

可见光域多波长叠层衍射成像的实验研究

王东 马迎军 刘泉 史祎诗

Experimental study on multi-wavelength ptychographic imaging in visible light band

Wang Dong Ma Ying-Jun Liu Quan Shi Yi-Shi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 084203 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分块速度域改进迭代运动目标检测算法的红外弱小目标检测

[A block-based improved recursive moving-target-indication algorithm](#)

物理学报.2014, 63(7): 074208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074208>

基于数字全息及复用技术的全场偏振态测试方法

[Full-field detection of polarization state based on multiplexing digital holography](#)

物理学报.2013, 62(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224204>

单摄像机下基于眼动分析的行为识别

[Eye movement analysis for activity recognition based on one web camera](#)

物理学报.2013, 62(17): 174203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.174203>

联合谱域与深度域光谱相位显微方法

[Joint spectral and depth domain spectral domain phase microscopy](#)

物理学报.2013, 62(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164204>

用于大景深三维纳米分辨多分子追踪的衍射光学元件的设计制备和实验研究

[Design, fabrication, and experimental demonstration of a diffractive optical element with long depth of field for nanoscale three-dimensional multi-molecule tracking](#)

物理学报.2013, 62(15): 154206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154206>

可见光域多波长叠层衍射成像的实验研究*

王东¹⁾²⁾ 马迎军¹⁾²⁾ 刘泉¹⁾²⁾ 史祎诗^{2)3)†}

1)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(中国科学院信息工程研究所, 信息安全国家重点实验室, 北京 100093)

(2014年8月24日收到; 2014年11月17日收到修改稿)

运用模拟实验和光学实验研究了叠层衍射成像中波长数量和噪声对复原结果的影响. 模拟结果表明, 在多波长叠层衍射成像中, 复原质量随波长数量的增加而不断提高并最终达到一定极限. 光学实验以不同样品进行实验验证, 进一步研究了增加波长与随之引入噪声及系统复杂度间的制约关系. 研究发现, 并非波长越多成像效果越好, 而可能存在一个最优的成像条件. 利用所建实验装置, 在双波长照明条件下取得了相对最优的成像效果. 本结论对提高叠层衍射成像的质量具有现实意义.

关键词: 相干衍射, 多波长叠层成像, 迭代算法

PACS: 42.30.-d, 42.25.Fx, 42.30.Kq, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.64.084203

1 引言

叠层衍射成像是一种不需要透镜的成像技术, 通过交叠采集冗余的衍射图样信息, 能够很好地恢复样品的复振幅信息^[1,2], 在X射线、可见光域、电子显微等领域有重要应用^[3-6]. 叠层衍射成像具有非透镜成像技术(如全息)的共同优点, 即对相位敏感(通过算法恢复复振幅)、非接触成像且像质理论上可达到衍射极限^[7-9]. 相比于一般的全息技术, 叠层衍射成像不需要稳定的参考光束, 实验装置相对简单. 20世纪70年代, Hoppe^[10]提出相干衍射成像(CDI), 之后 Rodenburg 和 Faulkner^[11,12]对 CDI 改进提出叠层迭代(PIE)算法, 而 Maiden 和 Rodenburg^[13]在 PIE 基础上针对探针位置迭代更新提出改进型叠层迭代(ePIE)算法, 通过重建探针和样品的复振幅信息, 能够更好地复原图像. 目前国内外单波长叠层衍射成像的研究有一定发展,

而多种波长参与叠层衍射成像则鲜有报道. 近期, Claus 等^[14]利用双波长叠层衍射成像对物体表面形貌进行了探测. 与单波长叠层衍射成像相比, 多波长叠层衍射成像具有更好的抗噪能力、更快的算法收敛速度和更高的实用价值. 在成像过程中, 光波数量的增加也将提高成像系统的复杂度, 带来更多误差和噪声, 甚至可能降低成像质量. 针对这一问题, 本文通过计算机模拟实验对比了不同数量的波长下叠层衍射的成像效果, 并以光学实验验证了两种不同样品的实际成像效果. 模拟实验发现: 在多波长叠层衍射成像中, 复原质量随波长数量的增加而不断提高并最终达到一定极限; 而光学实验验证了模拟实验的结论, 两者实验结果符合得很好, 证明了多波长叠层衍射成像的优势. 同时实验发现: 实际的叠层衍射成像系统, 并非波长数越多成像效果越好, 在增加波长数量和随之引入的噪声及误差中应寻求平衡, 采用合适的波长数量进行成像, 以达到成像的最优化.

* 国家自然科学基金(批准号: 61350014, 61307018)、中国科学院优秀博士论文启动基金、中国科学院大学校长基金、中国科学院“科教结合”教育创新项目、王宽诚教育基金会和中国科学院光电研究院“雏鹰”计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sysopt@126.com

2 理论分析

2.1 叠层衍射成像的基本原理

叠层衍射成像能够复原物体的复振幅信息,同时做到无透镜成像,一定程度上摆脱了数值孔径的限制和透镜像差的干扰^[15].叠层衍射成像的基本做法是将透光小孔(探针)或者样品本身移动一定距离使入射光照射到样品的不同部位,并且每次照

射的部位有一定面积的交叠,通过构建重构算法,在交叠层衍射分布的约束下,求出样品该区域的完整解.与传统叠层衍射成像不同的是,多波长叠层衍射成像中进入孔径的光采用不同的波长,由此样品上同一位置探针扫描的部分存在多个波长下的衍射图样,迭代能够更快地收敛,复原效果更接近真实解.图1(a)为不同波长的照明光束进行叠层衍射成像的光路示意图.

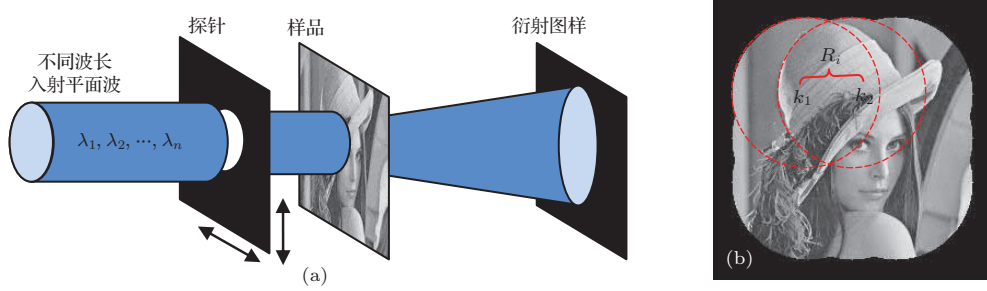


图1 (网刊彩色) (a) 叠层衍射成像的基本原理; (b) 孔径排列方式及重叠情况

Fig. 1. (color online) (a) Principle of ptychographic imaging; (b) arrangement and overlap state of the probes.

2.2 迭代算法及评价函数

多波长叠层衍射成像实验中使用的重建恢复算法为ePIE算法,扫描孔径定义为 k_1, k_2, \dots, k_m ,相邻小孔之间间隔为 R_i ,其排列方式如图1(b)所示.

本实验采用近场衍射, m 个孔径经过距离 d 的菲涅耳衍射至物平面,其复振幅分布作为扫描探针,记为 $P(r_i), i = 1, 2, \dots, m$.物面的透过率函数为 $O(r)$,扫描探针透过物面经过一段距离 D 的菲涅耳衍射,传到接收屏的光强分布记为 $I_i(k)$.重建过程如下.

步骤1 首先设物体的透过率函数为 $q_{n,j}(r)$,其中参数 n 为迭代次数, j 对应迭代时所用的波长 $\lambda_j, j = 1, 2, 3, \dots$,其中, $j = 1$ 时对应的 $q_{n,1}(r)$ 为猜测物体的透过率函数.所以,探针经过猜测物体后的出射场^[16]为

$$\psi_{n,i,j}(r, R_i) = q_{n,j}(r)P_n(r - R_i). \quad (1)$$

步骤2 出射场经过距离 D 的菲涅耳衍射,得到的复振幅分布为

$$\begin{aligned} \psi'_{n,i,j}(k) &= \text{ofrt}[\psi_{n,i,j}(r, R_i)] \\ &= A_{n,i} \exp[i\alpha_{n,i,j}(k)]. \end{aligned} \quad (2)$$

步骤3 应用已知的强度信息 $I_{i,j}(k)$ 替换其振幅,得到强度分布为

$$\psi'_{n,i,j}(k) = \sqrt{I_{i,j}(k)} \exp[i\alpha_{n,i,j}(k)]. \quad (3)$$

步骤4 对上面的场分布做逆菲涅耳变换,得到新的物面出射场

$$\psi_{\text{new}}(k) = \text{iofirt} \left\{ \sqrt{I_{i,j}(k)} \exp[i\alpha_{n,i,j}(k)] \right\}. \quad (4)$$

步骤5 更新猜测的物函数

$$q_{n+1,j}(r) = q_{n,j}(r) + u(r) (\psi_{\text{new}}(r) - \psi_{n,i,j}(r)), \quad (5)$$

$$u(r) = \frac{|P_{n,j}(r_i)|}{\max(|P_{n,j}(r_i)|)} \times \frac{P_{n,j}^*(r_i)}{(|P_{n,j}(r_i)|^2 + \gamma)}, \quad (6)$$

其中,参数 γ 用于防止分母为0,且可在一定程度上抑制噪声.当 γ 太大时,算法收敛较慢;当 γ 较小时,可加快算法收敛,但会引入较大的误差.经过一系列的模拟实验证明,在实验中取 $\gamma = 0.01$ 较为合适.

步骤6 更新探针^[13]

$$P_{n+1}(r_i) = P_n(r_i) + \frac{q_{n+1,j}^*(r)}{\max(|q_{n+1,j}(r)|^2)} \times (\psi_{\text{new}}(r) - \psi_{n,i,j}(r)). \quad (7)$$

以上公式中使用到的 *ofrt* 和 *iofrt* 分别定义为菲涅耳变换和逆菲涅耳变换.

实验中使用相关系数和均方差评价复原的质量 [17,18]. 相关系数值 C 在 $[0, 1]$ 之间, 当判定复振幅分布时, 要分别将其实部和虚部与原物体对比; 应用均方差评价时, MSE 的值越小, 表示复原的质量越好.

振幅相关系数 C_a 为

$$C_a = \text{cov}\{\text{Re}[O(r)], \text{Re}[q(r)]\}; \quad (8)$$

相位相关系数 C_φ 为

$$C_\varphi = \text{cov}\{\text{Im}[O(r)], \text{Im}[q(r)]\}; \quad (9)$$

均方差 MSE 为

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (O(r) - q(r))^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N O^2(r)}; \quad (10)$$

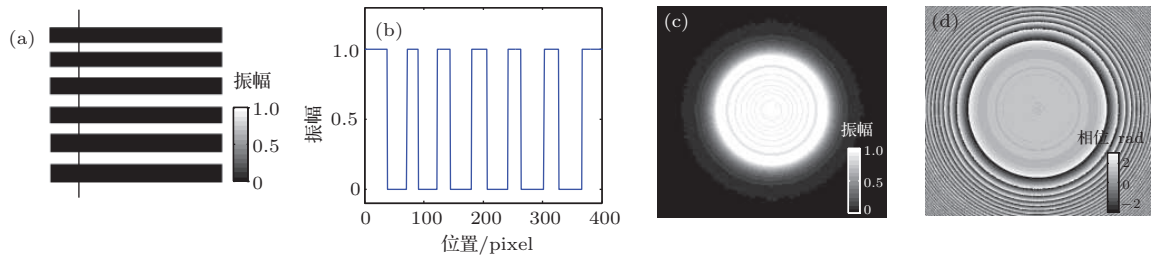


图2 (a) 样品原图; (b) 样品横截面曲线 (黑色竖线处); (c) 样品处探针振幅; (d) 样品处探针相位

Fig. 2. (a) Sample for simulations; (b) cross-section (indicated by black line in sample); (c) amplitude and (d) phase of the probe at the plane of the sample.

从图3可以看出, 叠层衍射成像的复原质量从单波长到四波长依次增强, 特别是单波长到双波长的过程复原质量有明显提高, 当波长数量增加到三波长后, 复原能力已达至一定极限, 提升效果不再明显. 由复原结果与原样品的相关系数和均方差能够更微观地分析复原效果的质量和收敛速度, 将复原效果与原样品进行比较, 分别得到相应的 MSE 值和 C 值, 其统计结果如图4和图5所示. 图4中相同迭代次数下, 波长数越多, 复原振幅的 MSE 值越低, C 值越高, 说明其复原效果随着波长数量的增加而提高; 同时 MSE 和 C 的初值理论上分别是 0 和 1, 由曲线初值到稳定过程的斜率可看出波长数越多, 收敛速度更快; 双波长较单波长 MSE 值和 C 值有明显改善, 而三波长和四波长相

其中 $q(r)$ 为重建后物体.

3 模拟实验与分析

3.1 不同波长复原效果对比

实验样品为图2(a)所示的纯振幅光栅, 图2(b)为其竖线处的横截面曲线, 衍射面上有效采样点数为 $1392 \text{ pixels} \times 1040 \text{ pixels}$, 照射光束取 632.8, 532, 473, 405 nm 四种波长, 探针直径为 378 pixels, 扫描方式为 3 行 3 列, 交叠率为 83%, 探针到样品的距离为 105 mm, 样品衍射距离为 101 mm. 图2(c)和图2(d)为 632.8 nm 光照射下探针到达样品面的复振幅. 实验过程中, 一次循环 9 处探针依次完成复原, 物函数的迭代次数随着波长数量增加而增加, 并有如下关系:

$$\text{迭代次数} = \text{循环次数} \times \text{波长数量}.$$

利用计算机模拟不同波长数下迭代 960 次的叠层衍射成像, 复原效果如图3所示.

应曲线几乎重合, 进一步说明此时复原能力十分相近且接近极限. 图5中由相位的 MSE 值和 C 值可以看出, 部分波长数下的复原相位还没有完全收敛, 在曲线最初分布有稍许波动和跳跃, 这是因为 MSE 值和 C 值是对整张图片计算的, 而相位本身在背景环境下的辨识度不高, 因此接近于 0 的暗背景在小范围的随机分布会对曲线造成一定的影响, 即相位曲线变化更加敏感. 但从曲线的斜率变化可以看到收敛速度随着波长数量的增多而增大, 而从图3(b1)—(b4)也能直观地观察到复原结果的提升. 表1和表2列出了图4和图5中黑色竖线处的取值, 即一定迭代次数下不同波长复原的振幅和相位的均方差值和相关系数.

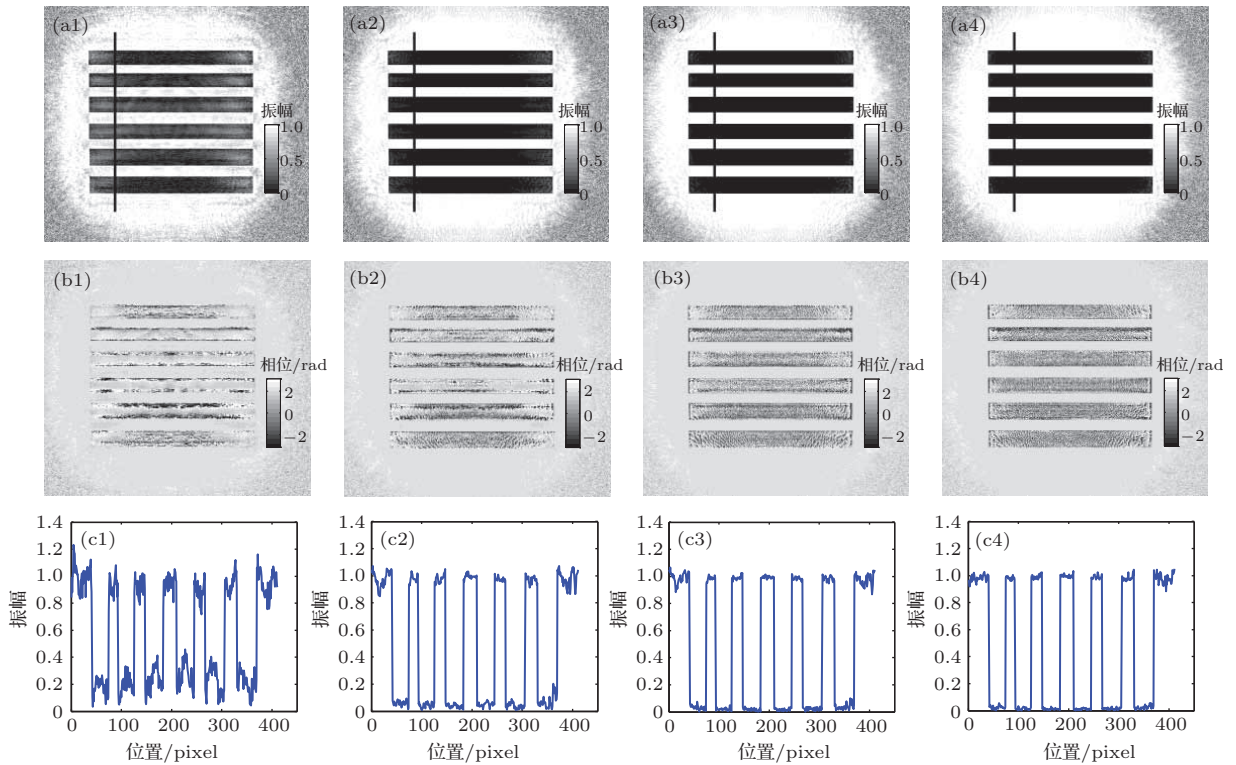


图3 迭代960次复原结果 (a1)—(a4)依次为单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (b1)—(b4)为四种波长数量下对应复原的相位; (c1)—(c4)为(a1)—(a4)振幅中黑色竖线处对应的横截面曲线

Fig. 3. Reconstructions after 960 iterations. (a1)–(a4) Amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method, tri-wavelength method and four-wavelength method; (b1)–(b4) reconstructed phases corresponding to (a1)–(a4); (c1)–(c4) corresponding cross-sections, location indicated by the black line in panels (a1)–(a4).

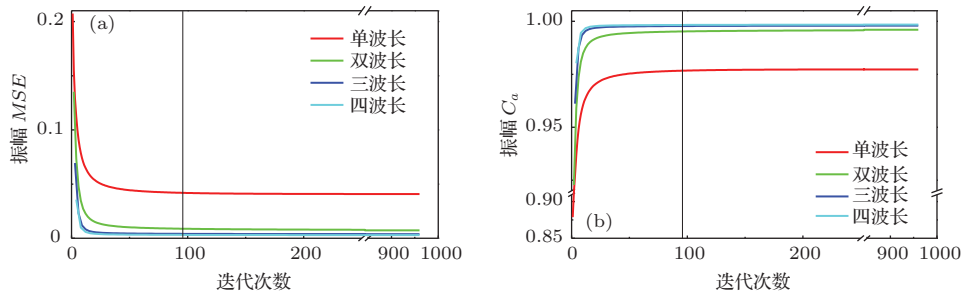


图4 (网刊彩色)不同波长下复原振幅随迭代次数的变化 (a) 均方差 MSE ; (b) 相关系数 C_a

Fig. 4. (color online) Relationship between the reconstructed amplitude and the iteration under different number of wavelengths: (a) mean squared error MSE ; (b) correlation coefficient C_a .

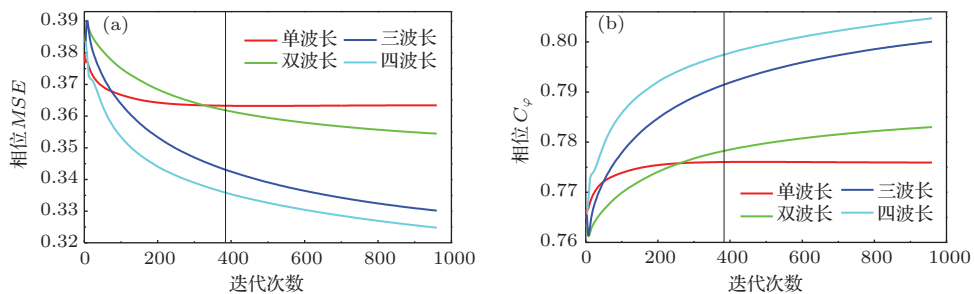


图5 (网刊彩色)不同波长下复原相位随迭代次数的变化 (a) 均方差 MSE ; (b) 相应系数 C_ϕ

Fig. 5. (color online) Relationship between the reconstructed phase and the iteration under different number of wavelengths: (a) mean squared error MSE ; (b) correlation coefficient C_ϕ .

表1 迭代96次时不同波长下复原振幅的相关系数和均方差

Table 1. MSE and C_a values of reconstructed amplitude under different number of wavelengths after 96 iterations.

| | 单波长 | 双波长 | 三波长 | 四波长 |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 均方差 MSE | 0.04191 | 0.00880 | 0.00408 | 0.00311 |
| 相关系数 C_a | 0.97670 | 0.99522 | 0.99778 | 0.99830 |

表2 迭代384次时不同波长下复原相位的相关系数和均方差

Table 2. MSE and C_φ values of reconstructed phase under different number of wavelengths after 384 iterations.

| | 单波长 | 双波长 | 三波长 | 四波长 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| 均方差 MSE | 0.37109 | 0.35752 | 0.34901 | 0.35496 |
| 相关系数 C_φ | 0.77214 | 0.78195 | 0.78918 | 0.78609 |

3.2 噪声对复原效果的影响

多波长叠层衍射成像拥有较强的抗噪声能力, 通过实验分析噪声对复原质量的影响. 结合实际情况, 在上述模拟实验条件基础上, 向衍射过程中加入4%的均匀分布噪声(该程度的噪声既不影响样品整体的辨识效果, 又能较好地观测成像的抗噪声能力), 比较同等程度噪声下, 相同迭代次数时不同波长数的复原效果, 结果如图6所示. 为了量化噪声对不同波长数下成像恢复质量的影响, 计算了四种情况下振幅和相位的均方差和相关系数, 如图7和图8所示.

从图6可看到, 增加波长数, 抗噪能力明显提高, 光栅两侧边缘信息复原更加完整; 图7所示结果表明在迭代充分的情况下, 单波长到四波长的抗噪能力依次增强, 复原图像的振幅质量逐步提高;

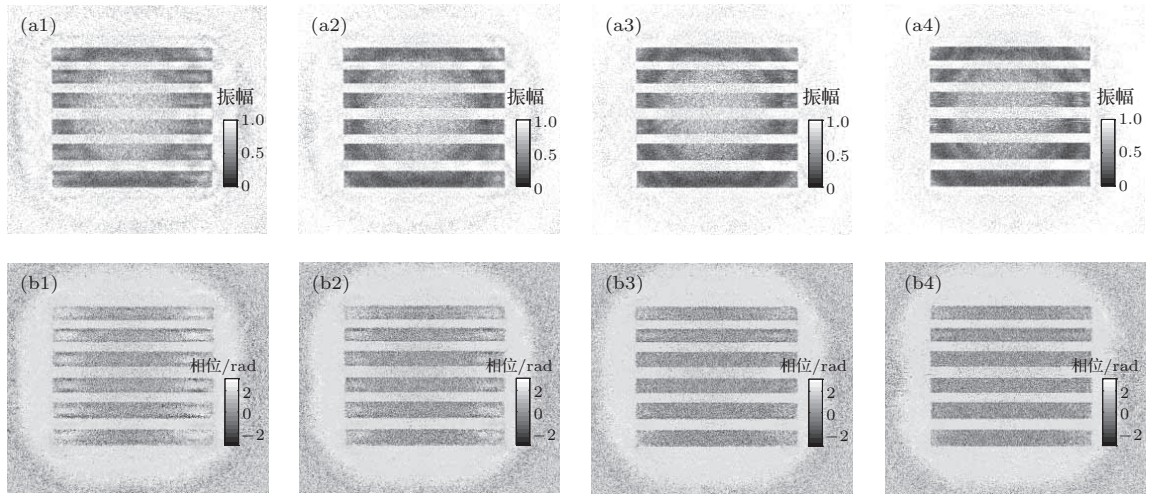


图6 同等程度噪声下迭代960次的复原结果 (a1)—(a4) 依次为单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (b1)—(b4) 为四种波长数量下对应复原的相位

Fig. 6. Reconstructions with the same noise after 960 iterations. (a1)—(a4) The reconstructed amplitudes and (b1)—(b4) the reconstructed phases via single-wavelength method, dual-wavelength method, tri-wavelength method and four-wavelength method.

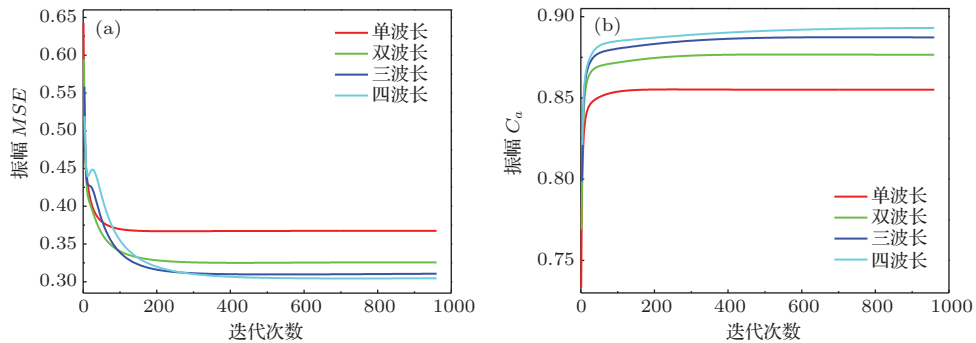


图7 (网刊彩色) 同等程度噪声下复原振幅随迭代次数的变化 (a) 均方差 MSE ; (b) 相应系数 C_a

Fig. 7. (color online) Relationship between the reconstructed amplitude and the iteration via different number of wavelengths method under the same noise: (a) mean squared error MSE ; (b) correlation coefficient C_a .

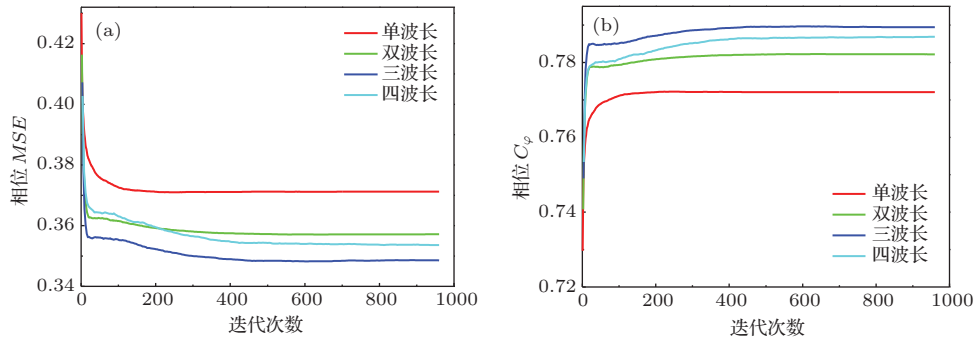


图8 (网刊彩色) 同等程度噪声下复原相位随迭代次数的变化 (a) 均方差 MSE ; (b) 相应系数 C_ϕ

Fig. 8. (color online) Relationship between the reconstructed phase and the iteration via different number of wavelengths within the same noise: (a) mean squared error MSE ; (b) correlation coefficient C_ϕ .

图8所示结果表明从单波长增至三波长时, 复原相位质量逐步提高, 但增至四波长时, 复原相位的质量却有一定程度的下降. 这是因为成像过程中, 随着波长数量的增加, 参与衍射的噪声更多, 在一定程度上影响了多波长的复原效果.

从图4、图5、图7、图8可以看到: 无论成像过程中是否有噪声存在, 当单波长增至双波长时, 复原结果的相关系数和均方差均有很大程度的改善, 复原质量明显提高; 而从双波长逐步增至四波长的过程中, 相关系数和均方差曲线变化并不十分明显, 复原结果的质量提升效果不大. 故该参数下的模拟实验, 波长数为双波长或三波长即可满足成像要求.

由叠层衍射成像的过程可知: 噪声情况下, 每增加一个波长参与成像, 就会多引入一定量的噪声. 同时从迭代算法上可知, 波长数增多约束条件增加, 复原效果应该越好. 所以评价不同波长数条件的抗噪能力, 应从实际应用考虑, 在上述两种因素同时介入的情况下, 直接以噪声对复原效果的影

响程度作为抗噪能力的评价指标. 由此可看出: 波长数增多时, 抗噪能力确实是增强的, 而波长数达到三波长、四波长后, 复原效果相差不大, 甚至略有下降, 这是因为一方面受叠层衍射成像函数功能的限制, 抗噪能力已基本达到极限; 另一方面, 随着波长数的增加, 复原过程的噪声越多, 对复原效果影响越大, 而这一点在光学实验时也可进一步证实, 随着波长数的增加, 光学成像系统的复杂度也提高, 随之带来的噪声和误差更多, 因此叠层成像的波长数量不宜太多.

4 实验与分析

4.1 实验装置

鉴于模拟实验的结果, 我们搭建了可一次性实现单波长、双波长、三波长的光学叠层衍射成像系统, 实验装置如图9所示. 采用红光 (632.8 nm)、绿光 (532 nm) 和蓝光 (473 nm) 三种波长, 其中红光来自氦氖激光器, 绿光和蓝光来自半导体激光器.

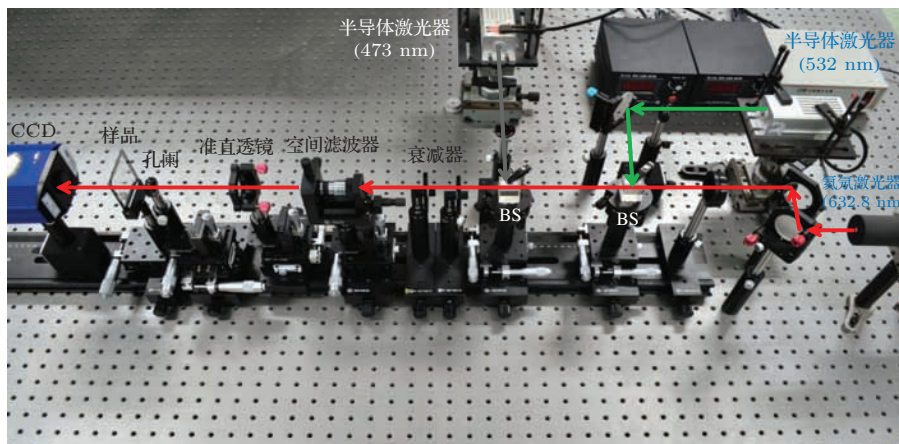


图9 (网刊彩色) 多波长叠层衍射成像实验装置图

Fig. 9. (color online) Optical setup of multi-wavelength ptychography.

三束激光依次通过反射镜和宽带分光棱镜(BS)进行合束,再通过空间滤波器和凸透镜进行扩束和准直.针对不同入射光波,考虑到透镜色差的问题,准直系统将通过一定量的计算位移以消除色差,使每一束光都是单色平面波.利用接近圆形的正十边型光阑作为探针,通过精密机械平移台实现探针扫描,对样品的不同部分进行衍射成像,接收衍射图样所使用的电荷耦合器件(CCD)为Coolsnap EZ型,单像素尺寸为 $6.45\ \mu\text{m}$,窗口大小为 $1392\ \text{pixels} \times 1040\ \text{pixels}$.实验中样品分别采用分辨率板上的光栅和植物茎横切组织.

4.2 复原结果与分析

4.2.1 光栅复原效果与分析

探针直径为 $3.1\ \text{mm}$,移动 3×3 共9个位置,每次移动距离为 $0.5\ \text{mm}$,交叠率为84%.探针与样品相距 $105\ \text{mm}$,样品衍射距离为 $101\ \text{mm}$.依次通过

$632.8, 532$ 和 $473\ \text{nm}$ 三种光进行衍射成像.通过迭代算法复原出相同迭代次数下单波长($632.8\ \text{nm}$)、双波长(632.8 和 $532\ \text{nm}$)和三波长($632.8, 532$ 和 $473\ \text{nm}$)叠层衍射成像的恢复结果,如图10所示.其中图10(a3)和图10(b3)中的内插图分别为 $632.8\ \text{nm}$ 光波下探针到达样品平面的衍射图像.

从直观上看,单波长、双波长和三波长的复原结果依次增强,特别是从单波长到双波长时复原质量提升较大;在单波长、双波长复原振幅中心位置隐约存在一些干扰条纹,但三波长复原效果中这些条纹消失,这可以说明三波长的抗噪能力更强.

从实验结果中看到,双波长到三波长的复原结果提升并不大,这与模拟实验所得结论一致.主要原因是多加入一个波长引入了更多的噪声和误差(包括迭代复原时不同波长下样品衍射图样间的对应误差和样品衍射图样与孔径的对应误差),从而对实验结果造成了一定的影响.

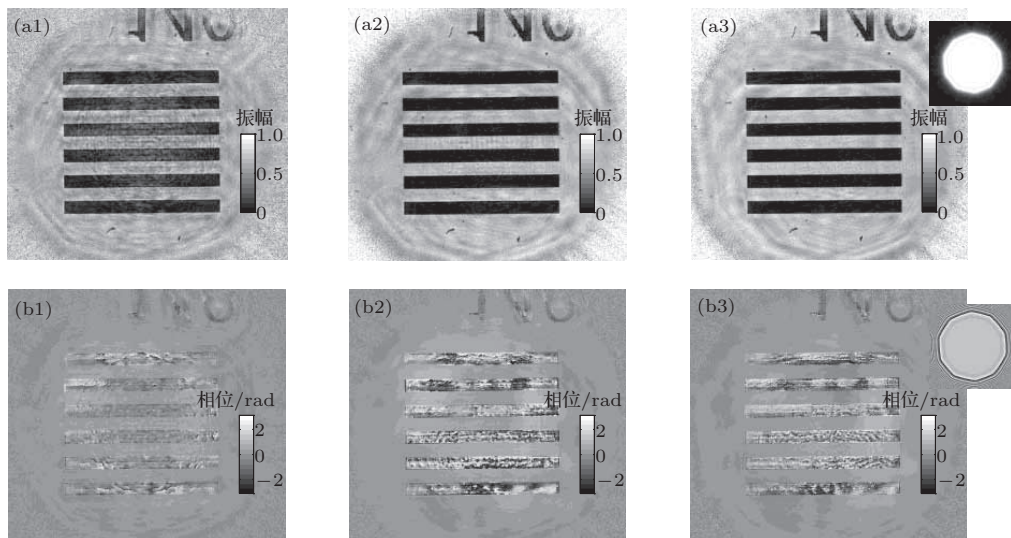


图10 迭代240次复原结果 (a1)—(a3)为单波长、双波长和三波长复原的振幅;(b1)—(b3)为单波长、双波长和三波长复原的相位(内插图为探针的复振幅)

Fig. 10. Reconstructions after 240 iterations. (a1)—(a3) The reconstructed amplitudes and (b1)—(b3) the reconstructed phases via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method (the insets illustrate the probe complex amplitude).

4.2.2 植物茎横切组织复原效果与分析

分辨率板属于纯振幅样品,复原的相位信息不能真实反映叠层衍射成像技术的水平,下面采用植物茎横切组织样品,该样品能够在振幅和相位上真实反映叠层衍射成像的复原效果.探针直径为 $3.88\ \text{mm}$,移动 3×3 共9个位置,每次移动距离为 $0.5\ \text{mm}$,交叠率为87%.探针与样品像距为 $28\ \text{mm}$,

样品衍射距离为 $100\ \text{mm}$.将获得的衍射图像进行相同次数的迭代,复原结果如图11所示.

从图11观察到,单波长、双波长、三波长的复原效果依次增强.两种样品的实验结果证明了此多波长叠层衍射成像实验系统的可靠性.双波长的复原效果较单波长有明显提高,三波长较双波长复原效果提升并不明显.

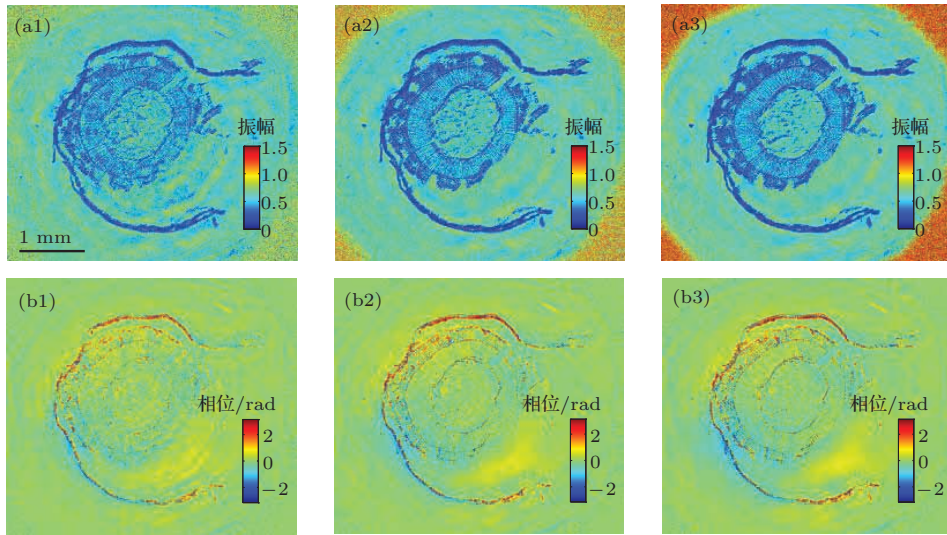


图 11 (网刊彩色) 迭代 300 次复原结果图 (a1)—(a3) 为单波长、双波长和三波长复原的振幅 (黑色标尺为 1 mm); (b1)—(b3) 为单波长、双波长和三波长复原的相位

Fig. 11. (color online) Reconstructions after 300 iterations. (a1)—(a3) The reconstructed amplitudes (black bar corresponds to 1 mm) and (b1)—(b3) the reconstructed phases via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method.

针对图 11 中噪声较多成像不理想的情况, 在迭代前对探测器采集的每幅衍射图像进行统计测量, 发现衍射图中主要噪声为均一噪声. 对此进行以下降噪处理: 通过 MATLAB 中 `imadjust` 函数对图像抑制噪声, 并对灰度分布进行调整以增强图像的对比度, 这样能够更好地观测和辨识样品形貌. 降噪后结果如图 12 所示: 相同迭代次数下, 双波长和三波长较单波长依然有很大的优势, 且效果明显好于降噪前, 同时双波长成像的质量与三波长十分接近, 甚至样品的部分细节比三波长更加完整、分

辨率更高 (见图 12 (a2) 和图 12 (a3) 样品中心的放大图). 这是因为降噪处理后, 三波长迭代复原的抗噪优势消失, 而相比双波长, 三波长的系统更加复杂, 在成像过程中会带来更大的误差.

图 13 (a) 为通过成像透镜直接成像后接收器上显示的样品图像, 图 13 (b) 为降噪后双波长迭代 300 次复原的振幅图像. 对比这两幅图像可以看到, 叠层衍射成像的结果细节信息更加丰富、分辨率更高, 成像效果优于成像透镜拍摄. 由此可见双波长叠层衍射成像的成像优势.

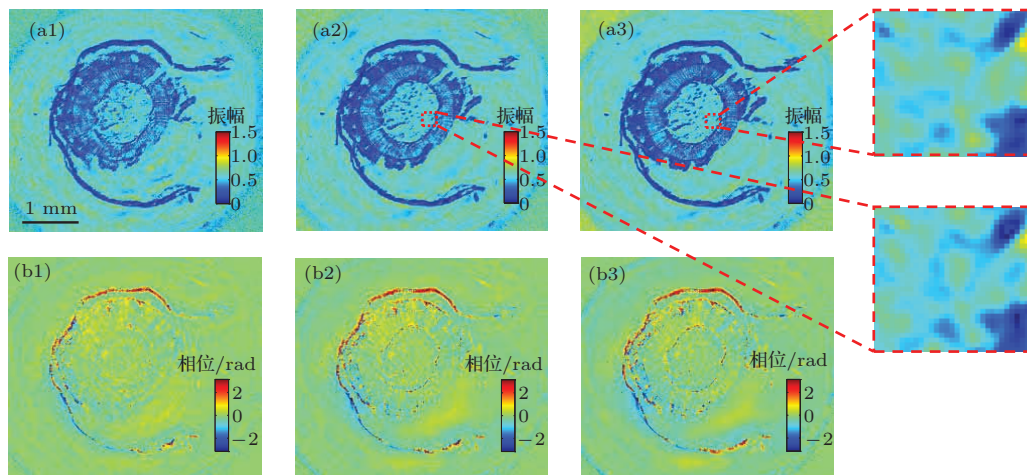


图 12 (网刊彩色) 降噪后迭代 300 次复原结果 (a1)—(a3) 依次为单波长、双波长和三波长复原的振幅; (b1)—(b3) 依次为单波长、双波长和三波长复原的相位

Fig. 12. (color online) Reconstructions after 300 iterations by depressing the noise. (a1)—(a3) The reconstructed amplitudes and (b1)—(b3) the reconstructed phases via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method.

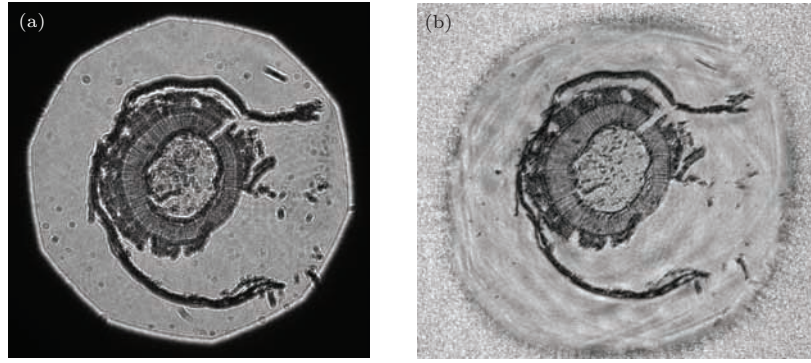


图 13 成像对比 (a) 待测样品 (成像透镜拍摄); (b) 双波长迭代 300 次复原振幅

Fig. 13. Comparison of results: (a) lens imaging result; (b) reconstructed amplitude of 300 iterations via dual-wavelength method.

图 14 为降噪前后双波长复原的样品振幅和相位的三维分布图, 图 14(c) 和图 14(d) 中内插图为 632.8 nm 光波下探针到样品平面的衍射复振幅. 对比四幅图, 发现通过该方法降噪处理, 抑制了成

像过程中的冗余信息, 降噪后复原样品的振幅信息中信噪比更高, 增加了样品的辨识度, 成像效果更好, 同时相位信息连续性增强, 更接近真实情况.

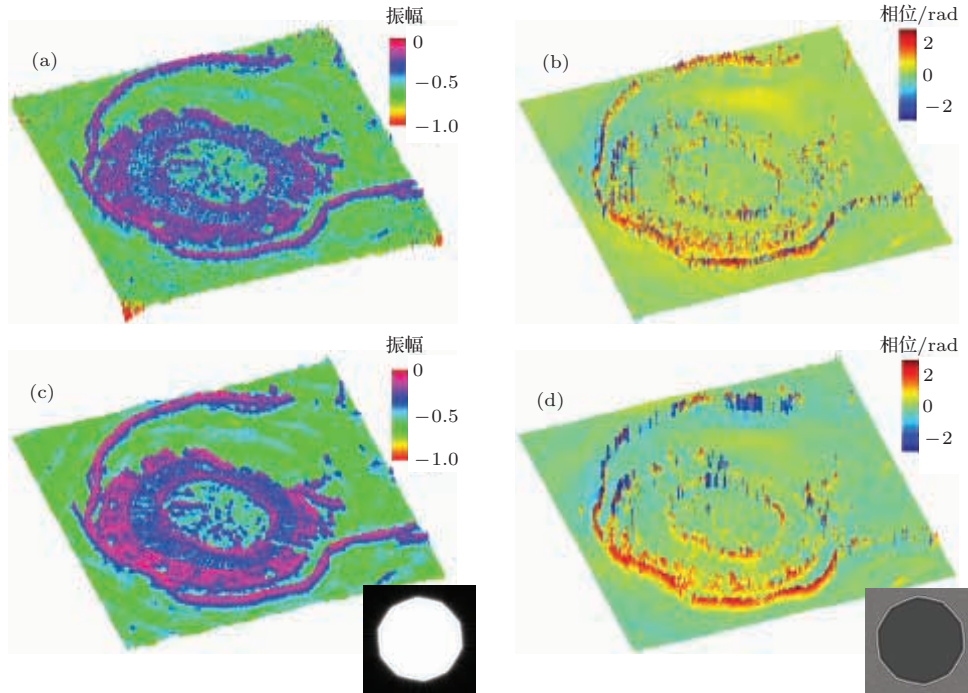


图 14 (网刊彩色) 复原结果对比 (a) 降噪前三维振幅分布图; (b) 降噪前三维相位分布图; (c) 降噪后三维振幅分布图; (d) 降噪后三维相位分布图 (内插图为探针的复振幅)

Fig. 14. (color online) Comparison of topography maps: (a) reconstructed amplitude and (b) reconstructed phase before noise depressed; (c) reconstructed amplitude and (d) reconstructed phase by depressing noise (the insets illustrate the probe complex amplitude).

5 结 论

本文利用多波长叠层衍射成像的迭代恢复算法, 系统地从模拟实验和光学实验论证并分析了叠层衍射成像中波长数量对复原质量的影响. 对两种

实验的复原结果比较和分析: 模拟实验和光学实验的结果在误差允许范围内符合得很好, 证明了实验成像装置的可靠性; 多波长相比于单波长在叠层衍射成像中抗噪能力更强、收敛速度更快、成像效果更好. 同时在光学实验中发现: 波长数量的增加和成像系统复杂度的提高, 都会给成像过程带来一定

程度的噪声和误差, 波长数量继续增加复原质量可能不会有明显改善甚至会有所下降, 而基于本文中的光学成像系统, 配合一定的降噪处理, 最佳成像方式为双波长叠层衍射成像. 因此对于叠层衍射成像系统, 从装置的成本和可靠性考虑, 成像波长数量并非越多越好, 在系统复杂度和多波长抗噪声能力的平衡中, 选择合适的成像方式更有实际意义.

参考文献

- [1] Thibault P, Dierolf M, Bunk O, Menzel A, Pfeiffer F 2009 *Ultramicroscopy* **109** 338
- [2] Rodenburg J M 2008 *Adv. Imag. Electron Phys.* **150** 87
- [3] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G 2007 *Ultramicroscopy* **107** 227
- [4] Humphry M J, Kraus B, Hurst A C, Maiden A M, Rodenburg J M 2012 *Nat. Commun.* **3** 1733
- [5] Shi Y S, Li T, Wang Y L, Gao Q K, Zhang S G, Li H S 2013 *Opt. Lett.* **38** 1425
- [6] Wang Z H, Wang Y L, Li T, Shi Y S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 164204 (in Chinese) [王治昊, 王雅丽, 李拓, 史祎诗 2014 物理学报 **63** 164204]
- [7] Maiden A M, Humphry M J, Zhang F, Rodenburg J M 2011 *J. Opt. Soc. Am. A* **28** 604
- [8] Gazit S, Szameit A, Eldar Y C, Segev M 2009 *Opt. Express* **17** 23920
- [9] Rodenburg J M 1989 *Ultramicroscopy* **27** 413
- [10] Hoppe W 1969 *Acta Cryst. A* **25** 495
- [11] Rodenburg J M, Faulkner H M L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4795
- [12] Faulkner H M L, Rodenburg J M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 023903
- [13] Maiden A M, Rodenburg J M 2009 *Ultramicroscopy* **109** 1256
- [14] Claus D, Robinson D J, Chetwynd D G, Shuo Y, Pike W T, José J D J, Rodenburg J M 2013 *J. Opt.* **15** 035702
- [15] Wang Y L, Shi Y S, Li T, Gao Q K, Xiao J, Zhang S G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064206 (in Chinese) [王雅丽, 史祎诗, 李拓, 高乾坤, 肖俊, 张三国 2013 物理学报 **62** 064206]
- [16] Pan X C, Liu C, Lin Q, Zhu J Q 2013 *Opt. Express* **21** 6162
- [17] Shi Y S, Situ G H, Zhang J J 2008 *Opt. Lett.* **33** 542
- [18] Gao Q K, Wang Y L, Li T, Shi Y S 2014 *Appl. Opt.* **53** 4700

Experimental study on multi-wavelength ptychographic imaging in visible light band*

Wang Dong¹⁾²⁾ Ma Ying-Jun¹⁾²⁾ Liu Quan¹⁾²⁾ Shi Yi-Shi^{2)3)†}

1) (*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*State Key Laboratory of Information Security, Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*)

(Received 24 August 2014; revised manuscript received 17 November 2014)

Abstract

We perform a series of computer simulations and optical experiments for multiple-wavelength ptychographic imaging to analyze the relationship between the imaging quality and the magnitude of wavelength. Two kinds of samples including the grating-like and the biological sample are tested. Our experimental results are highly consistent with simulations, demonstrating the feasibility and effectiveness of the multiple-wavelength ptychography. Compared with the single-wavelength ptychographic imaging, it can achieve very good imaging quality with a fast speed of iterative convergence and a high robustness to the noises in the case of multiple-wavelength ptychography. In addition, optical experiments also reveal that with the magnitude of wavelength increasing, the complexity of the ptychographic system is grown up within increased noises and errors, which causes the imaging quality to keep no enhancement or even to get worse. For our concrete configuration in this paper, with a simple digital procedure for noise depressing, the best results may be obtained for the case of dual-wavelength. Furthermore, it implies that there is an optimized condition for multiple-wavelength ptychography. We find that it requires mainly analyzing the balance between the multiple-wavelength-benefited noise-resistance and the systematic complexity for the optimized condition, which may be really important and meaningful for the practical utilizing of multiple-wavelength ptychography.

Keywords: coherent diffraction, multi-wavelength ptychography, iterative engine

PACS: 42.30.-d, 42.25.Fx, 42.30.Kq, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.64.084203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grand Nos. 61350014, 61307018), the Starting Foundation for Excellent Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Sciences, the President Foundation of University of Chinese Academy of Sciences, the Fusion Foundation of Research and Education of Chinese Academy of Sciences, the K. C. Wong Education Foundation, and the “Young Eagles” Program of Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: sysopt@126.com