

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^{*}

王治昊¹⁾²⁾ 王雅丽¹⁾ 李拓¹⁾ 史祎诗^{1)3)†}

1)(中国科学院大学, 北京 100049)

2)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

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3月22日收到; 2014年4月4日收到修改稿)

在传统的叠层成像算法中引入一种旋转相位编码与照明光束相匹配. 采用分块均匀分布的旋转相位调制器对衍射光进行调制, 在探测面获得了相应的衍射图样. 这种照明光束与相位匹配的方式有效地增加了了解的约束条件, 具有收敛速度快、抗噪声及抗位置偏差能力强等优点. 与随机相位调制相比, 本算法所引入的旋转相位调制器构造简单、使用便捷, 因而在实时显微成像、超分辨成像等领域将具有更高的实用价值.

关键词: 叠层成像算法, 旋转相位编码, 匹配照明光束

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

DOI: 10.7498/aps.63.164204

1 引言

叠层衍射成像是一种重要的相干衍射成像技术. 该技术最早由 Hoppe^[1,2] 于 1969 年提出并成功应用于晶体结构的分析, Rodenburg 和 Faulkner^[3,4] 结合相位恢复算法对其进行了多次改进. 目前, 叠层成像技术在 X 射线域、可见光域、电子频域等多种波段都有较为广泛的应用, 并在大幅面成像和高分辨成像方面显示出巨大的潜力^[5-13]. 叠层成像技术的原理是通过改变照明光束和样品的相对位置, 在探测面获得了一系列衍射图样: 由于相邻光束的照明部分存在交叠区域, 因此所有的衍射图样之间存在相互约束关系, 样品复振幅则是所有衍射图样的共解, 利用衍射图样和恢复算法能够重建出样品的复振幅分布. 叠层成像技术如果按传统的扫描方式重建样品, 则存在扫描次数过多而影响成像速度的问题, 并且实际应用中的光路噪声、位置误差等各种干扰都会影响成像质量. 文献

[14—16] 提出了加入随机相位板对衍射光束进行调制, 这种照明与相位匹配的方式扩大了系统的已知参数, 有效地增加了约束条件, 模拟实验表明此方式可以抗噪声及照明光束的位置偏差, 并可提高收敛速度. 但是由于随机相位信息难以准确获取, 本文设计了相位分块均匀分布的旋转相位用于叠层成像, 提出了多光束照明与旋转相位匹配的叠层衍射成像算法, 并通过模拟实验验证了该算法具有收敛速度快、抗噪声及抗光束位置偏差能力强的优势. 此外, 由于本算法所引入的旋转相位调制器易于构建, 因而对叠层成像技术在多种不同波段的实际应用均有重要的实际意义.

2 理论分析与算法设计

2.1 成像原理分析

基于多光束照明和旋转相位调制器的叠层衍射成像的光路如图 1 所示. 整个光路由照明光束、

^{*} 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”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.

[†] 通讯作者. E-mail: sysopt@126.com

样品、旋转相位调制器、探测器组成. 用全透的小孔光阑调制一束入射平面波的几何形状和光束尺寸, 构成照明光束. 照明光束能够部分地照明样品, 旋转或移动小孔光阑可改变照明光束的位置. 照明光束通过样品, 载有样品复振幅信息的衍射波被对应的旋转相位调制, 在探测面获得了一系列的衍射图样. 其中, 样品每次被照明的部分必须与相邻照明区有互相重叠的区域. 在此条件下, 可以利用叠层

相位恢复算法由这些衍射图样获得照明区域的复振幅信息. 与传统的叠层成像算法不同的是引入了对衍射波的相位调制, 这种照明光束与相位匹配的方式存在多样性, 本文选取了分块均匀化的旋转相位调制器, 此种调制器的信息容易获取, 在实验中可操作性强. 相位匹配使得叠层成像算法中的已知条件扩大, 有效地增加了约束条件, 因此可以快速获得高质量的解.

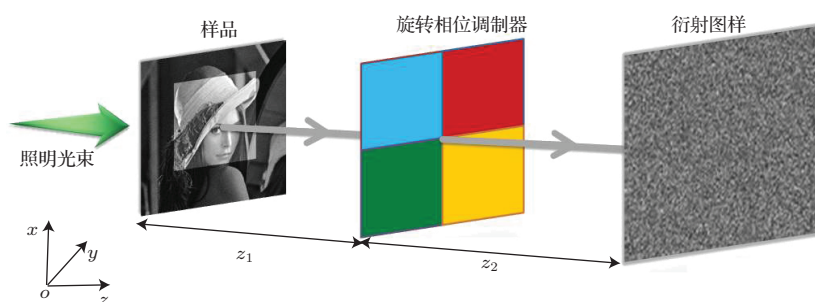


图1 (网刊彩色) 基于旋转相位编码与照明光束匹配的叠层衍射成像光路示意图

2.2 算法分析

构建4束不同位置的照明光束, 其复振幅为 P_i ($i = 1, 2, 3, 4$), 并依次照明待成像的样品, 如图2所示. 图2(a)—(d)中的白色部分表示4束光的照明范围, 每一束光恰好照明该正方形样品的3/4区域. 如果4次被照明部分的并集完全覆盖了整个样品, 并且两两之间有重叠, 则能够重建整个样品的复振幅信息^[17].

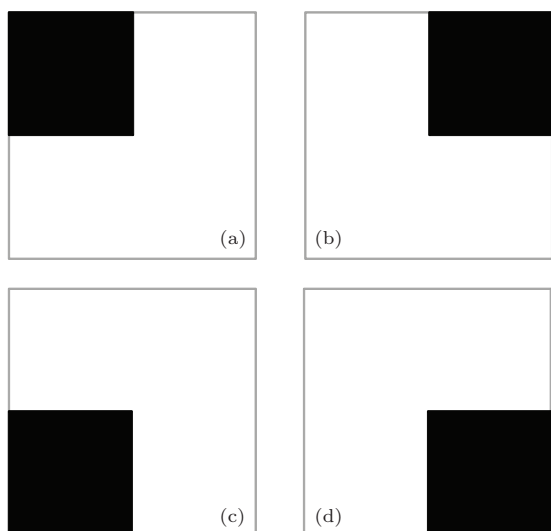


图2 所构建的4束照明光束复振幅 P_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 函数分布的可视化表示 (a) P_1 ; (b) P_2 ; (c) P_3 ; (d) P_4

用 f_0 表示样品的复振幅, 则样品被照明的4个部分的复振幅分别为 $P_1 f_0, P_2 f_0, P_3 f_0, P_4 f_0$. 样品

和旋转相位调制器的距离 z_1 处于菲涅耳域, 因此4个被照明部分到达旋转相位调制器的衍射分布为 $\text{FrT}_{z_1, \lambda}\{P_i f_0\}$ ($i = 1, 2, 3, 4$), $\text{FrT}_{z_1, \lambda}\{\cdot\}$ 表示波长为 λ 、衍射距离为 z_1 的菲涅耳变换.

旋转相位调制器分别对样品4个被照亮部分的衍射光相位进行调制, 具体而言, 对应于每一个照明光束, 将相位调制器旋转一个角度, 这样, 就对每一幅衍射图样匹配了一个确定的调制相位. 本文采用的匹配方法如图3所示: 调制器的4个1/4正方形部分各有一个相位, 蓝、红、绿、黄部分的相位依次为 $2\pi, 1.5\pi, \pi, 0$. 对应于照明光束 P_1, P_2, P_3, P_4 , 将调制器分别旋转 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$. 如果用 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 分别表示与照明光束 P_1, P_2, P_3, P_4 匹配的相位, 则经过相位调制器后, 4幅衍射图像的复振幅为 $\text{FrT}_{z_1, \lambda}\{P_i f_0\} \exp(j\varphi_i)$.

经相位调制后的衍射光到达探测面. 对应于 P_1, P_2, P_3, P_4 以及所匹配的相位 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, 探测器分别获得了4幅不同的衍射图样, 其强度分布用 I_{i0} ($i = 1, 2, 3, 4$) 表示. 探测面与相位调制器的距离 z_2 同样位于菲涅耳域, 这样, 衍射光传播到探测面时, 其复振幅为 $\text{FrT}_{z_2, \lambda}\{\text{FrT}_{z_1, \lambda}\{P_i f_0\} \exp(j\varphi_i)\}$. 根据测得的结果 I_{i0} 和理论推导, 可以得到如下方程:

$$I_{i0} = |\text{FrT}_{z_2, \lambda}\{\text{FrT}_{z_1, \lambda}\{P_i f_0\} \exp(j\varphi_i)\}|^2. \quad (1)$$

综上所述, 解出方程(1)中的未知量 f_0 , 也就重建了样品的复振幅. 直接通过解方程的方法求解

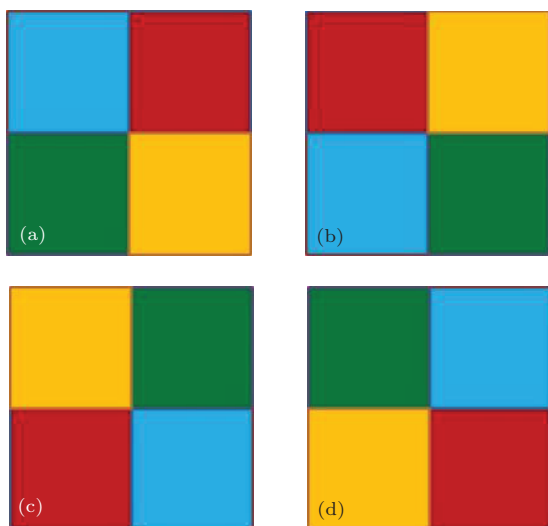


图3 (网刊彩色) 相位调制器的旋转方法 (a) 调制 P_1 的衍射光; (b) 调制 P_2 的衍射光; (c) 调制 P_3 的衍射光; (d) 调制 P_4 的衍射光

f_0 是极其困难的. 为此, 我们在叠层衍射成像算法框架下提出了旋转相位编码与照明光束匹配算法, 其步骤如下.

步骤1 首先将样品的复振幅初始化为 f_g , f_g 中包含有振幅项和相位项, 且两者都是均匀分布, 然后开始迭代.

步骤2 假设进行到第 k 次迭代时, 对于第 i 个照明光束, 由前面迭代得出的样品复振幅为 f_{ig}^k , 则基于上面的推导方法, 可得到此时被 P_i 照明的样品部分最终的衍射图样复振幅 D_{ig}^k 为

$$D_{ig}^k = \text{FrT}_{z_2, \lambda} \{ \text{FrT}_{z_1, \lambda} \{ P_i f_{ig}^k \} \exp(j\varphi_i) \}. \quad (2)$$

步骤3 用测量结果 I_{i0} 表示振幅, 用方程(2)的推导结果表示相位, 则探测面上的复振幅分布 D_i^k 为

$$D_i^k = (I_{i0})^{1/2} \frac{D_{ig}^k}{|D_{ig}^k|}. \quad (3)$$

步骤4 将步骤3中所得到的复振幅逆向返回样品表面, 即对传播过程应用菲涅耳逆变换, 经相位调制器时除以相位项, 得到样品表面复振幅 f_{igN}^k 如下:

$$f_{igN}^k = \text{FrT}_{z_1, \lambda}^{-1} \left\{ \frac{\text{FrT}_{z_2, \lambda}^{-1} \{ D_i^k \}}{\exp(j\varphi_i)} \right\}. \quad (4)$$

步骤5 利用下面的方程重新计算样品复振幅, 得到一个新的物函数 $f_{(i+1)g}^k$,

$$f_{(i+1)g}^k = f_{ig}^k + \beta \frac{P_i}{P_i + \alpha} (f_{igN}^k + P_i f_{ig}^k), \quad (5)$$

其中, α 和 β 是调节因子, α 是为了保证分母不等于零, β 是一个反馈参数, 用于迭代矫正.

步骤6 以 $f_{(i+1)g}^k$ 作为初始值, 对第 $i+1$ 个照明光束 P_{i+1} 进行步骤2到步骤5的计算, 然后对 P_{i+2} 进行计算, 依此类推, 直到将第四个照明光束的情况计算完毕.

步骤7 计算重建信息与原始样品信息的相关系数 C . C 是评价两个分布函数相似程度的量化指标, 取值范围为 $[0, 1]$, C 值越接近 1, 表明两个函数的分布形式越相近. C 的表达式为

$$C(f, f_0) = \text{cov}(f, f_0) (\sigma_f \sigma_{f_0})^{-1}, \quad (6)$$

其中, f 和 f_0 分别为重建信息和原始样品的复振幅, $\text{cov}(f, f_0)$ 为 f 和 f_0 的互协方差, σ 为标准差. 评价重建质量时需要分别计算振幅项相关系数值 C_a 和相位项相关系数值 C_φ .

步骤8 如果 C 值达到预期标准, 则此时恢复的复振幅就是我们所期望的重建信息; 如果 C 值未达到预期标准, 则将此时恢复的复振幅作为初始值, 进行下一轮迭代, 即对所有的 P_i 重新进行步骤2到步骤7的计算. 经多次迭代, 直到重建质量达到预期目标为止.

以上过程可用图4所示的算法框图说明.

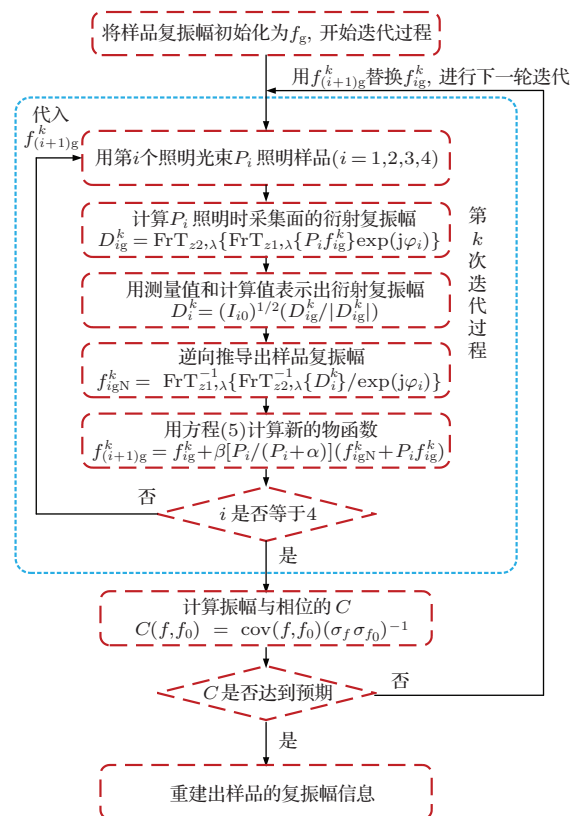


图4 基于旋转相位编码与照明光束匹配的叠层衍射成像算法框图

3 模拟实验与分析

通过模拟实验, 我们验证了该叠层衍射成像算法的可行性和有效性. 模拟所用的CPU型号为Intel i7-2600K. 分别采用“Lena”和“Baboon”作为样品的振幅信息和相位信息(图5), 有效采样点数均为 256×256 , 照明波长为632.8 nm, 模拟实验中采用2.2节所述的照明方式, 如图6所示. 利用4次照明过程, 在探测面获取了4幅衍射图样, 继而通过重建算法得到了物体的复振幅信息、 C 值等一系列模拟结果, 从而表明在信息重建的过程中, 该算法有收敛速度快、抗噪声能力强、抗位置偏差能力强等优势.



图5 样品的振幅和相位分布 (a) 样品的振幅分布; (b) 样品的相位分布



图6 模拟实验中所采用的照明方式 (a) 第一次照明 P_1 ; (b) 第二次照明 P_2 ; (c) 第三次照明 P_3 ; (d) 第四次照明 P_4

3.1 收敛速度快

该算法的收敛速度较快, 即重建样品至理想情况所需的迭代次数较少. 我们分别对光路中有无旋转相位调制器的情况进行了模拟, 迭代次数均为100次, 所获得的重建复振幅信息如图7所示. 由图7所示的重建结果可以直观地看出: 对于不加相

位调制器的情况, 通过100次迭代恢复的振幅和相位信息质量比较差; 而加入相位调制器时, 经过100次迭代所获得的振幅和相位信息的质量有了大幅度的提高, 直观上基本难以辨别恢复信息与原信息的区别.



图7 经100次迭代获得的重建复振幅 (a) 无相位调制器时, 重建的振幅; (b) 无相位调制器时, 重建的相位; (c) 有相位调制器时, 重建的振幅; (d) 有相位调制器, 重建的振幅

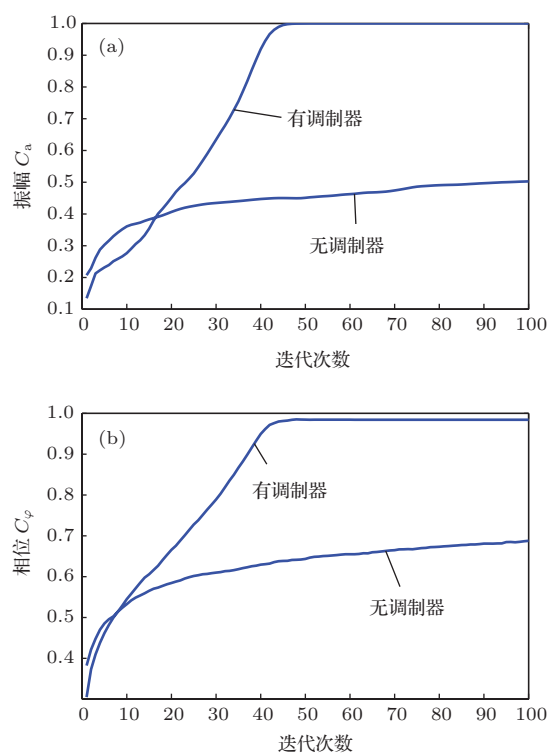


图8 C 值随迭代次数的变化 (a) 振幅相关系数值 C_a ; (b) 相位相关系数值 C_ϕ

同时, 我们分别研究了两种情况下振幅和相位的 C 值随迭代次数的变化, 结果如图 8 所示. 从 C 值来看: 不加相位调制器时, 100 次迭代仅仅使 C_a 值达到 0.5026, C_φ 值结果稍好, 但仅仅达到 0.6879; 而加入调制器后, 迭代计算进行到第 53 次时, C_a 和 C_φ 值均已达到稳定的最大值, 分别为 0.9999 和 0.9839. 增加前一种情况的迭代次数并进行计时, 发现需要大约 2000 次迭代, 用时 103.1 s 才能达到稳定值, 此时 C_a 和 C_φ 值分别为 0.6663 和 0.8218. 对后一种情况进行计时, 显示 53 次迭代仅用时 5.3 s. 以上模拟结果列于表 1. 对比表 1 中的数据, 可以证明该算法能够用很少的迭代次数高质量地重建样品信息.

3.2 抗噪声能力强

该算法有良好的抗噪声能力. 在实际应用中, 光路中的各种噪声最终都会体现在衍射图样上并

被测量, 而在该算法的迭代过程中衍射图样是惟一用到的测量值, 因此欲模拟实际情况, 只需要对衍射图样中的每个像素点引入一个随机噪声即可. 我们引入了取值在 $[0, 0.1]$ 的噪声, 并分别对有无旋转相位调制器的情况进行了模拟, 迭代次数分别为 1000 次和 10000 次, 重建复振幅信息如图 9 所示. 图 10 给出了前 1000 次迭代获得的 C 值的变化. 从图 9 所示的重建图像可以明显地看出: 不加调制器时, 即使迭代次数达到 10000 次, 重建结果仍然很差; 而加调制器时, 振幅和相位最终都能重建出较好的结果, 与原样品相比, 重建振幅多了一些噪点, 重建相位有少数斑点瑕疵存在. 从图 10 可以看出: 对于不加调制器的情况, 大约 100 次迭代后 C 值不再有急剧变化, 对比 10000 次迭代的数值结果, 发现 4000 次迭代后 C_a 和 C_φ 值均达到稳定值, 分别只有 0.3702 和 0.5683; 对于加调制器的情况, 迭代次数达到 350 次时, C_a 和 C_φ 值开始稳定于最大值,

表 1 有无旋转相位调制器时获得的重建结果对比

旋转相位 调制器	C (C_a 或 C_φ) 达到最 大所需迭代次数	C_a 的 最大值	C_φ 的 最大值	C (C_a 或 C_φ) 达到最 大所需迭代时间/s
无	2000	0.6663	0.8218	103.1
有	53	0.9999	0.9839	5.3

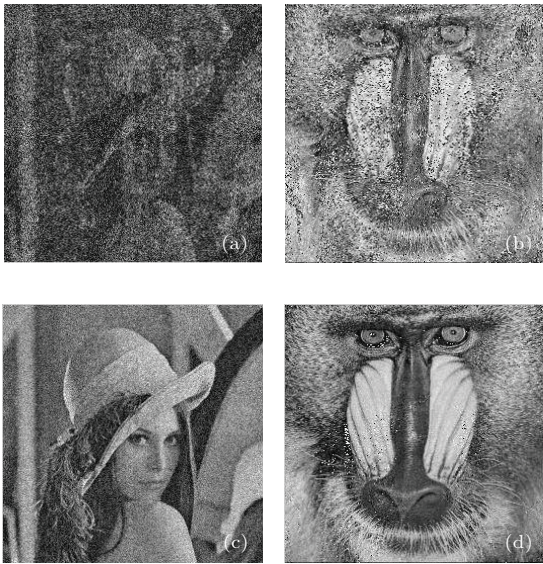


图 9 加噪声情况下获得的重建复振幅 (a) 加相位调制器, 重建的振幅; (b) 不加相位调制器, 重建的相位; (c) 加相位调制器, 重建的振幅; (d) 加相位调制器, 重建的相位

分别为 0.9059 和 0.9460, 计时显示前者 350 次迭代用时为 33.6 s. 以上数据列于表 2. 对比表 2 所列的数据, 可以证明在有外界噪声干扰情况下, 该算法

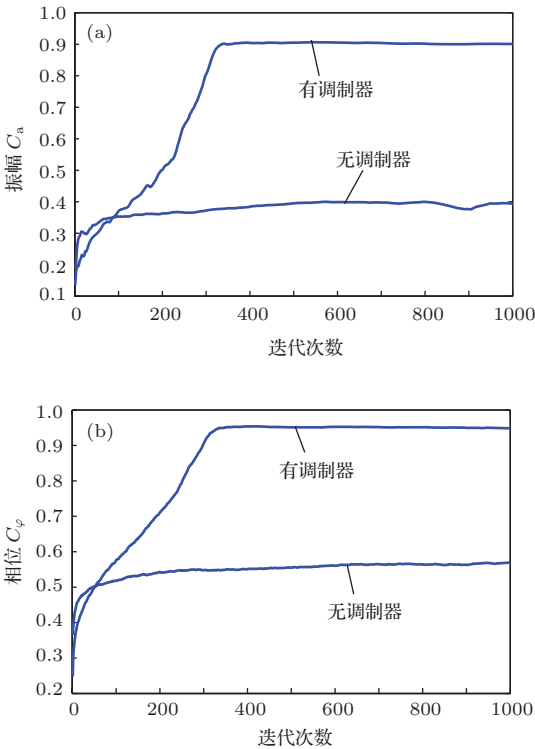


图 10 加噪声情况下 C 值随迭代次数的变化 (a) 振幅相关系数值 C_a ; (b) 相位相关系数值 C_φ

表2 加噪声情况下, 有无旋转相位调制器时获得的重建结果对比

旋转相位 调制器	C (C_a 或 C_φ) 达到 最大所需迭代次数	C_a 的 最大值	C_φ 的 最大值	C (C_a 或 C_φ) 达到最 大所需迭代时间/s
无	4000	0.3702	0.5683	—
有	350	0.9059	0.9460	33.6

能够有效地抑制噪声的影响, 并仍然能在较短的时间内用较少的迭代次数得到质量较高的重建信息.



图11 带有50像素偏移的照明方式 (a) 第一次照明 P_1 ; (b) 第二次照明 P_2 ; (c) 第三次照明 P_3 ; (d) 第四次照明 P_4

3.3 抗位置偏差能力强

该算法中的照明方式对照明光束位置偏差的影响有较强的抗干扰能力. 在实际应用中, 照明光束的位置与理论位置间难免产生微小的偏差, 影响照明范围的精确度, 从而影响到重建信息的质量. 如果采用方形光束照明^[17], 位置的偏差可能会影响整体照明范围及两两交叠条件, 从而使重建信息中出现暗色条纹、图像分裂等不好的结果. 本文所采用的3/4样品范围的照明方式, 两两交叠面积达到样品横截面积的1/2, 微小的偏差完全不会影响到上述条件的满足; 另外, 由于单次照明范围大, 即使位置偏差影响到某次照明范围, 受影响的区域也会被另一次照明过程照亮, 所以整体照明范围依然不受影响. 根据前述结论, 既然偏差没有影响两两交叠条件和整体照明范围, 则重建信息就可避免干扰. 模拟了4次照明都存在高达50像素的位置偏差(图11)的情况, 最终获得的重建信息和无偏差结

果(图7(b)和(d))完全一致.

4 结 论

本文提出了一种基于旋转相位编码与照明光束相匹配的叠层衍射成像算法. 模拟实验表明, 该算法能够快速并高质量地重建出样品的复振幅信息, 并具有较强的抵御噪声和照明光束位置偏差的能力. 这是由于在叠层成像算法框架中, 采用照明光束与旋转相位匹配的方式可以有效增加解的约束条件. 此外, 分块均匀分布的旋转相位调制器具有易于构建、相位信息易于确定的优点. 综上, 该算法拥有较强的实用性, 并为实时显微成像、超分辨率成像等叠层衍射成像的实际应用提供了新思路.

参考文献

- [1] Hoppe W 1969 *Acta Cryst. A* **25** 495
- [2] Hoppe W 1969 *Acta Cryst. A* **25** 508
- [3] Rodenburg J M, Faulkner H M L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4795
- [4] Faulkner H M L, Rodenburg J M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 023903
- [5] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G, Dobson B R, Pfeifer F, Bunk O, David C, Jeimovs K, Johnson I 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 034801
- [6] Thibault P, Dierolf M, Menzel A, Bunk O, David C, Pfeifer F 2008 *Science* **321** 379
- [7] Dierolf M, Menzel A, Thibault P, Schneider P, Kewish C M, Wepf R, Bunk O, Pfeifer F 2010 *Nature* **467** 436
- [8] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G 2007 *Ultramicroscopy* **107** 227
- [9] Maiden A M, Rodenburg J M, Humphry M J 2010 *Opt. Lett.* **35** 2585
- [10] Pan X C, Lin Q, Liu C, Zhu J Q 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 084216
- [11] Humphry M J, Kraus B, Hurst A C, Maiden A M, Rodenburg J M 2012 *Nat. Commun.* **3** 730
- [12] Fu J, Li P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014204
- [13] Shi Y S, Li T, Wang Y L, Gao Q K, Zhang S G, Li H S 2013 *Opt. Lett.* **38** 1425
- [14] 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

- [15] Shi Y S, Wang Y L, Zhang S G 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 054203
 [16] Wang Y L, Li T, Gao Q K, Zhang S G, Shi Y S 2013 *Opt. Eng.* **52** 091720

- [17] 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, 史伟诗, 李拓, 高乾坤, 肖俊, 张三国 2013 物理学报 **62** 064206]

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

Wang Zhi-Hao¹⁾²⁾ Wang Ya-Li¹⁾ Li Tuo¹⁾ Shi Yi-Shi¹⁾³⁾†

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

2) (Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

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

(Received 22 March 2014; revised manuscript received 4 April 2014)

Abstract

We propose a new ptychographical imaging algorithm based on illuminating beam cooperating with rotational phase encoding. Compared with the traditional ptychographical imaging, the proposed algorithm has a diffractive wave front that is encoded with the uniform phase modulator in a block. It leads to the faster convergent speed for the iterative algorithm of the ptychographical imaging. The illuminating method can present fantastic robustness to resist bad influences brought by the noise and transverse shift of probes. Compared with the random phase modulator, the rotated phase modulator introduced into our algorithm is convenient to be fabricated and located into the real configuration. Therefore, the proposed algorithm has a good value in practical applications such as real-time microscopy and superresolution imaging.

Keywords: ptychographical imaging algorithm, rotated phase encoding, matching illuminating beam

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

DOI: 10.7498/aps.63.164204

* 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, 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