

厚样品三维叠层衍射成像的实验研究

潘安 张晓菲 王彬 赵青 史祎诗

Experimental study on three-dimensional ptychography for thick sample

Pan An Zhang Xiao-Fei Wang Bin Zhao Qing Shi Yi-Shi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模型选择的模式波前重构算法研究

Zernike modal wavefront reconstruction algorithm based on model selection

物理学报.2015, 64(14): 144201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144201>

相干场成像四光束相位闭合算法研究

Four-phase closure algorithm for coherent field imaging

物理学报.2015, 64(5): 054204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054204>

基于经验模态分解的自混合干涉相位提取方法研究

Study on the phase-extracting method of self-mixing signal based on empirical mode decomposition

物理学报.2015, 64(5): 054203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054203>

基于旋转相位编码与照明光束匹配的叠层衍射成像算法研究

Ptychographical imaging algorithm based on illuminating beam matched with rotational phase encoding

物理学报.2014, 63(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164204>

多种图像采集策略下X射线折射信息的提取研究

Simulation of X-ray refraction information extraction using multiple image-collecting strategies

物理学报.2014, 63(10): 104206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104206>

厚样品三维叠层衍射成像的实验研究*

潘安¹⁾³⁾ 张晓菲²⁾³⁾ 王彬²⁾³⁾ 赵青¹⁾³⁾ 史祎诗^{3)4)†}

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

4)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

(2015年7月10日收到; 2015年9月30日收到修改稿)

叠层衍射成像是一种新兴的无透镜成像技术, 目前限制这项技术发展的是光束透过样品时的乘法近似假设, 这意味着在可见光域微米级分辨率下, 叠层衍射成像的样品厚度不能超过数十微米. 通过将样品沿轴多层切片的方式, 在模拟实验和光学实验中均实现了对毫米量级厚样品的三维叠层衍射成像. 模拟实验结果表明, 单波长并不能很好地恢复三维厚样品, 从而有必要引入多波长光束照明, 随着波长数量的增加, 三维厚样品的复原质量不断提高. 光学实验使用两组不同厚度的样品进行实验验证, 进一步研究了波长数量对复原结果的影响. 随着波长数量增加, 复原图像质量不断提高, 证明了模拟实验的结论. 利用所建光学实验装置, 在三波长照明条件下取得了最好的成像与分离效果. 同时针对实验中出现的叠影现象做出了合理的解释. 研究结果对提高厚样品三维叠层衍射成像的质量具有现实意义.

关键词: 厚样品, 三维叠层衍射成像, 迭代算法, 多波长

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

DOI: 10.7498/aps.65.014204

1 引言

叠层衍射成像(ptychography)是一种不需要透镜的成像技术, 通过记录交叠的衍射图样信息, 产生大量的信息冗余, 利用相应的迭代算法能够很好地恢复样品的复振幅信息^[1,2], 同时重建收敛速度快而且所恢复的像具有很高的信噪比, 现在已经在可见光、X射线、电子束频段等领域有重要应用^[3-8]. 1969年, Hoppe^[9,10]首先提出相干衍射成像(coherent diffraction imaging, CDI), 后经Fienup^[11]的改进而逐步发展起来. 之后Rodenburg和Faulkner^[12,13]对CDI进行改进提出叠层迭代算法(ptychographic iterative engine, PIE), 而Maiden和Rodenburg^[14]在PIE基础上针

对探针位置迭代更新提出改进型叠层迭代算法(extended ptychographic iterative engine, ePIE), 通过同时重建探针和样品的复振幅信息, 能够更好地恢复图像. 而目前限制这项技术发展的是光束透过样品时的乘法近似假设, 这意味着在可见光域微米级分辨率下, 叠层衍射成像的样品厚度不能超过数十微米^[15]. 近年Maiden等^[15,16]提出一种将三维厚样品进行多层切片的思想, 并提出了一种能够恢复三维厚样品信息的三维叠层迭代算法(three-dimensional extended ptychographic iterative engine, 3ePIE), 通过将每一层切片的复振幅信息恢复出来后进行三维重建, 从而恢复三维厚样品, 这种方法能够有效解决共聚焦显微镜、电子断层扫描及数字全息术所不能处理的多层散射厚样品, 从而具有更高的实用价值, 但同时相比于二维

* 国家自然科学基金(批准号: 61575197, 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

叠层衍射成像, 该方法的算法复杂度和实验难度也大大增加. 目前国外针对单波长的三维叠层衍射成像^[15,16]已有一定研究, 所采用的三维样品厚度仍然在微米量级, 而对于毫米量级厚样品的三维叠层衍射成像实验的研究还鲜有报道. 针对这一情形, 本文首先通过计算机进行模拟实验, 实验结果表明: 单波长并不能很好地恢复三维厚样品, 从而有必要引入多波长光束照明. 对于间距为毫米量级的两层切片和三层切片, 成功地分别对两组三维厚样品进行恢复, 同时分别研究了不同数量的波长对三维叠层衍射成像效果的影响, 并以光学实验验证了间距为毫米量级的两层切片和三层切片厚样品的实际成像效果. 两者实验结果符合得很好, 表明与单波长三维叠层衍射成像相比, 多波长三维叠层衍射成像具有更快的算法收敛速度和更好的图像质量. 同时实验中还发现, 层与层之间会有一定量的互相干扰, 本文针对这一情形也做出了合理的解释. 随着样品厚度的增加, 所需要的冗余信息增加, 势必导致图像质量的下降, 而多波长的引入能够有效弥补这一点. 本文研究了如何在增加波长数量和样品厚度间寻求平衡, 采用合适的波长数量和样品厚度进行三维叠层衍射成像, 以达到成像的最优化.

2 理论分析

2.1 三维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, 同时做到了无透镜成像, 一定程度上摆脱了数值孔径的限制和透镜像差的干扰^[17,18]. 对于厚度在微米级的二维物体而言, 通过将其视作为一层物体, 用光束照明物体的不同部分, 每次照明部分有一定的重叠, 记录每次得到的衍射斑图像, 通过ePIE^[14]对记录的多幅衍射图进行恢复, 从而得到待测物体的物函数.

与传统的二维叠层衍射成像不同的是, 三维叠层成像的基本思想是将待测的三维物体沿光传播方向分为多层^[15], 对每一层而言, 均可看作二维物体, 这样处理的好处是光通过每一层物体时, 仍然可以满足乘法近似假设. 需要特别指出的是, 每一层的厚度包括光在空气中传播的部分. 成像过程中, 光波通过探针照射在物体的第一层, 透过第一层衍射的出射光再作为探针, 照射到第二层物体

上; 以此类推, 直到光波从最后一层物面出射, 经过一定距离的菲涅耳衍射成像在探测器上; 移动探针, 用电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)记录不同探针位置的多幅衍射图. 恢复过程与衍射成像过程相反, 通过三维叠层成像的迭代算法, 多次迭代实现每一层物函数的恢复.

同时, 传统的三维叠层衍射成像采用单波长激光进行成像^[15,16], 这是由于其所采用的样品厚度仍然是微米量级. 实验发现, 单波长并不能很好地恢复毫米级的三维厚样品, 从而有必要引入多波长光束照明. 图1为不同波长的照明光束进行三维叠层衍射成像的光路示意图. 多波长三维叠层成像在单波长的基础上引入多个波长, 由此样品上被同一位置孔径扫描的部分都存在多个波长下的衍射图样, 这些衍射图样进行迭代复原后具有更快的收敛速度, 其成像质量也得到提高.

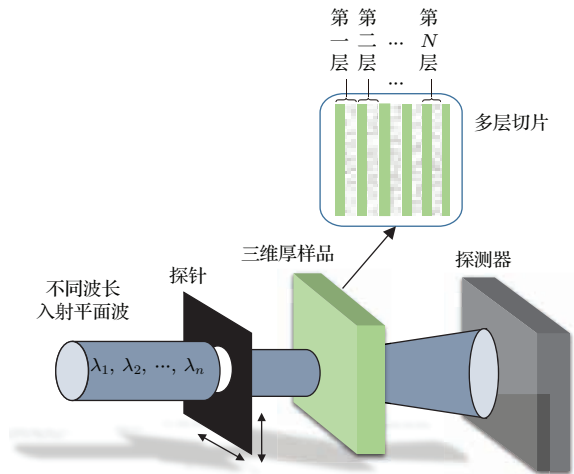


图1 (网刊彩色) 三维叠层衍射成像的基本原理

Fig. 1. (color online) Principle of three-dimensional ptychographic imaging.

2.2 迭代算法及评价函数

多波长三维叠层衍射成像实验中使用的重建恢复算法为3ePIE, 扫描孔径定义为 k_1, k_2, \dots, k_n , 相邻小孔之间间隔为 R_i , 其排列方式如图2所示.

本实验采用近场衍射, 物面的透过率函数为 $O_i(r)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 每一层物面与探针的距离为 z_i , n 个孔径经过距离 z_1 的菲涅耳衍射至第一层物平面, 其复振幅分布作为第一层的扫描探针, 记为 $P(r)$, 其后每层依次类推. 最后一层探针透过物面经过一定距离 D 的菲涅耳衍射, 传到接收屏的光强分布记为 $I_c(u)$, $c = 1, 2, \dots, n$. 重建的具体过程如下^[15].

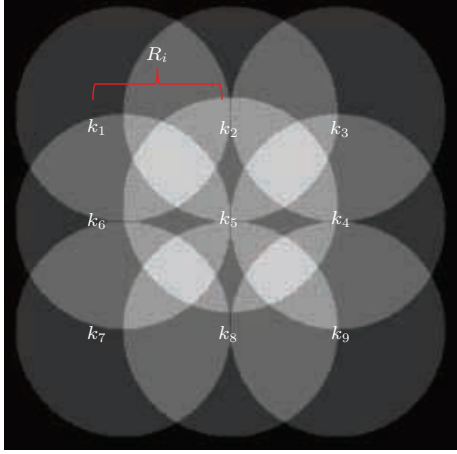


图2 孔径排列方式及重叠情况

Fig. 2. Arrangement and overlap state of the probes.

步骤1 将物体分层, 猜测物体各层的透过率函数 $O_1(r), O_2(r), \dots, O_N(r)$, 其中 N 为物体所分层数;

步骤2 入射光波通过探针 $P(r - R_c)$ 后首先经过物体的第一层, 其后的出射场为

$$\psi_{e,1}(r) = P(r - R_c) \cdot O_1(r); \quad (1)$$

步骤3 光波经过物体第一层后传播 $\Delta z_1 = z_2 - z_1$ 距离到达物体第二层

$$\psi_{i,2} = \mathcal{P}_{\Delta z_1}[\psi_{e,1}(r)], \quad (2)$$

其中 $\mathcal{P}_{\Delta z_1}$ 是距离 Δz_1 上的角谱传播;

步骤4 第一层的出射波传播到第二层 ($\psi_{i,2}$) 后作为新的入射波入射物体的第二层, 则第二层后的出射场为

$$\psi_{e,2}(r) = \psi_{i,2}(r) \cdot O_2(r); \quad (3)$$

步骤5 同理, 物体经过第 n 层的出射场为

$$\psi_{e,n}(r) = \psi_{i,n}(r) \cdot O_n(r), \quad (4)$$

其中

$$\psi_{i,n} = \mathcal{P}_{\Delta z_{n-1}}[\psi_{e,n-1}(r)],$$

$$\Delta z_{n-1} = z_n - z_{n-1};$$

步骤6 最后一层出射的光波经过一定距离 D 的衍射传播到接收面

$$\Psi_c(u) = ofrt[\psi_{e,N}(r)]; \quad (5)$$

步骤7 用实验所得的强度信息 $I_c(u)$ 更新其振幅, 得到新的强度分布

$$\Psi'_c(u) = \sqrt{I_c(u)} \frac{\Psi_c(u)}{|\Psi_c(u)|}; \quad (6)$$

步骤8 对更新后的场分布进行逆菲涅耳变换, 得到新的物面出射场

$$\psi'_{e,N} = iofrt[\Psi'_c(u)]; \quad (7)$$

步骤9 利用

$$\psi'_{i,N}(r) = U[\psi_{i,N}(r), O_N(r), \Delta\psi(r)], \quad (8)$$

$$O'_N(r) = U[O_N(r), \psi_{i,N}(r), \Delta\psi(r)] \quad (9)$$

更新每一层的出射场和物函数, 其中,

$$U[f(r), g(r), \Delta\psi(r)] = f(r) + \alpha \frac{g^*(r)}{|g(r)|_{\max}^2} \Delta\psi(r), \quad (10)$$

$$\Delta\psi(r) = \psi'_{e,N} - \psi_{e,N}(r), \quad (11)$$

α 是一个反馈参数, 一般取值范围为 $[0.9, 1]$, 在以下实验模拟中 α 均取 1;

步骤10 将更新后第 N 层的出射场作为入射场逆向传播, 第 N 层到第 $N-1$ 层可以看作距离为 $-\Delta z_{N-1}$ 的角谱传播

$$\psi'_{e,N-1}(r) = \mathcal{P}_{-\Delta z_{N-1}}[\psi'_{i,N}(r)]; \quad (12)$$

步骤11 对到达每一层的光场进行更新并继续逆向传播直到第 1 层, 更新第 1 层的物函数和探针有

$$O'_1(r) = U[O_1(r), P(r - R_c), \Delta\psi(r)], \quad (13)$$

$$P'(r - R_c) = U[P(r - R_c), O_1(r), \Delta\psi(r)], \quad (14)$$

则对应每一层, 有 $O_n(r) = O'_n(r)$, $P(r) = P'(r)$;

步骤12 循环以上步骤直到实验所得的所有强度信息都更新到物函数中称作一次迭代. 当相应恢复的衍射图像与所记录的衍射图像的均方误差 (sum square error, SSE) 足够小时, 我们认为该算法达到收敛.

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

算法流程图如图 3 所示.

实验中使用相关系数 (correlation coefficient, Co) 和峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 从微观角度评价复原的质量^[19,20]. 需要注意的是, 当判定复振幅分布时, 要分别将其振幅和相位与原物体对比.

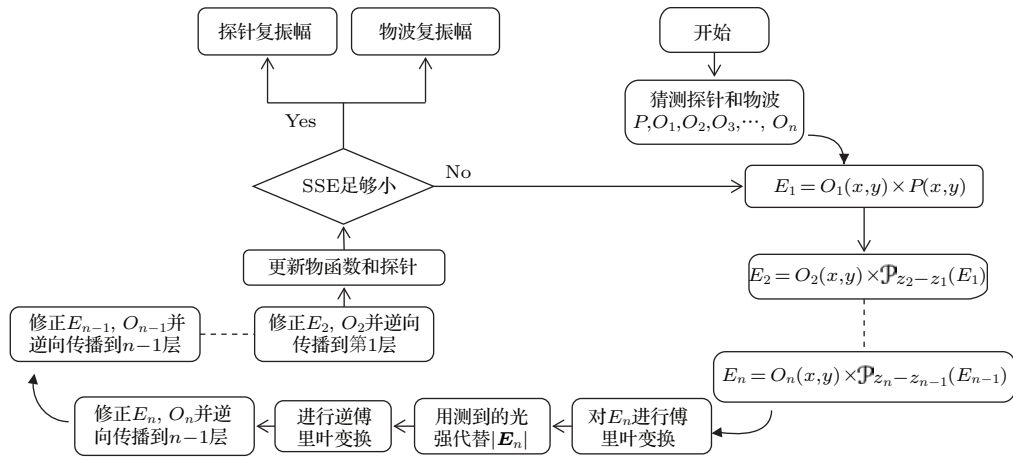


图3 三维叠层衍射成像算法流程图

Fig. 3. Flow chart of three-dimensional ptychographic imaging algorithm.

相关系数 C_o 为

$$C_o(f, f_0) = cov(f, f_0) (\sigma_f \cdot \sigma_{f_0})^{-1}, \quad (15)$$

其中, $cov(f, f_0)$ 表示恢复图像信息 f 和原始图像信息 f_0 之间的协方差, σ 为标准偏差. 相关系数值 C_o 为 $[0, 1]$ 之间, 其越接近 1 表明图像的恢复质量越高.

峰值信噪比 $PSNR$ 为

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{MN(2^k - 1)^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [O_i(r) - q_i(r)]^2}, \quad (16)$$

其中, M, N 分别为图像横纵向分辨率, $O_i(r)$ 为重建后物体, $q_i(r)$ 为原始物体. 应用峰值信噪比评价时, $PSNR$ 的值越大, 表示复原的质量越好.

3 模拟实验及分析

3.1 不同波长下两层样品复原效果对比

实验中采用的三维厚样品第一层的振幅和相位为图 4(a) 所示的分生组织细胞, 第二层的振幅和相位为图 4(b) 所示的维管束细胞, 衍射面上有效采样点数为 $192 \text{ pixels} \times 192 \text{ pixels}$, 照射光束取 632.8, 532, 473, 432 nm 四种波长, 扫描孔径采用 3×3 的探针阵列, 孔径半径为 80 pixels, 交叠率为 70%, 探针到第一层样品距离为 20 mm, 第一层样品到第二层样品距离为 2 mm, 第二层样品衍射距离为 60 mm, 光路示意图如图 5 所示. 实验过程中, 一次循环 9 处探针依次完成复原, 称作一次迭代.

利用计算机模拟不同波长数下迭代 200 次的三维叠层衍射成像, 通过迭代算法复原出相

同计算量下单波长 (632.8 nm)、双波长 (632.8 和 532 nm)、三波长 (632.8, 532 和 473 nm) 和四波长 (632.8, 532, 473 和 432 nm) 叠层衍射成像的恢复结果, 如图 6 所示, 其中插图均为各层样品平面恢复的探针振幅和相位.

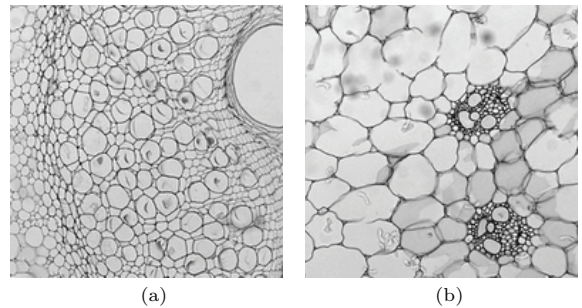


图4 (a) 分生组织细胞; (b) 维管束细胞

Fig. 4. (a) Cell of meristem; (b) cell of vascular bundle.

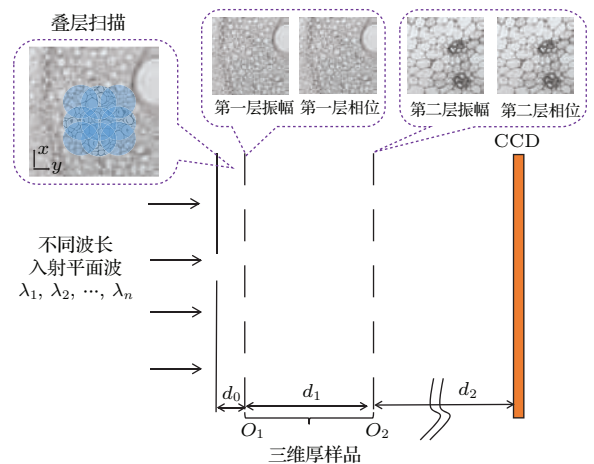


图5 (网刊彩色) 光路示意图

Fig. 5. (color online) Diagram of light path.

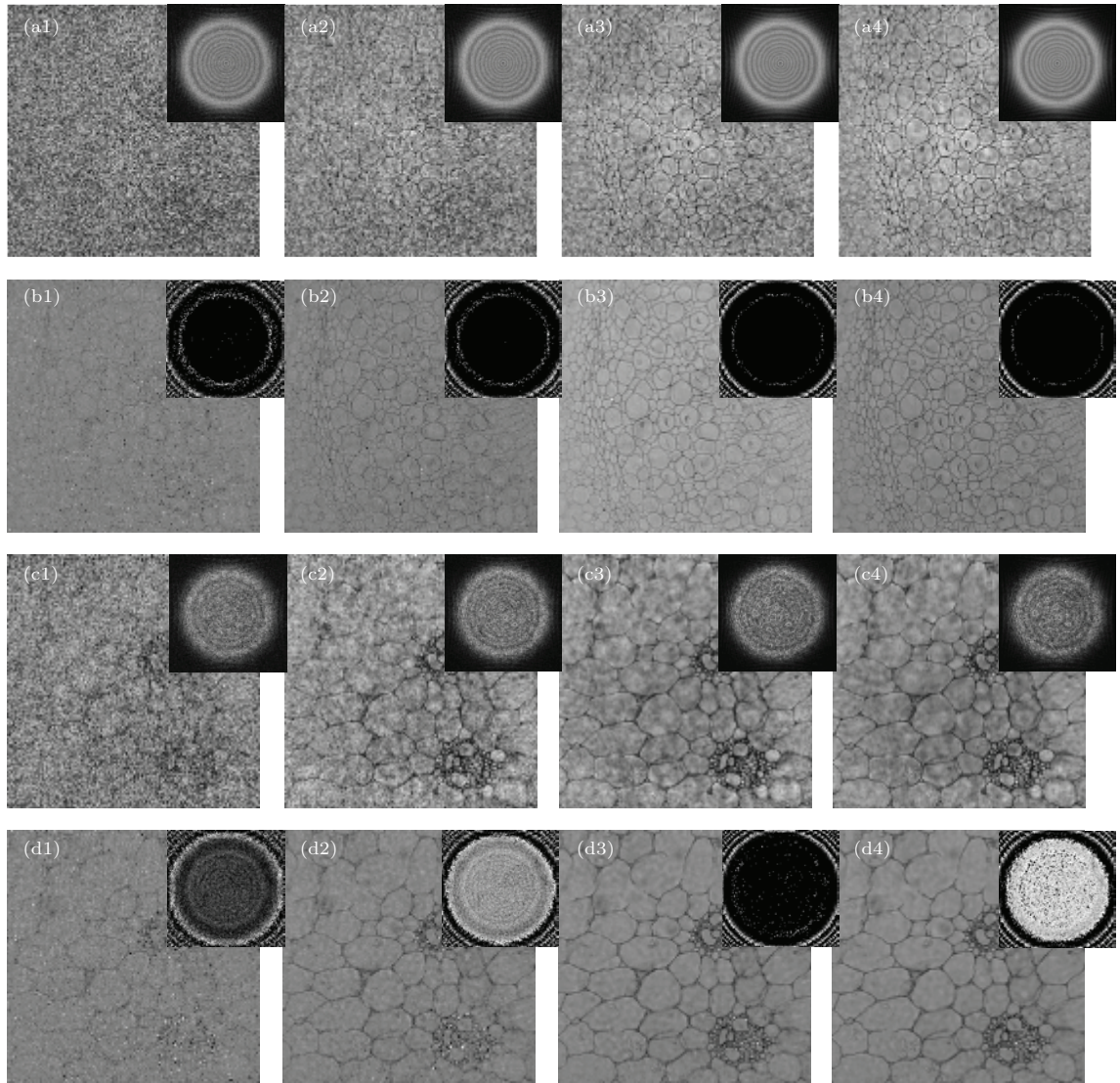


图6 复原结果 (a1)—(a4) 依次为第一层样品单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (b1)—(b4) 为第一层样品四种波长数量下对应复原的相位; (c1)—(c4) 依次为第二层样品单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (d1)—(d4) 为第二层样品四种波长数量下对应复原的相位; 内插图为探针复振幅

Fig. 6. Reconstructions: (a1)—(a4) Amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method, tri-wavelength method and four-wavelength method in the first slice; (b1)—(b4) reconstructed phases corresponding to (a1)—(a4); (c1)—(c4) amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method, tri-wavelength method and four-wavelength method in the second slice; (d1)—(d4) reconstructed phases corresponding to (c1)—(c4). The illustrations: the complex amplitude of the probes.

从图6直观上看,单波长并不能很好地恢复三维厚样品.在三波长和四波长下,两层切片的振幅和相位的恢复图像都比较清晰,通过三维重建可以将三维厚样品的空间结构复原出来,证实了三维叠层衍射成像能够恢复三维厚样品的复振幅信息.同时,从不同波长下的振幅和相位的复原结果可以看出:第二层振幅和相位恢复的质量要好于第一层振幅和相位恢复的质量;单独对于每一层来看,相位恢复的质量要好于振幅恢复的质量;同时对于

两层切片而言,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和双波长到三波长的过程中复原质量有明显提高,而三波长到四波长的过程中复原质量提高不明显.同时,仔细观察可发现,恢复的第二层样品中,残留有第一层模糊的影像,这一点将具体结合之后的实验再进一步探究其原因.

由第一层和第二层的复原结果与原样品的相关系数和峰值信噪比能够更微观地分析复原效果

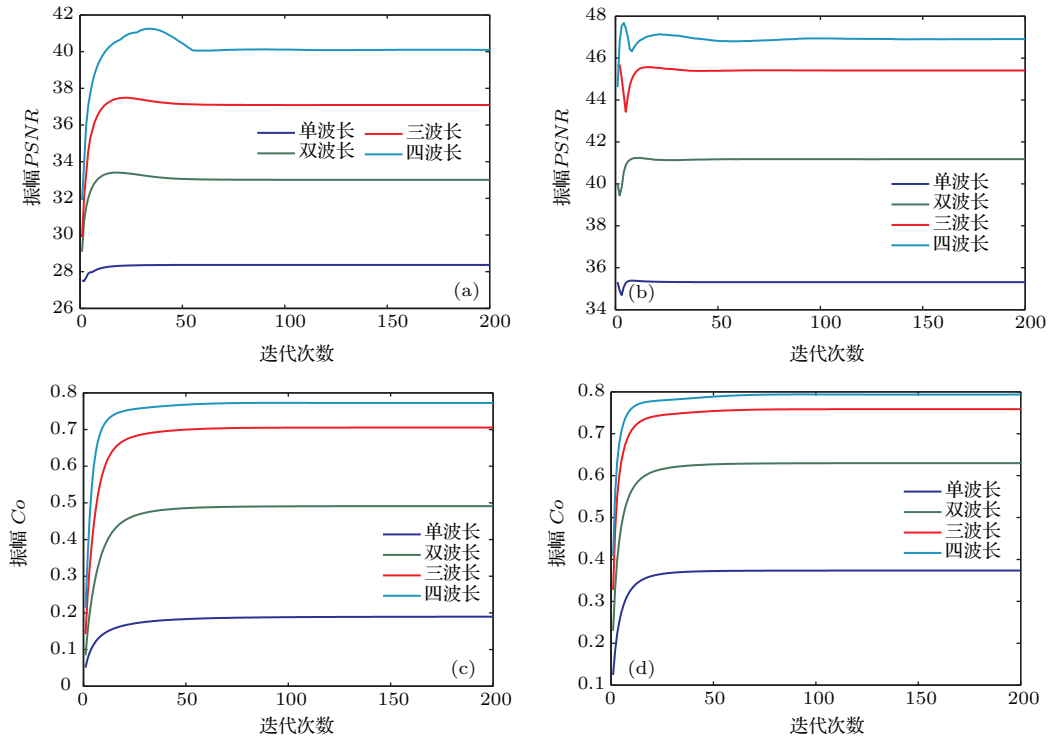


图7 (网刊彩色) 不同波长下第一层与第二层复原振幅随迭代次数的变化, 其中 (a), (b) 分别为第一层和第二层峰值信噪比 $PSNR$; (c), (d) 分别为第一层和第二层相关系数 Co
 Fig. 7. (color online) Relationship between the reconstructed amplitude and the iteration of the first slice and the second slice under different number of wavelengths: (a), (b) Peak signal to noise ratio $PSNR$; (c), (d) correlation coefficient Co .

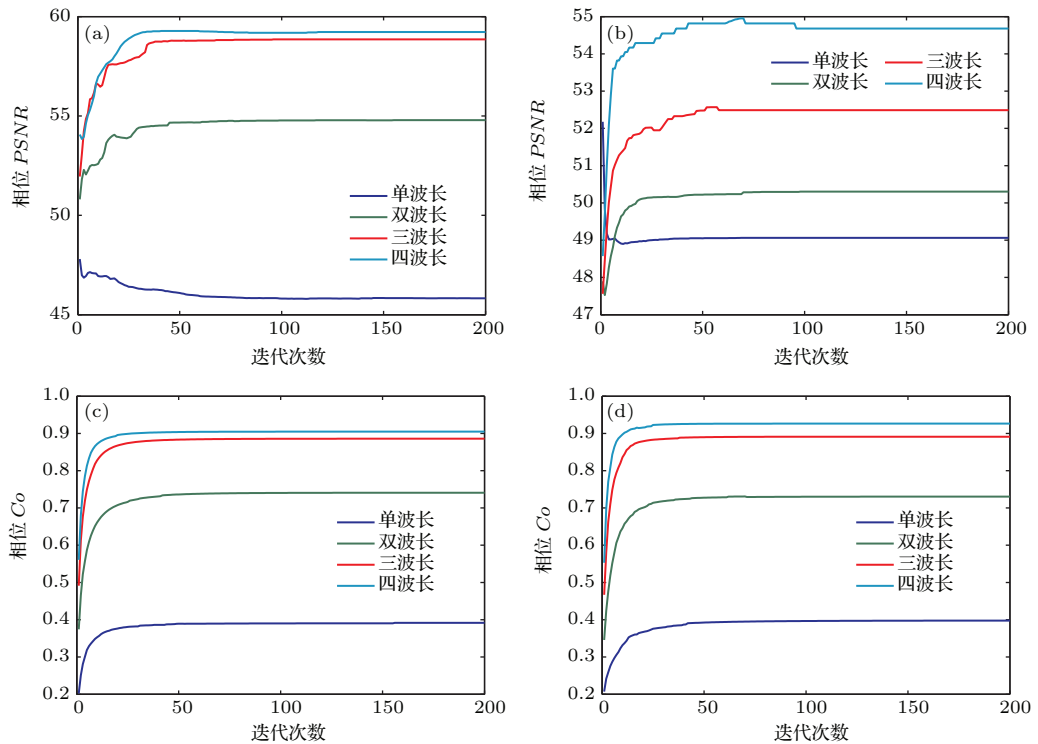


图8 (网刊彩色) 不同波长下第一层与第二层复原相位随迭代次数的变化, 其中 (a), (b) 分别为第一层和第二层峰值信噪比 $PSNR$; (c), (d) 分别为第一层和第二层相关系数 Co
 Fig. 8. (color online) Relationship between the reconstructed phase and the iteration of the first slice and the second slice under different number of wavelengths: (a), (b) Peak signal to noise ratio $PSNR$; (c), (d) correlation coefficient Co .

的质量和收敛速度, 将复原效果与原样品进行比较, 分别得到了相应的 $PSNR$ 值和 Co 值, 将其统计如图 7 和图 8 所示. 由图 7 和图 8 的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; 同时可以看出第二层振幅和相位的 $PSNR$ 值和 Co 值均大于第一层振幅和相位的 $PSNR$ 值和 Co 值, 即第二层振幅和相位复原的效果好于第一层的振幅和相位; 单独对于每一层而言, 复原相位的 $PSNR$ 值和 Co 值均大于复原振幅, 即相位复原的质量要好于振幅复原的质量; 同时对于两层切片而言, 相同迭代次数下, 波长数越多, 复原振幅和相位的 $PSNR$ 值越高、 Co 值越大, 说明其复原效果随着波长数量的增加而提高. 双波长较单波长和三波长较双波长的 $PSNR$ 值和 Co 值有明显提升, 而四波长较三波长的 $PSNR$ 值和 Co 值有一定提升, 但不明显. 以上微观分析同直观分析的结果相符合.

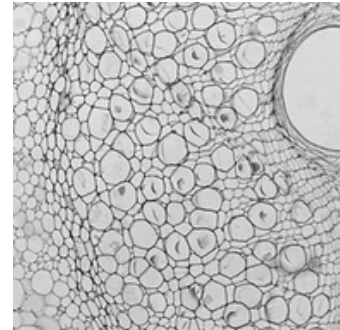
3.2 不同波长下三层样品复原效果对比

进一步采用三层样品进行模拟试验, 分析厚样品的信息增加时不同波长数量下厚样品的复原效果. 实验中采用三维厚样品的第一层的振幅和相位为图 9(a) 所示的分生组织细胞, 第二层的振幅和相位为图 9(b) 所示的维管束细胞, 第三层的振幅和相位为图 9(c) 所示的洋葱表皮细胞, 衍射面上有效采样点数为 $192 \text{ pixels} \times 192 \text{ pixels}$, 照射光束取 632.8, 532, 473, 432 nm 四种波长, 扫描孔径采用 3×3 的探针阵列, 孔径半径为 80 pixels, 交叠率为 70%, 探针到第一层样品距离为 20 mm, 第一层样品到第二层样品距离为 20 mm, 第二层样品到第三层样品距离为 20 mm, 第三样品衍射距离为 50 mm.

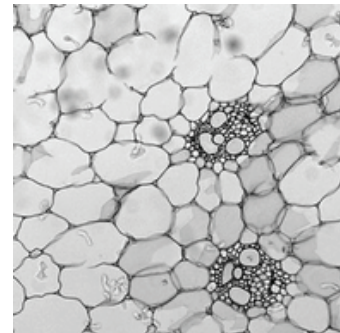
利用计算机模拟不同波长数下迭代 200 次的三维叠层衍射成像, 通过迭代算法复原出相同计算量下单波长 (632.8 nm)、双波长 (632.8 和 532 nm)、三波长 (632.8, 532 和 473 nm) 和四波长 (632.8, 532, 473 和 432 nm) 叠层衍射成像的恢复结果, 如图 10 所示, 其中插图各层样品平面恢复的探针振幅和相位.

从图 10 直观上看, 三波长和四波长下, 三层切片的振幅和相位的恢复图像都比较清晰, 通过三维重建可以将三维厚样品的空间结构复原出来, 证实了三维叠层衍射成像能够恢复三维厚样品的复振

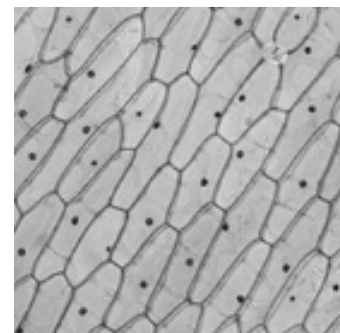
幅信息. 同时, 从不同波长下的振幅和相位的复原结果可以看出: 单独对于每一层而言, 相位复原的质量要好于振幅复原的质量; 同时对于三层切片而言, 复原质量从单波长到四波长依次增强, 且每增加一个波长恢复效果有明显改善.



(a)



(b)



(c)

图 9 (a) 分生组织细胞; (b) 维管束细胞; (c) 洋葱表皮细胞
Fig. 9. (a) Cell of meristem; (b) cell of vascular bundle; (c) cell of onion epidermis.

与双层切片不同, 从三波长到四波长三层切片恢复效果仍有明显的上升空间. 这是由于随着样品厚度的增加, 即切片数的增加, 需要很好地恢复出它们的数据冗余量也在增加, 而三波长所能提供的数据冗余出现不足, 成像质量略有下降, 但相位仍然有很好的对比度, 可以通过进一步增加波长数来进行弥补. 同时, 仔细观察仍然可以发现在两层切片时所出现的叠影现象.

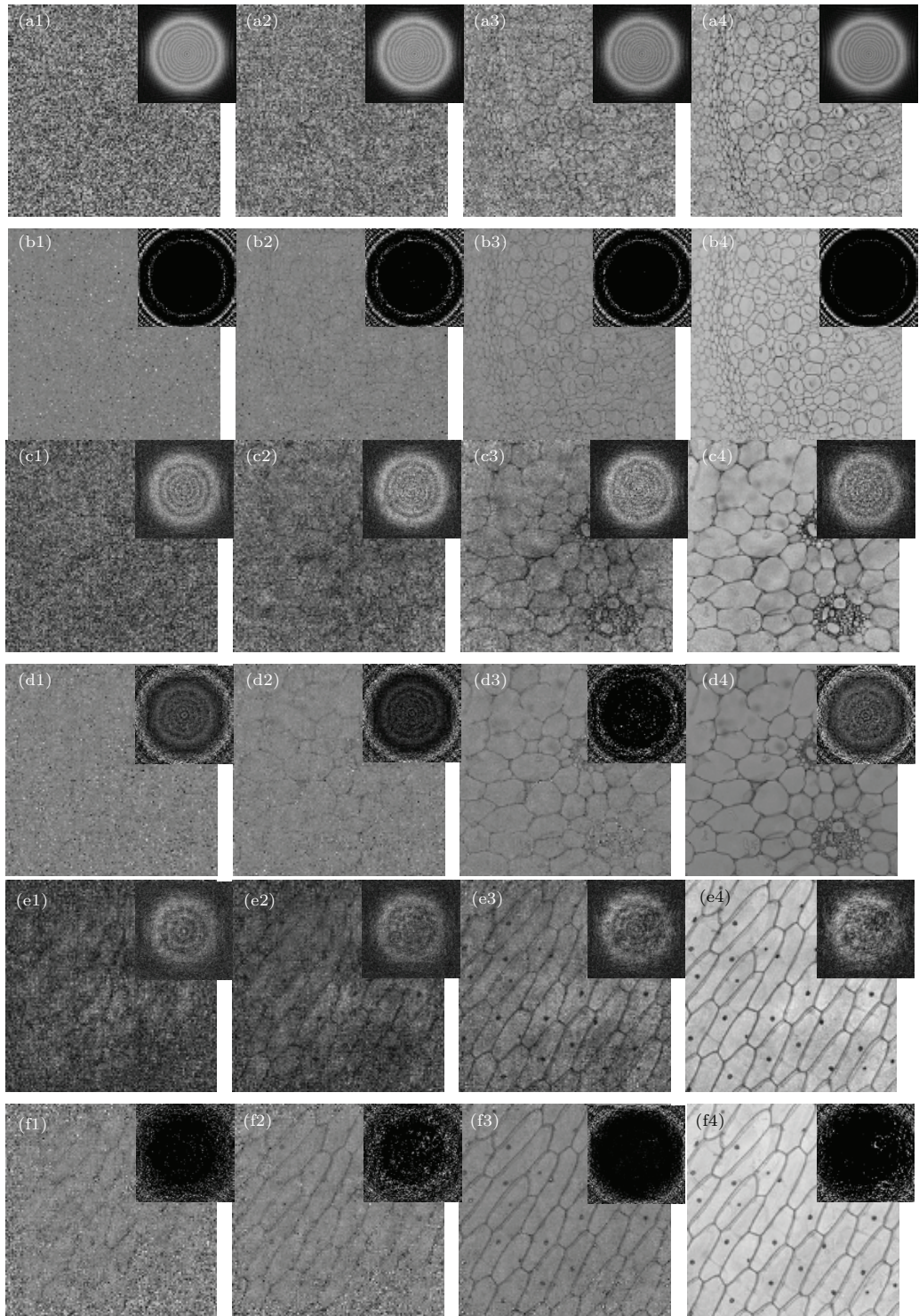


图 10 复原结果 (a1)–(a4) 依次为第一层样品单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (b1)–(b4) 为第一层样品四种波长数量下对应复原的相位; (c1)–(c4) 依次为第二层样品单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (d1)–(d4) 为第二层样品四种波长数量下对应复原的相位; (e1)–(e4) 依次为第二层样品单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (f1)–(f4) 为第二层样品四种波长数量下对应复原的相位; 内插图为探针复振幅

Fig. 10. Reconstructions: (a1)–(a4) Amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method, tri-wavelength method and four-wavelength method in the first slice; (b1)–(b4) reconstructed phases corresponding to (a1)–(a4); (c1)–(c4) amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method, tri-wavelength method and four-wavelength method in the second slice; (d1)–(d4) reconstructed phases corresponding to (c1)–(c4); (e1)–(e4) amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method, tri-wavelength method and four-wavelength method in the third slice; (f1)–(f4) reconstructed phases corresponding to (e1)–(e4). The illustrations: the complex amplitude of the probes.

由第一层、第二层和第三层的复原结果与原样品的相关系数和峰值信噪比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, 分别得到了相应的 $PSNR$ 值和 Co 值, 将其统计如图 11 和图 12 所示. 由图 11 和图 12 的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; 同时可以看出第三层振幅的 $PSNR$ 值和 Co 值大于第二层振幅的 $PSNR$ 值和 Co 值, 第二层振幅的 $PSNR$ 值和 Co 值大于第一层振幅的 $PSNR$ 值和 Co 值, 即第三层振幅恢复的效果好于第二层, 而第二层好于第一层; 单独对于每一层而言, 复原相位的 $PSNR$ 值和 Co 值均大于复原振

幅的 $PSNR$ 值和 Co 值, 相位恢复的质量要好于振幅恢复的质量; 同时对于三层切片而言, 相同迭代次数下, 波长数越多, 复原振幅和相位的 $PSNR$ 值越高、 Co 值越大, 说明其复原效果随着波长数量的增加而提高. 双波长较单波长、三波长较双波长、四波长较三波长的 $PSNR$ 值和 Co 值都有明显改善, 进一步说明了复原质量从单波长到四波长依次增强, 这也与直观的结果相符合. 相比于两层切片, 恢复三层切片需要的信息增加, 在同波长数量下, 三层切片的恢复质量也开始下降, 但增加波长数量可以使其恢复效果进一步明显提升.

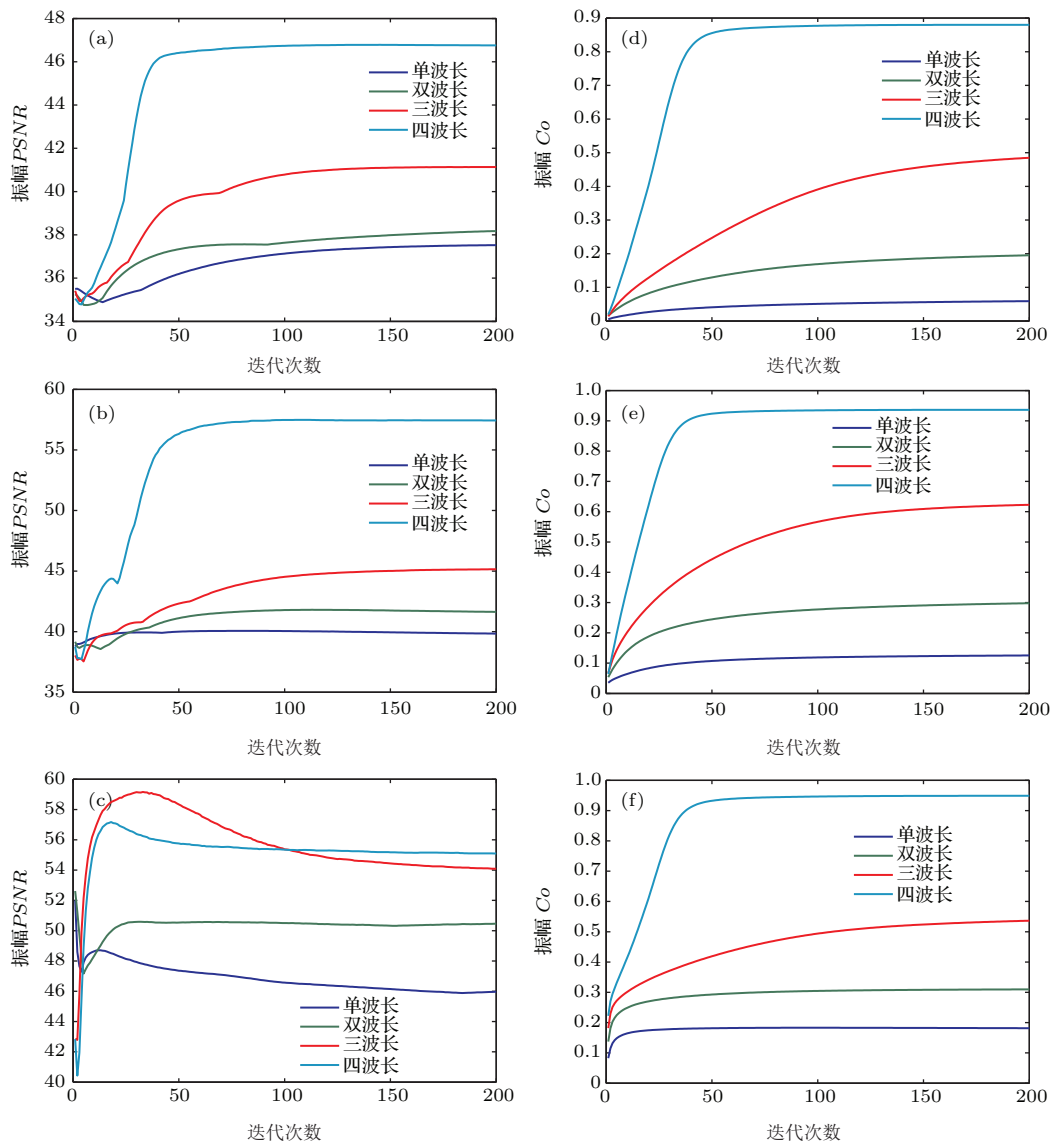


图 11 (网刊彩色) 不同波长下第一层、第二层与第三层复原振幅随迭代次数的变化, 其中 (a), (b), (c) 分别为第一、二、三层峰值信噪比 $PSNR$; (d), (e), (f) 分别为第一、二、三层相关系数 Co

Fig. 11. (color online) Relationship between the reconstructed amplitude and the iteration of the three slices under different number of wavelengths: (a), (b), (c) Peak signal to noise ratio $PSNR$; (d), (e), (f) correlation coefficient Co .

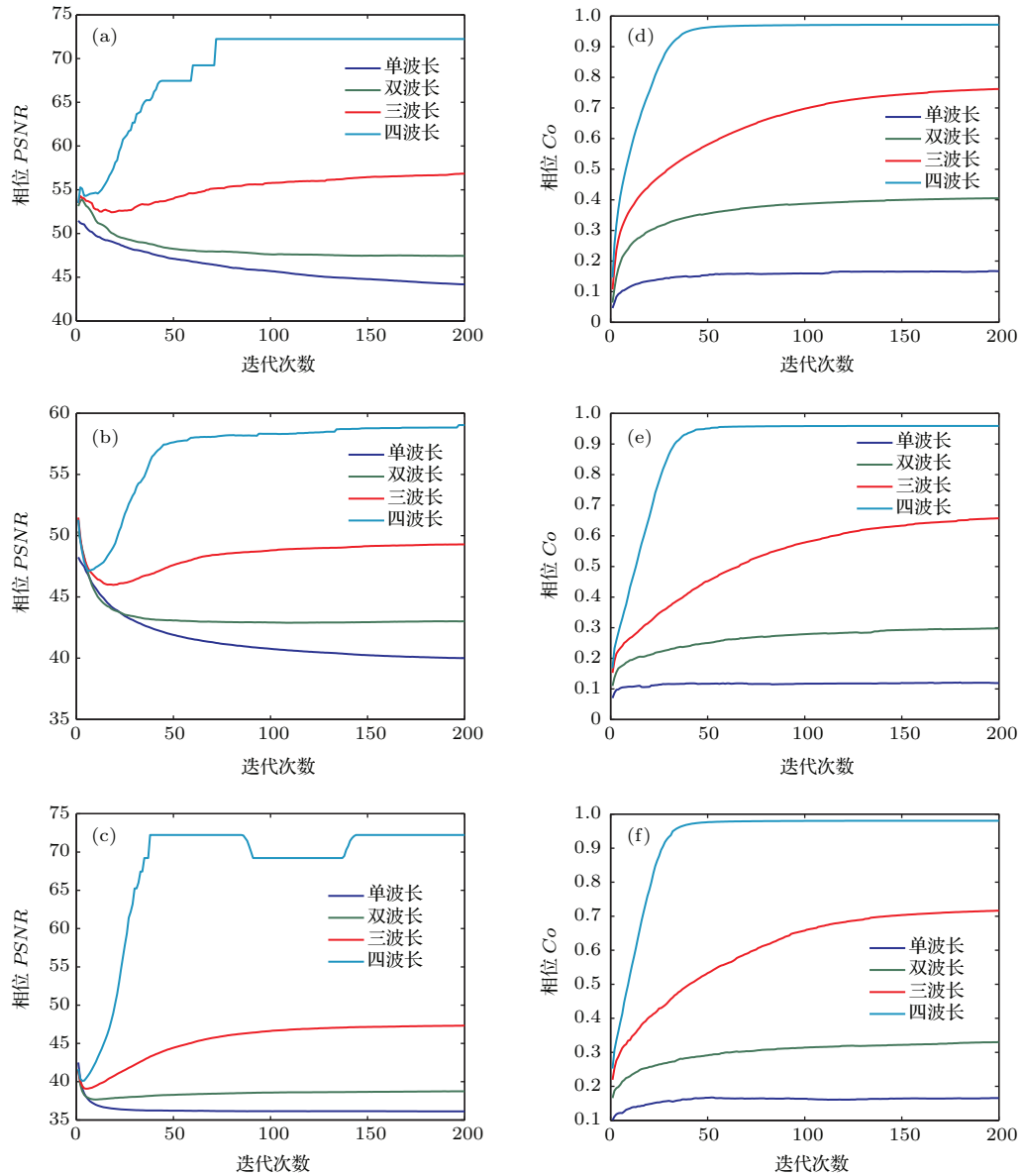


图 12 (网刊彩色) 不同波长下第一层、第二层与第三层复原相位随迭代次数的变化, 其中 (a), (b), (c) 分别为第一、二、三层峰值信噪比 $PSNR$; (d), (e), (f) 分别为第一、二、三层相关系数 Co

Fig. 12. (color online) Relationship between the reconstructed phase and the iteration of the three slices under different number of wavelengths: (a), (b), (c) Peak signal to noise ratio $PSNR$; (d), (e), (f) correlation coefficient Co .

4 实验与分析

4.1 实验装置

鉴于上述模拟实验的结果, 我们搭建了可一次性实现单波长、双波长、三波长的光学三维叠层衍射成像系统, 实验装置如图 13 所示, 其中样品为多层切片. 激光采用红光 (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. 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, 准直系统将采用消色差透镜, 使每一束光都是单色平面波. 利用接近圆形的正十边形光阑作为探针, 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, 实验中接收衍射图样所使用的电荷耦合器件为 Collsnap EZ 型, 单像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$, 窗口大小为 $1392 \text{ pixels} \times 1040 \text{ pixels}$. 本实验中采用不同的样品切片作为三维厚样品的每一层切片, 从而能够更直观地分辨每一层的复原效果. 双层样品采用

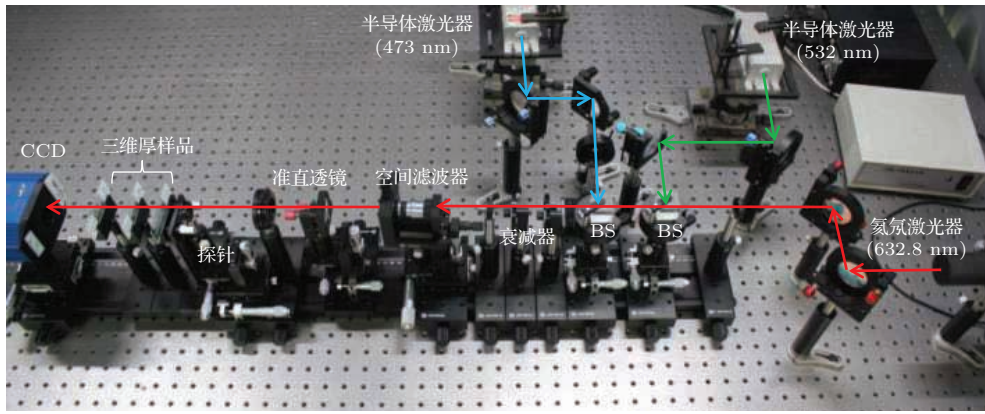


图 13 (网刊彩色) 多波长三维叠层衍射成像实验装置图

Fig. 13. (color online) Optical setup of multi-wavelength ptychography in three dimension.

一片蜜蜂翅膀切片和一片苍蝇翅膀切片, 如图 14(a) 和图 14(b) 所示, 三层样品采用一片蜜蜂翅膀和两片苍蝇翅膀切片, 如图 14(a)—图 14(c) 所示, 其中每一层切片厚度为 1.44 mm.

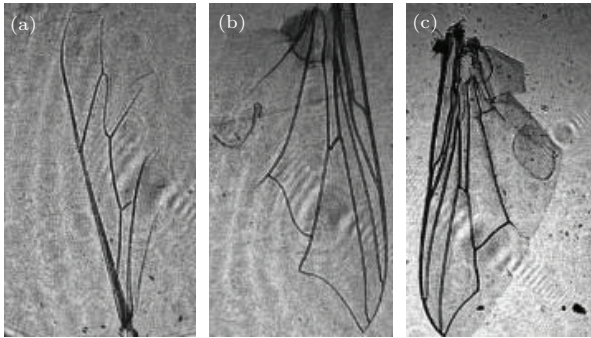


图 14 (a) 蜜蜂翅膀切片; (b) 苍蝇翅膀切片; (c) 苍蝇翅膀切片 (成像透镜拍摄)

Fig. 14. (a) Bee wing; (b) fly wing; (c) fly wing (taken by imaging lens).

4.2 复原结果与分析

4.2.1 两层样品复原效果与分析

探针直径为 4.60 mm, 移动 3×3 共 9 个位置, 每次移动的距离为 0.67 mm, 交叠率为 85%. 探针光阑与第一层样品相距 22.60 mm, 第一层样品与第二层样品相距 55.50 mm, 第二层样品衍射距离为 37.70 mm. 依次通过 632.8, 532 和 473 nm 三种波长激光进行三维叠层衍射成像. 通过迭代算法复原出相同计算量下单波长 (632.8 nm)、双波长 (632.8 和 532 nm) 和三波长 (632.8, 532 和 473 nm) 叠层衍射成像的恢复结果, 如图 15 所示, 其中插图各层样品平面恢复的探针振幅和相位.

从图 15 直观上看, 三波长下, 两层切片的振幅和相位的恢复图像都比较清晰, 通过三维重建可以

将三维厚样品的空间结构复原出来, 证实了三维叠层衍射成像能够恢复三维厚样品的复振幅信息. 同时, 从不同波长下的振幅和相位的复原结果可以看出: 第二层振幅和相位恢复的效果好于第一层的振幅和相位; 对单独每一层而言, 相位恢复的效果好于振幅; 同时对于两层切片而言, 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、双波长到三波长时复原质量都有明显提升, 尤其相位有很高的对比度, 这与仿真结果一致. 同时随着波长数的增加, 恢复效果增强, 噪声也会相对增加, 尽管三波长引入了更多的噪声, 但相位仍旧清晰可见. 由以上分析可以看出, 三维叠层衍射成像有较好的抗噪能力, 三波长相比于双波长每一层的相位信息更加完整, 分辨率更高. 三波长下的第一层和第二层的相位三维分布图如图 16(a) 和图 16(b) 所示. 同时, 不难看出, 层与层之间有一定的叠影现象.

4.2.2 三层样品复原效果与分析

探针直径为 4.70 mm, 移动 3×3 共 9 个位置, 每次移动的距离为 0.67 mm, 交叠率为 86%. 探针光阑与第一层样品相距 21.60 mm, 第一层样品与第二层样品相距 51.60 mm, 第二层样品与第三层样品相距 38.00 mm, 第三层样品衍射距离为 60.00 mm, 三层厚度共计 4.32 mm. 依次通过 632.8, 532 和 473 nm 三种波长激光进行三维叠层衍射成像. 通过迭代算法复原出相同计算量下单波长 (632.8 nm)、双波长 (632.8 和 532 nm) 和三波长 (632.8, 532 和 473 nm) 叠层衍射成像的恢复结果, 如图 17 所示, 其中插图各层样品平面恢复的探针振幅和相位.

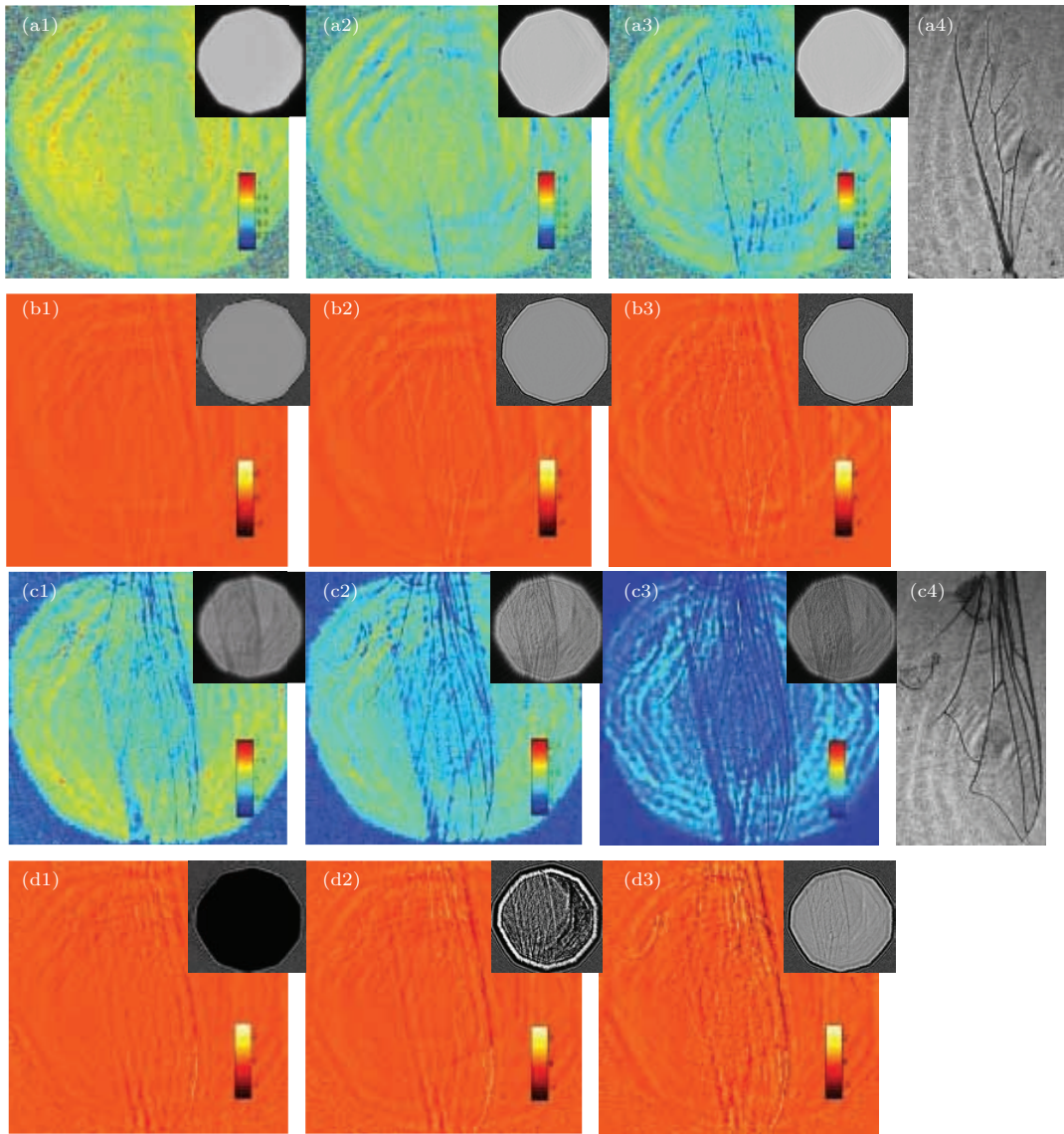


图 15 (网刊彩色) 迭代 20 次复原结果 (a1)—(a3) 依次为第一层样品单波长、双波长和三波长复原的振幅; (b1)—(b3) 为第一层样品三种波长数量下对应复原的相位; (c1)—(c3) 依次为第二层样品单波长、双波长、三波长和四波长复原的振幅; (d1)—(d3) 为第二层样品三种波长数量下对应复原的相位; a(4), c(4) 为样品参照图; 内插图为探针复振幅

Fig. 15. Reconstructions after 20 iterations: (a1)—(a3) Amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method in the first slice; (b1)—(b3) reconstructed phases corresponding to (a1)—(a3); (c1)—(c3) amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method in the second slice; (d1)—(d3) reconstructed phases corresponding to (c1)—(c3). a(4), c(4) are the original reference graphs of the samples. The illustrations: the complex amplitude of the probes.

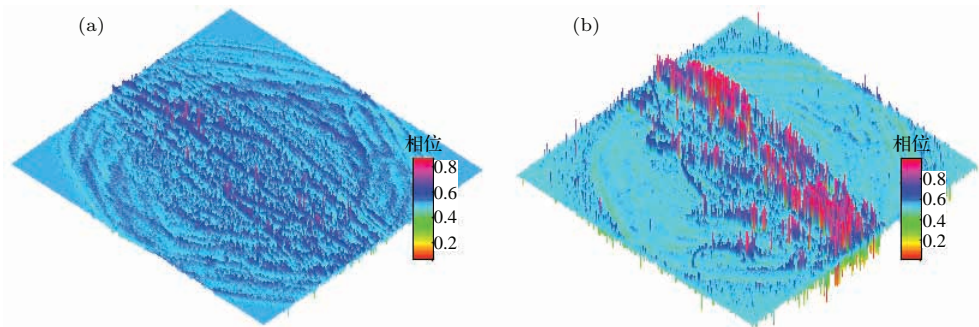


图 16 (网刊彩色) 第一层相位和第二层相位三维分布图

Fig. 16. (color online) Topography maps of the phase in the first slice and the second slice.

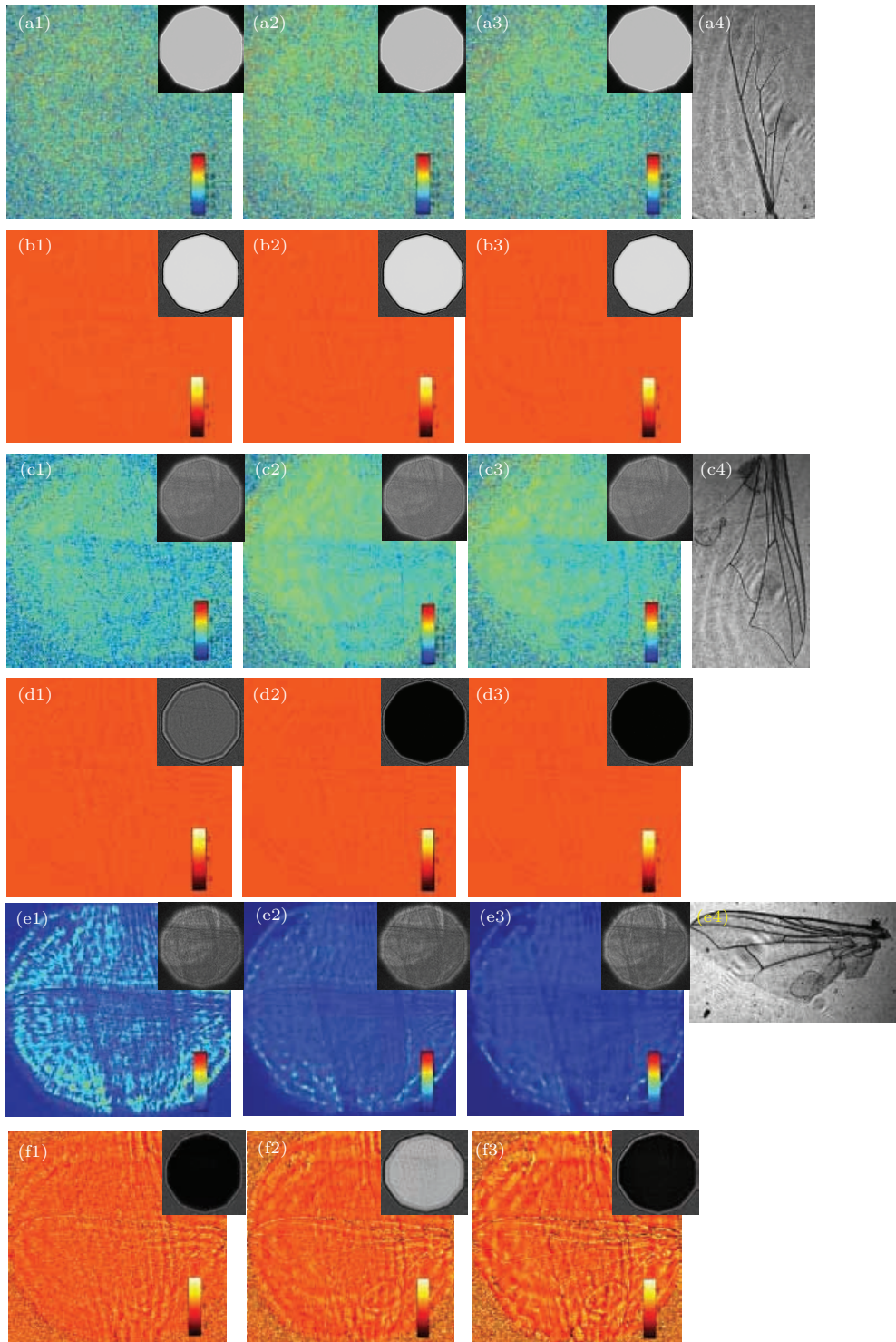


图 17 (网刊彩色) 迭代 20 次复原结果 (a1)—(a3) 依次为第一层样品单波长、双波长和三波长复原的振幅; (b1)—(b3) 为第一层样品三种波长数量下对应复原的相位; (c1)—(c3) 依次为第二层样品单波长、双波长和三波长复原的振幅; (d1)—(d3) 为第二层样品三种波长数量下对应复原的相位; (e1)—(e3) 依次为第三层样品单波长、双波长和三波长复原的振幅; (f1)—(f3) 为第三层样品三种波长数量下对应复原的相位; a(4), c(4), e(4) 为样品参照图; 内插图 of 探针复振幅

Fig. 17. (color online) Reconstructions after 20 iterations: (a1)–(a3) Amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method in the first slice; (b1)–(b3) reconstructed phases corresponding to (a1)–(a3); (c1)–(c3) amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method in the second slice; (d1)–(d3) reconstructed phases corresponding to (c1)–(c3); (e1)–(e3) amplitudes of the reconstruction via single-wavelength method, dual-wavelength method and tri-wavelength method in the third slice; (f1)–(f3) reconstructed phases corresponding to (e1)–(e3). a(4), c(4), e(4) are the original reference graphs of the samples. The illustrations: the complex amplitude of the probes.

由图 17 直观上看, 三波长下, 三层切片的相位的恢复图像都还算清晰, 通过三维重建可以将三维厚样品的空间结构复原出来, 再次证实了三维叠层衍射成像能够恢复三维厚样品的复振幅信息. 同时, 从不同波长下的振幅和相位的复原结果可以看出: 第三层振幅恢复的效果好于第二层的振幅恢复效果, 第二层振幅恢复的效果好于第一层振幅恢复的效果; 对单独每一层而言, 相位恢复的效果好于振幅; 同时对于三层切片而言, 单波长、双波长和三波长的复原效果依次增强.

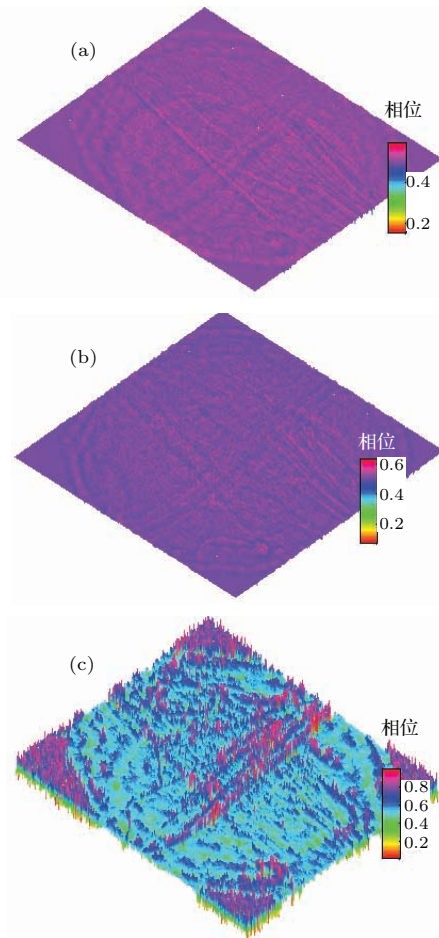


图 18 (网刊彩色) (a), (b), (c) 分别为三波长下第一、二、三层切片下相位的三维分布图

Fig. 18. (color online) Topography maps of the phase in the three slices under three wavelengths.

与双层切片不同, 三波长的恢复质量有所下降, 振幅出现模糊不清. 这是由于随着样品厚度的增加, 即切片数的增加, 需要很好恢复出它们的数据冗余量也在增加, 而三波长所能提供的数据冗余出现不足, 成像质量略有下降, 但相位仍然有很好的对比度, 可以通过进一步增加波长数来进行弥补, 该恢复结果与仿真结果一致. 三波长下的三层

切片的相位三维分布图如图 18 所示. 同时, 仍然可以发现两层切片时所出现的叠影现象.

4.2.3 叠影现象的产生分析

由仿真实验和光学实验中, 图 4 (c3), 图 4 (d3), 图 10 (c3), 图 10 (d3), 图 10 (e3), 图 10 (f3), 图 15 (c3), 图 15 (d3), 图 17 (e3), 图 17 (f3) 等均可以看出, 层与层之间会有一定量的干扰, 主要体现在两层切片的第二层, 三层切片的第二、三层的振幅和相位上会出现叠影现象, 但还未影响到图像信息的分辨. 同时, 振幅的叠影现象相比于相位会显得更加明显一些. 在厚样品大间距模型下, 仔细观察恢复的探针结果, 注意到除了第一层的探针外, 每一层的探针不再是像二维叠层衍射成像那样简单的平行光束, 其中夹杂着上几层样品的信息. 在算法中, 探针与每一层样品相乘的近似处理过程中, 势必会将上几层的信息带到这一层里来, 从而恢复的结果中出现叠层现象. 而层数越靠后, 越叠加有前几层中每一层的信息, 叠影现象则越明显.

以两层切片光学实验作为具体例子来看, 平行光出射后经过 22.60 mm 的距离衍射至第一层样品面, 作为第一层的探针. 与第一层物函数相乘后, 经过 55.50 mm 距离的衍射至第二层样品面, 作为第二层的探针, 这时探针包含有第一层的离焦信息, 通过与第二层物函数相乘后衍射至 CCD 产生衍射图像. 在三维叠层恢复算法中, 与上述过程完全相反地恢复每一层信息, 从而所恢复的第二层物面上势必会残存第一层的离焦的模糊影像, 这与实验结果相符合.

相比于文献 [15, 16], 由于采用不同样品切片作为厚样品, 同时在大距离下进行衍射, 在更直观地反映三维叠层衍射成像的分离与恢复效果的同时也由于切片间的关联性不大, 间距更大, 相比于一般的三维厚样品而言, 叠影现象会显得更加明显一些, 但并未影响相位的辨识度. 然而, 对于一般的三维厚样品而言, 每一层切片有一定的延续性, 且间距很小, 从而层与层之间的干扰可以忽略不计.

5 结 论

本文利用三维叠层衍射成像的迭代恢复算法, 从模拟实验和光学实验均成功地验证了三维叠层衍射成像可以恢复毫米级厚样品的复振幅信息. 对实验结果进行比较和分析: 单波长并不能很好地恢

复三维厚样品,从而有必要引入多波长光束照明.本文系统地分析了三维叠层衍射成像中波长数量对复原质量的影响.多波长相比于单波长在三维叠层衍射成像中收敛速度更快、成像效果更好、相位有更好的对比度.同时,随着样品厚度的增加,所需要的冗余信息增加,势必导致图像质量的下降,而多波长的引入能够有效弥补这一点.模拟试验和光学实验的结果符合得很好,证明了实验中三维叠层衍射成像系统的可靠性.同时在实验中发现了叠影现象,这是正常现象,主要原因是由于每一层的探针都夹杂了前几层的信息,从而在每一层恢复的结果上残留有上几层的离焦的模糊影像.然而,对于一般的三维厚样品而言,每一层切片有一定的延续性,且间距很小,从而层与层之间的干扰可以忽略不计.基于本文中的光学成像系统,最佳厚样品的成像方式为三波长三维叠层衍射成像.本结论对提高三维叠层衍射成像的质量具有现实意义.

参考文献

- [1] Rodenburg J M 2008 *Adv. Imag. Electron Phys.* **150** 87
- [2] Maiden A M, Rodenburg J M, Humphry M J 2010 *Opt. Lett.* **35** 2585
- [3] 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]
- [4] Wang Y, Li T, Gao Q, Zhang S, Shi Y 2013 *Opt. Eng.* **52** 091720
- [5] Shi Y S, Wang Y L, Li T, Gao Q K, Wan H, Zhang S G, Wu Z B 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 074203
- [6] Shi Y, Li T, Wang Y, Gao Q, Zhang S, Li H 2013 *Opt. Lett.* **38** 1425
- [7] Humphry M J, Kraus B, Hurst A C, Maiden A M, Rodenburg J M 2012 *Nat. Commun.* **3** 730
- [8] Rodenburg J, Hurst A, Cullis A, Dobson B, Pfeiffer F, Bunk O, David C, Jefimovs K, Johnson I 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 034801
- [9] Hegerl R, Hoppe W 1972 *Proceeding of the 5th European Congress on Electron Microscopy* (London: Institute of Physics) p628
- [10] Hoppe W 1969 *Acta Crystallogr. A: Cryst. Phys. Diffraction. Theore. General Crystallogr.* **25** 495
- [11] Fienup J R 1982 *Appl. Opt.* **21** 2769
- [12] Rodenburg J M, Faulkner H M L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4795
- [13] Faulkner H, Rodenburg J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 023903
- [14] Maiden A M, Rodenburg J M 2009 *Ultramicroscopy* **109** 1256
- [15] Maiden A M, Humphry M J, Rodenburg J M 2012 *J. Opt. Soc.* **29** 1606
- [16] Godden T M, Suman R, Humphry M J, Rodenburg J M, Maiden A M 2014 *Opt. Express* **22** 12513
- [17] Pan X C, Veetil S P, Liu C, Lin Q, Zhu J Q 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 021103
- [18] Shi Y S, Wang Y L, Zhang S G 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 054203
- [19] 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]
- [20] Shi Y S, Situ G H, Zhang J J 2008 *Opt. Lett.* **33** 542

Experimental study on three-dimensional ptychography for thick sample*

Pan An¹⁾³⁾ Zhang Xiao-Fei²⁾³⁾ Wang Bin²⁾³⁾ Zhao Qing¹⁾³⁾ Shi Yi-Shi^{3)4)†}

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

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

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

4) (*Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

(Received 10 July 2015; revised manuscript received 30 September 2015)

Abstract

Ptychography is a new kind of lens-less imaging technology. What restricts the technique is the assumption of a multiplicative interaction between the illuminating coherent beam and the specimen, and the ptychography cannot be applied to samples thicker than a few tens of micrometers in the case of visible-light imaging at micron-scale resolution. In the present work, we split a sample into axial sections, thereby realize three-dimensional ptychographic imaging of thick samples at the millimeter level in a series of computer simulations and optical experiments. Our simulation results reveal that by using single wavelength we cannot achieve good-quality images of thick samples. Thus it is necessary to introduce more wavelengths for illumination. With increasing the number of wavelengths, the imaging quality of three-dimensional thick samples can be enhanced continually. Then we make further study on the relationship between the imaging quality and the magnitude of wavelength in optical experiments by using two groups of samples with different thickness values. The results demonstrate that our experimental results are highly consistent with simulations. For our concrete configuration in this paper, the best results of imaging and separation may be obtained for the case of tri-wavelength. At the same time we make a reasonable explanation for the phenomenon of fold-over in the experiment. Our results are important and meaningful for the practical utilizing of three-dimensional ptychography of thick samples.

Keywords: thick samples, three-dimensional ptychography, iterative engine, multi-wavelength

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

DOI: 10.7498/aps.65.014204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grand Nos. 61575197, 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, China, the K. C. Wong Education Foundation, China, and the "Young Eagles" Program of Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences.

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