间), 将重建出的物函数 $O'_{n+1}(x, y)$ 代入到衍射公式中, 计算每个传输距离处的物函数复振幅以及对应的 Tamura 系数 T ;

Step 10: 从计算所得的 Tamura 系数曲线中提取其最大值, 并计算该最大值对应的轴向距离 d_{i+1} , 若 $|d_{i+1} - d_i| < \delta$, δ 为判据, 在本文中仿真和实验部分 δ 均为 0.005, 则进行 Step 11; 若不满足, 则将 d_{i+1} 和重建的照明光场函数和物函数代入 Step 9;

Step 11: 将新的轴向距离 d_{i+1} 、重建的照明光函数 $P_{n+1}(x, y)$ 、物函数 $O_{n+1}(x, y)$ 以及已知的波长 λ_0 重新代入叠层成像迭代算法 (Step 2~6) 中, 当达到指定迭代次数时, 即可重建出清晰的待测物, 达到校正波长不稳定性的目的.

2 仿真分析

为验证本文提出方法的可行性, 现以常规叠层成像系统为例, 系统图如图 1 所示, 其包含光源、扩束准直系统、光阑 (调整照明光斑大小)、二维阵列位移装置 (使待测物体相对照明光进行阵列位移) 以及成像 CCD. 具体参数如下: 已知工作波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$, 光阑有效直径为 1 mm , 成像 CCD 的像素尺寸为 $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$, 共有 1024×1024 个像素, 共扫描了 5×5 个位置; 通过调整扫描步长和扫描方向可消除 grid pathology 问题^[27], 本文选取移动步长在 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$ 之间分布, 扫描路径非固定方向, 各扫描位置交叠率在 $60\% \sim 90\%$ 之间; 待测物体到 CCD 的轴向距离是 64 mm .

2.1 波长不稳定性对重建结果的影响

当光源波长不稳定且在一定范围内波动或已知的波长与实际波长有偏差时,基于1.1节分析的结论,这种波长不稳定性会使重建的图像的坐标发生压缩或扩张变化,进而产生弥散性像差,从而使图像模糊.为分析波长不稳定性对重建结果的影响,设计以下仿真,图2给出了重建范围、理想波长、2 nm波长偏差以及10 nm波长偏差情况下分辨率图像的振幅重建结果,分别将图2(c)和2(d)与2(b)比较,可发现当已知波长与实际波长偏差2 nm时已使振幅重建图像变模糊,尤其对中心区域尺寸更小的线对影响更大,只能分辨基础轮廓信息;当已知波长与实际波长偏差10 nm时中心区域线对轮廓基本不能分辨.这一结论表明,当波长不稳定,即已知波长与实际波长有偏差时,会使重建结果模糊,严重影响成像分辨率.为进一步分析波长不稳定性对重建结果的影响,本文采用如式(5)中的均方根误差(Mean-Squared Error, MSE)来评价重建精度,图3给出

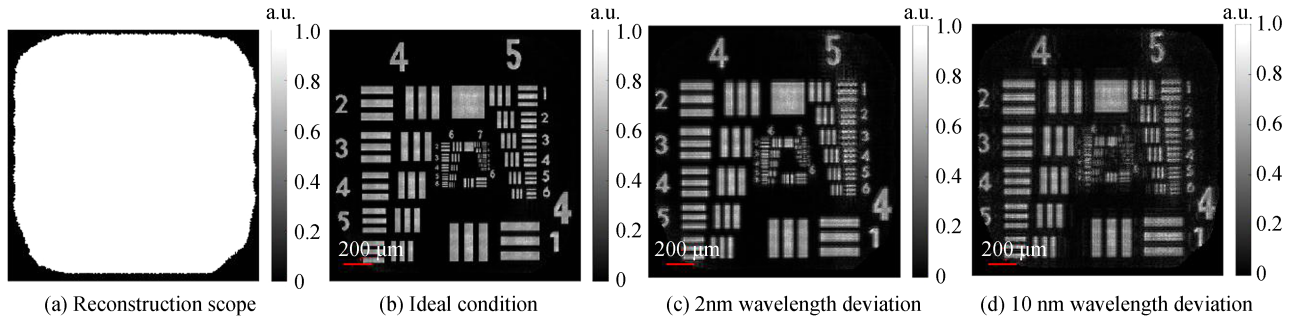


图2 波长不稳定性对重建振幅的影响

Fig.2 Effect of the wavelength instability on the retrieved image

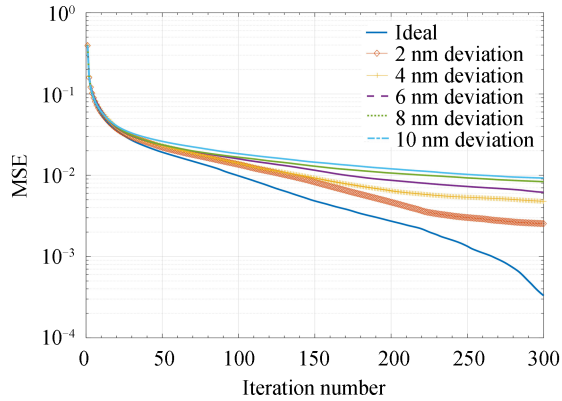


图3 关于波长不稳定性MSE

Fig.3 MSE based on the wavelength instability

了不同波长偏差情况下的MSE曲线.由图3可知,当波长存在2 nm以上偏差时就会对复原结果有较大的影响,同时随着波长偏差的增大,重建质量受到的影响也越来越大.

$$\text{MSE} = \frac{\sum_u \sum_v \left| \sqrt{I(\mu, \nu)} - |\Psi(\mu, \nu)| \right|^2}{\sum_u \sum_v I(\mu, \nu)} \quad (7)$$

式中, $I(\mu, \nu)$ 为CCD采集到的光强, $\Psi(\mu, \nu)$ 为重建结果在CCD平面处的波前.

2.2 波长不稳定性校正方法可行性验证

在叠层成像算法中,随着迭代次数的增加,重建出的物函数将趋于稳定,且其强度信息随迭代次数的增加发生的变化也微乎其微.此时,可将重建的物函数代入到基于Tamura系数的自聚焦测距算法中去计算可修正波长不稳定性新一轮轴向距离.本节主要讨论波长不稳定性为10 nm,即已知波长与实际波长存在10 nm波长偏差时,重建图像以及Tamura系数在波长不稳定性校正过程中的变化规律,如图4所示.根据Tamura系数与传输距离的关系曲线,确定最大峰值位置,即图像最清晰位置,根据在衍射公式中波长与轴向距离功

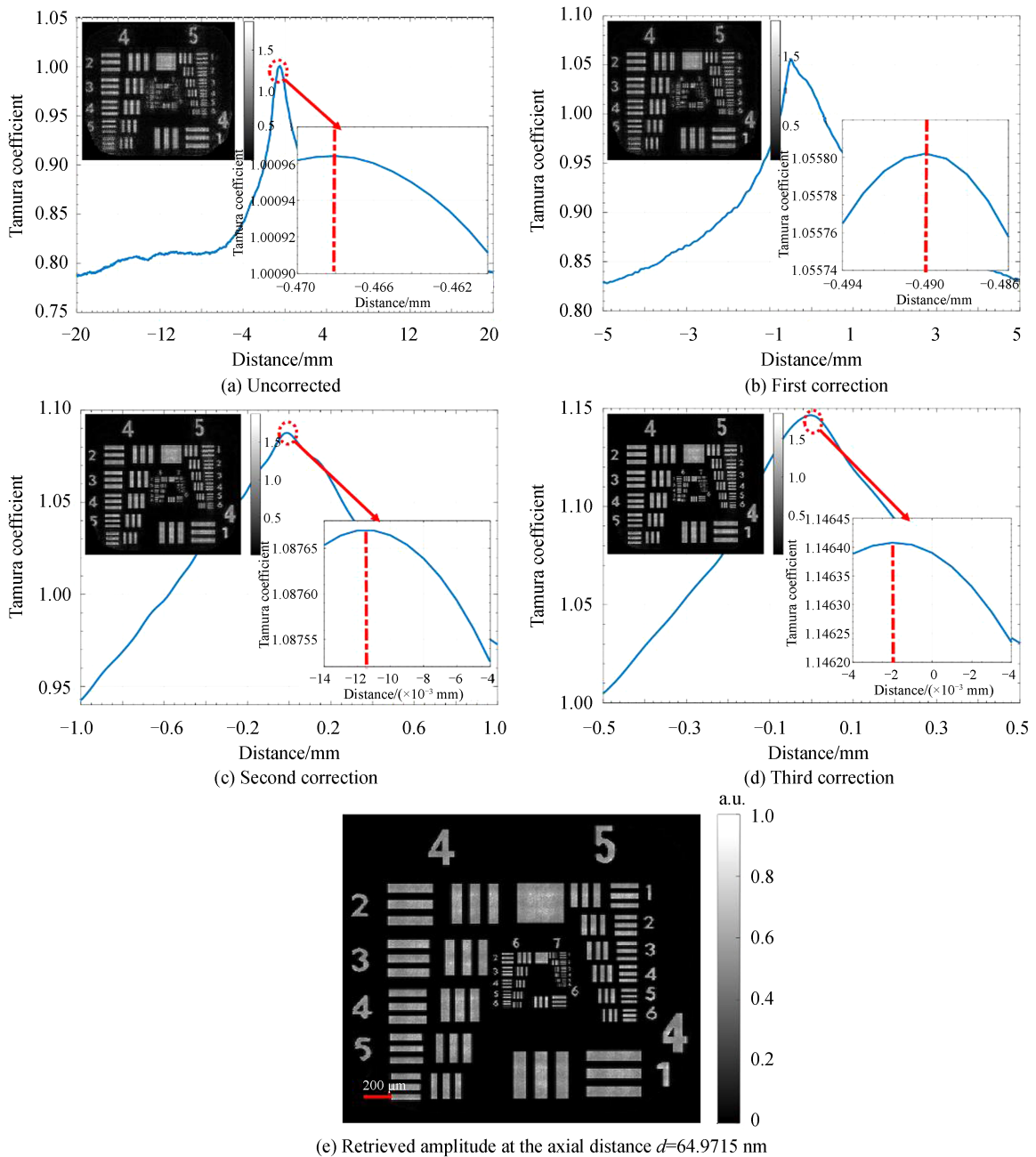


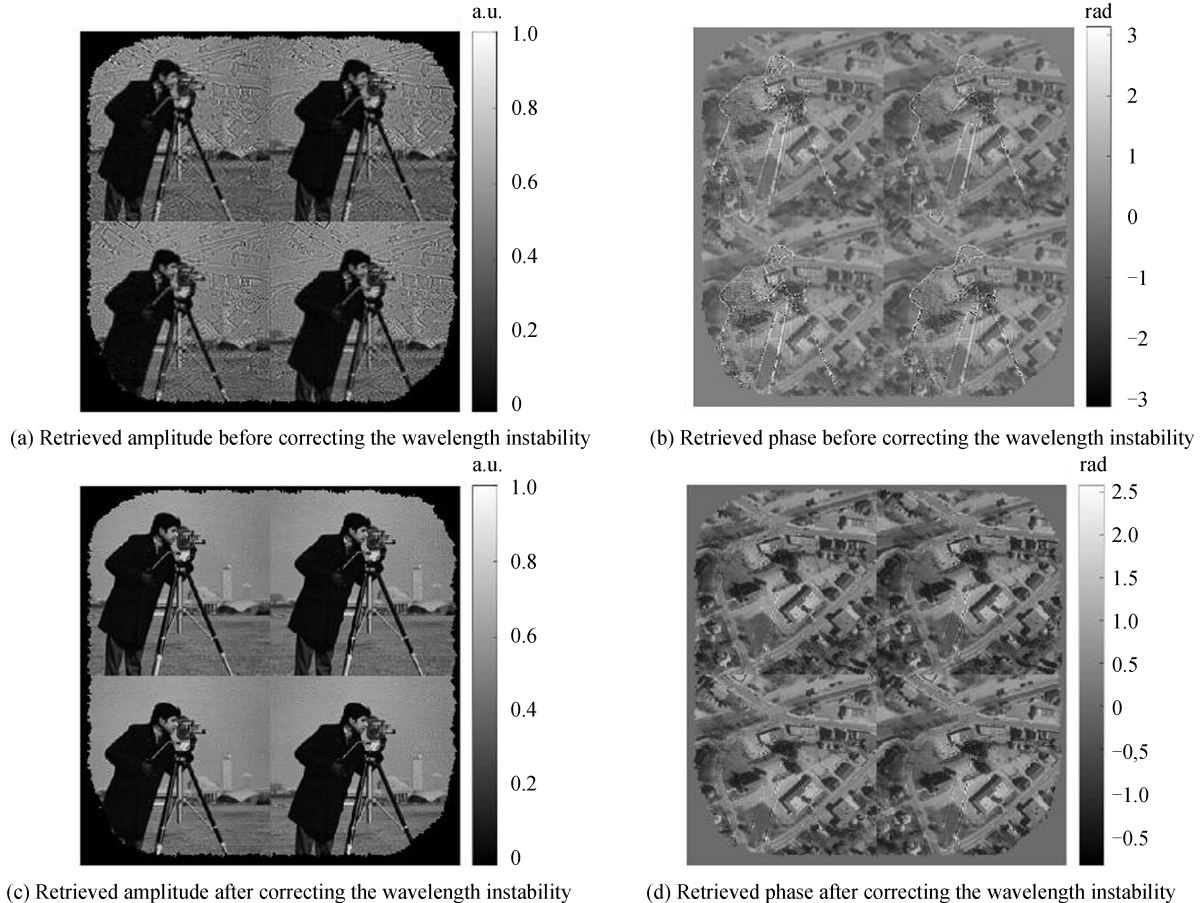
图4 波长不稳定性校正过程

Fig.4 Correction process for the wavelength instability

效等效的原理,此图像最清晰位置对应的轴向距离可用于校正波长不稳定性.图4(a)描述了在已知工作波长 $\lambda=632.8$ nm、轴向距离 $d=64$ mm以及200次迭代的重建结果以及基于此重建结果计算的Tamura系数,传输范围为 $-20\sim 20$ mm,传输步进 Δd 为0.001 mm,由于存在10 nm的波长偏差,重建结果中线对较模糊,分辨率较低;确定Tamura系数曲线最大峰值位置,即在 -0.468 nm位置,同时可得新一轮的轴向距离为 $d=64.468$ nm.将图4(a)中复原的物函数和照明光场函数、工作波长 $\lambda=632.8$ nm以及轴向距离 $d=64.468$ mm继续代入到迭代算法中,迭代50次后结果如图4(b)所示,从图中可看出线对清晰度较图4(a)有所提高;同时,将传输范围调整为 $-5\sim 5$ mm,步进量保持不变,根据Tamura系数曲线峰值确定的传输位置为 -0.49 mm,可得新一轮的轴向距离 $d=64.958$ nm.然后,将图4(b)中复原的物函数和照明光场函数、工作波长 $\lambda=632.8$ nm以及轴向距离 $d=64.958$ mm继续代入到迭代算法中,迭代50次后结果如图4(c)所示,从图中可看出线对清晰度较图4(b)有所提高;同时,将传输范围调整为 $-1\sim 1$ mm,步进量保持不变,根据Tamura系数曲线峰值

确定的传输位置为 -0.0115 mm ,可得新一轮的轴向距离 $d=64.9695\text{ nm}$.接着,将图4(c)中复原的物函数和照明光场函数、工作波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 以及轴向距离 $d=64.9695\text{ mm}$ 继续代入到迭代算法中,迭代50次后结果如图4(d)所示,从图中可看出线对清晰度较图4(c)略有所提高,但相对图4(a)线对清晰度和分辨率大幅提升;同时,将传输范围调整为 $-0.5\sim 0.5\text{ mm}$,步进量保持不变,根据 Tamura 系数曲线峰值确定的传输位置为 -0.002 mm ,可得新一轮的轴向距离为 $d=64.9715\text{ nm}$,本次确定的轴向距离与上次轴向距离偏差很小,可确定轴向距离 $d=64.9715\text{ nm}$ 已达到修复波长不稳定性的条件,可将该轴向距离继续代入到迭代算法中,迭代100次之后的结果如图4(e)所示.图4(e)中的经校正波长不稳定性之后线对相对未校正波长不稳定性的4(a)中的清晰度和分辨率大幅提升,且图4(e)中的结果与理想情况下的复原结果非常接近,这一结论验证了本文提出波长不稳定性校正方法的可行性和可靠性.

上述仿真证明了本文所提方法可校正已知波长与实际波长不一致时产生的弥散性像差,为验证本文所提方法可校正波长不稳定性,即扫描过程中存在多次波长漂移,本文选取细节丰富的图片“cameraman”和“westconcordorthophoto”作为待测物的振幅和相位,振幅的范围是 $0\sim 1$,相位的范围是 $-\pi\sim \pi$.为模拟波长漂移现象,本文在每次扫描时在波长 λ 上附加随机分布的波长漂移量 $\Delta\lambda$, $\Delta\lambda$ 在 $[-2\text{ nm}, 2\text{ nm}]$ 随机分布.由于每次扫描时波长均发生变化,需将每个扫描位置重建的物函数部分挑选出来,即 $O_{n+1}(x, y, R_j)$,其中 R_j 表示第 j 次扫描位置范围, $j=1, 2, 3\cdots$,并将 $O_{n+1}(x, y, R_j)$ 带入到算法 Step 7 及后续步骤中来计算每个扫描位置对应的可修正波长不稳定性的轴向距离.图5给出了波长稳定性校正之前和校正之后的结果,图5(a)和5(b)指出当存在波长不稳定性时会严重降低重建精度.相比5(a)和5(b),图5(c)和5(d)是经多个阶段校正后的重建结果,重建结果具有更清晰、更丰富的细节信息.图5(e)给出了每个扫描位置处的初始输入波长、实际波长以及校正波长的值,可发现校正后的波长与实际波长基本吻合,其中最大波长偏差为 0.21 nm .以上结论表明,本文所提方法可用于校正波长不稳定性,抑制波长不稳定性对重建结果的影响.



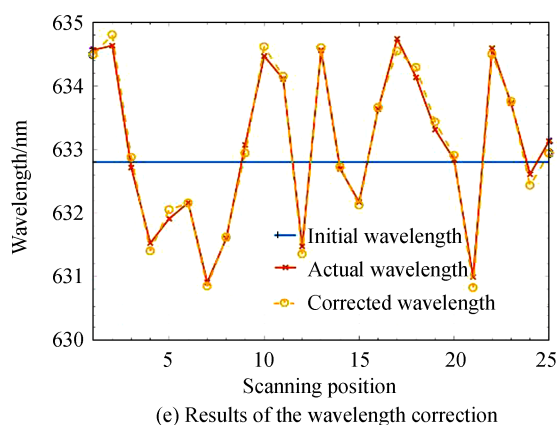


图5 ± 2 nm 波长不稳定性校正结果比较
Fig.5 Compare results of ± 2 nm wavelength instability

3 实验验证

为进一步验证本文所提方法的可行性,搭建了叠层成像实验系统,光路结构如图6所示.为模拟波长不稳定性,本文选择波长可调谐激光器(Photon etc, TLS-VIS),其真实工作波长为643 nm,参与衍射运算的波长为633 nm.可调谐激光器发出的光束经扩束准直后成平面波,再依次通过可变的小孔光阑产生探针,探针传输到达样品表面,并与样品作用后传输到CCD上.CCD(Imaging Source, DMK 23G274)具有 1600×1200 个像素,像素尺寸是 $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$,其动态范围为8-bit. X-Y方向的扫描平台是选用Thorlabs MTS50-Z8,在本实验中的扫描步长是0.2 mm,孔径光阑的直径是1 mm.光阑、物体和CCD之间的距离分别为10.8 mm和74 mm.待测物体与CCD之间的距离参与叠层成像迭代算法,若代入的距离与实际距离有偏差,将会在重建图像中引入弥散性像差、降低成像精度.为确保本文中的距离参数的准确性,将CCD放置在直线导轨上(Thorlabs, KMTS25E),用于调整距离;当CCD位置固定时,利用我们前期提出的轴向距离误差校正方法^[18-19],可精确确定待测物体和CCD之间的距离;然后,可通过调整直线导轨精确获取想要的任何距离.图7(a)和7(b)是工作波长 $\lambda=633$ nm、轴向距离 $d=74$ mm的重建结果,从图中可知重构的物体很模糊,说明存在波长不稳定性.图7(c)和7(d)是经多个阶段校正后的复原结果,与7(a)

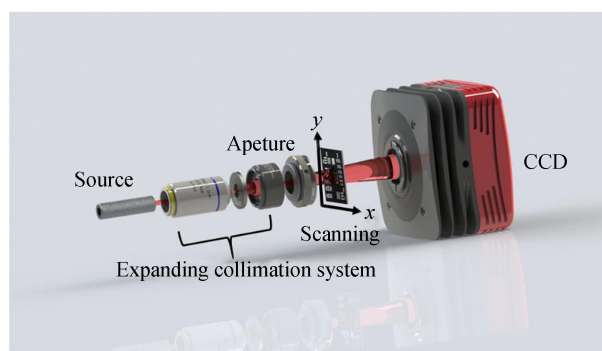
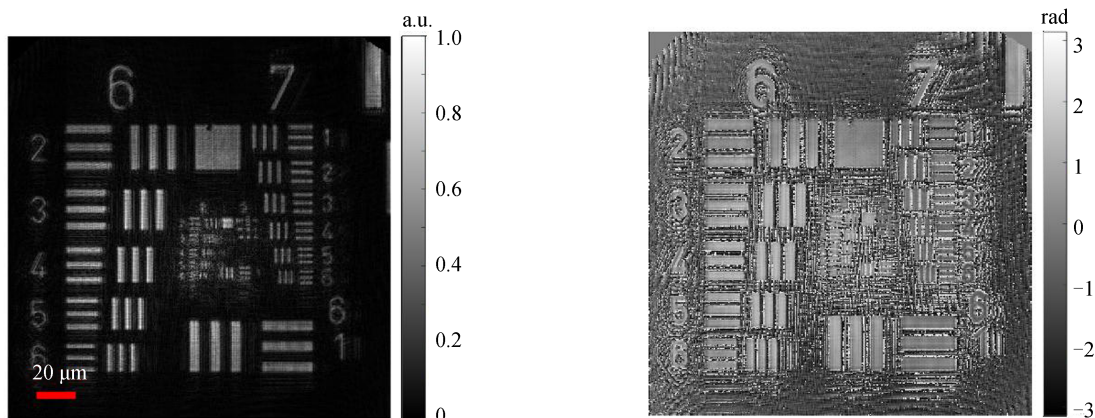


图6 叠层成像系统光路
Fig.6 Light path of ptychography



(a) Retrieved amplitude before correcting the wavelength instability (b) Retrieved phase before correcting the wavelength instability

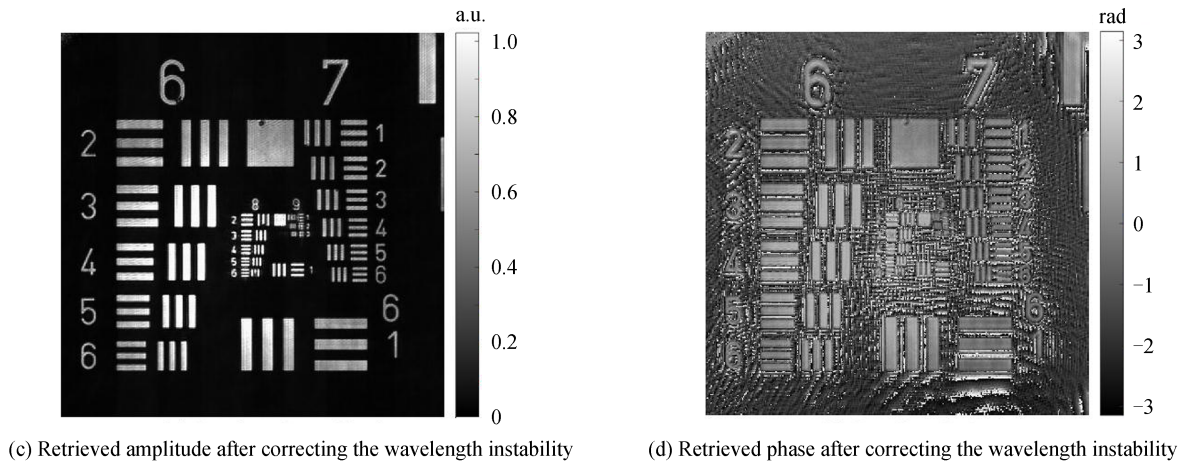


图7 实验结果

Fig.7 Experimental results

和7(b)相比,复原物具有更清晰的边缘轮廓信息.实验结果表明,本文所提方法可用于校正波长不稳定性,抑制波长不稳定性对复原结果的影响.

4 结论

工作波长的数值参与叠层成像中每一次的衍射传输计算,若存在波长不稳定性时,则会使重建图像模糊并降低图像的分辨率.为校正波长不稳定性,本文提出了一种分段校正波长不稳定性的方法,该方法将迭代过程分为不同阶段,在每个阶段选用基于Tamura系数的自聚焦方法确定每个阶段的轴向距离,并通过调整轴向距离来校正波长不稳定性.然后,将新的轴向距离代入下一个阶段的迭代计算,循环直至相邻两次计算的轴向距离之差满足终止条件时,并保持最后一轮的轴向距离继续代入迭代计算,满足迭代收敛条件时即可校正波长不稳定性.本文通过仿真以及实验均证实了本文提出的方法可用于校正波长不稳定性.

参考文献

- [1] FIENU J. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(15): 2758-2769.
- [2] ALMORO P, PEDRINI G, OSTEN W. Complete wavefront reconstruction using sequential intensity measurements of a volume speckle field[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(34): 8596-8605.
- [3] BINAMIRA J, ALMORO P. Accelerated single-beam multiple-intensity reconstruction using unordered propagations[J]. *Optics Letters*, 2019, **44**(12): 3130-3133.
- [4] BAI Y, VETTEL S, PAN X, *et al.* Ptychographic microscopy via wavelength scanning[J]. *APL Photonics*, 2017, **2**(5): 056101.
- [5] DOU J, ZHANG T, WEI C, *et al.* Single-shot ptychographic iterative engine based on chromatic aberrations[J]. *Optics Communications*, 2019, **440**: 139-145.
- [6] RODENBURG J, FAULKNER H. A phase retrieval algorithm for shifting illumination [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(20): 4795-4797.
- [7] CLAUS D, PEDRINI G, OSTEN W. Iterative phase retrieval based on variable wavefront curvature[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(13): F134-F137.
- [8] PFEIFFER F. X-ray ptychography[J]. *Nature Photonics*, 2018, **12**(1): 9-17.
- [9] DU M, LOETGERING L, EIKEMA K, *et al.* Measuring laser beam quality, wavefronts, and lens aberrations using ptychography[J]. *Optics Express*, 2020, **28**(4): 5022-5034.
- [10] GUIZAR M, FIENUP J. Phase retrieval with transverse translation diversity: a nonlinear optimization approach [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7264-7278.
- [11] THIBAUT P, DIEROLF M, MENZEL A, *et al.* High-resolution scanning x-ray diffraction microscopy[J]. *Science*, 2008, **321**(5887): 379-382.
- [12] MAIDEN A, RODENBURG J. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging [J]. *Ultramicroscopy*, 2009, **109**: 1256-1262.
- [13] GUIZAR M, FIENUP J. Phase retrieval with transverse translation diversity: a nonlinear optimization approach [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7264-7278.

- [14] SHENFIELD A, RODENBURG J. Evolutionary determination of experimental parameters for ptychographical imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **109**(12): 124510.
- [15] MAIDEN A, HUMPHRY M, SARAHAN M, *et al.* An annealing algorithm to correct positioning errors in ptychography [J]. *Ultramicroscopy*, 2012, **120**: 64-72.
- [16] BECKERS M, SENKBEIL T, GORNIK T, *et al.* Drift correction in ptychographic diffractive imaging [J]. *Ultramicroscopy*, 2013, **126**: 44-47.
- [17] ZHANG F, PETERSON I, VILA J, *et al.* Translation position determination in ptychographic coherent diffraction imaging [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(11): 13592-13606.
- [18] DOU J, GAO Z, MA J, *et al.* Iterative autofocusing strategy for axial distance error correction in ptychography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, **98**: 56-61.
- [19] DOU Jian-tai, GAO Zhi-shan, MA Jun, *et al.* Correction of axial distance error in ptychography based on image information entropy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(16): 164203.
窦健泰, 高志山, 马骏, 等. 基于图像信息熵的 ptychography 轴向距离误差校正 [J]. *物理学报*, 2017, **66**(16): 164203.
- [20] THIBAUT P, MENZEL A. Reconstructing state mixtures from diffraction measurements [J]. *Nature*, 2013, **494** (7435): 68-71.
- [21] GODARD P, ALLAIN M, CHAMARD V, *et al.* Noise models for low counting rate coherent diffraction imaging [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(23): 25914-25934.
- [22] ZUO C, SUN J, CHEN Q. Adaptive step-size strategy for noise-robust Fourier ptychographic microscopy [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(18): 20724-20744.
- [23] MAIDEN A, HUMPHRY M, RODENBURG J M. Ptychographic transmission microscopy in three dimensions using a multi-slice approach [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, **29**(8): 1606-1614.
- [24] SUZUKI A, FURUTAKU S, SHIMOMURA K, *et al.* High-resolution multislice x-ray ptychography of extended thick objects [J]. *Physical Review Letters*, 2014, **112**(5): 053903.
- [25] WANG Dong, MA Ying-jun, LIU Quan, *et al.* Experimental study on multi-wavelength ptychographic imaging in visible light band [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(8): 084203.
王东, 马迎军, 刘泉, 等. 可见光域多波长叠层衍射成像的实验研究 [J]. *物理学报*, 2015, **64**(8): 084203.
- [26] MATSUSHIMA K, SHIMOBABA T. Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 19662-19673.
- [27] HUANG X, YAN H, HARDER R, *et al.* Optimization of overlap uniformness for ptychography [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(10): 12634-12644.