

基于振幅分束调制的相位恢复成像技术

何西^{1,2}, 刘诚^{1*}, 朱健强^{1**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出一种分束调制技术来实现高精度单次曝光相位恢复成像, 将待测光束用二维光栅分成一组彼此相同的衍射光束簇, 并同时入射到一个结构已知的调制板上, 当调制板为弱衍射物体时, 在探测器上形成一组彼此相分离的衍射斑阵列。联合这些衍射光斑和弱衍射物体的透射函数, 可通过一次曝光迭代计算出待测量光束的强度和相位信息, 同时具有 Gergberg-Saxton 算法等单次曝光方法的成像速度快和相干叠层衍射成像算法等扫描成像技术的高信噪比和高精度等优点, 对 X 射线成像和高功率激光光束在线监测等领域有重要的实用价值。

关键词 成像系统; 相位恢复; 相干衍射成像; 光栅; 单次曝光

中图分类号 TP751.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0911002

Beam Splitting Amplitude Modulation Phase Retrieval Imaging

He Xi^{1,2}, Liu Cheng^{1*}, Zhu Jianqiang^{1**}

¹ National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A novel high-precision phase retrieval imaging method based on beam splitting amplitude modulation is proposed. The incident beam to be measured is split into many diffracted replicas by a two dimensional grating, and these diffracted beams are illuminated on a modulation plate with known structure. When the modulation plate is weakly scattered, the diffraction patterns formed on the detector are clearly separated with each other. Both the amplitude and phase of incident beam can be reconstructed iteratively by using the recorded diffraction patterns and the known structure of the modulation plate. This method has the high imaging speed of Gergberg-Saxton algorithm and the high precision of ptychographical iterative engine and potentially can be applied for X-ray imaging and online detection of high power laser.

Key words imaging systems; phase retrieval; coherent diffraction imaging; grating; single shot

OCIS codes 110.1650; 100.5070; 110.1758

1 引 言

显微成像系统的分辨空间能力和系统的数值孔径成正比和所用的波长成反比^[1], 光学显微镜的理论分辨率可达亚微米量级^[2], X 射线显微镜的理论分辨能力在纳米量级^[3], 高能电子束的理论分辨率可达亚埃量级^[4], 因此对于生物医学和材料学等领域, X 射线显微镜和高能电子束显微镜比光学显微镜具有更大的吸引力。但由于高质量成像元件的缺乏^[5], X 射线成像所用的波带片存在大口径加工困难和多级衍射能量损失等问题^[6], 电子束成像所用

的磁透镜的球差较为严重^[7], 所以到目前为止 X 射线和电子束显微镜实际所达到的分辨率远远低于相应的理论极限值。例如 200 kV 电子束的波长为 0.0025 nm^[8], 但国际上实际实现的最好分辨率都仅仅在亚纳米量级, 比理论极限低两个数量级。为了克服短波长成像领域高质量光学元件缺乏的问题, 无透镜显微成像技术一直得到广泛关注和大量研究。作为无透镜成像典型代表的全息成像技术是 Gabor^[9]为克服磁透镜球差在 1947 年提出的, 其采用干涉的方法获取物体衍射斑的强度和相位, 从而重建出物体的空间分布信息, 但由于需要使用规整

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-03-26; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61675215)

* E-mail: Cheng.liu@hotmail.co.uk; ** E-mail: jqzhu@siom.ac.cn

的参考光束,实际并不能完全抛开对高质量光学元件的依赖。Hoppe 等^[10]于 1969 年所提出相干衍射成像(CDI)技术,采用迭代算法计算出所记录衍射光斑的相位,从而反演重建出物体的空间分布,它完全不需要透镜等复杂元件,理论上能够获得衍射极限的空间分辨率。实现 CDI 的具体算法很多,具体包括 Gergberg-Saxton 的 G-S 算法^[11]、杨国帧和顾本源的杨-顾算法^[12]、Fienup^[13-14]的混合输入-输出(HIO)算法和误差下降(ER)算法,以及多波长梯度相位恢复算法^[15]等。这些传统 CDI 技术的共同优点是可以通过单次曝光重建出待成像光束的强度和相位,缺点是由于只记录一幅或几幅光斑,总的已知信息量有限,重建精度和速度都不太理想。2004 年, Faulkner 等^[16-18]将传统 Ptychography 和 CDI 技术相结合提出相干叠层衍射成像(PIE)算法,成为 CDI 领域的重要技术突破。PIE 算法利用局域照明光束对待测物体进行横向扫描并同时记录相应的列衍射光斑,所记录光斑的总数可达数百幅,由于信息冗余度大大提高,PIE 算法具有收敛速度快、图像质量高、视场不受限制和对样品没有特殊要求等突出优点^[19]。但这些优点是以增加数据采集时间为代价的,过长的数据采集时间要求成像系统必须具有非常高的稳定性,系统的振动、光源参数的变化和气流的扰动都会引起图像质量的下降,而且在测量高功率激光束和用激光高次谐波产生的 X 射线进行成像时,被成像光束往往只是一个单脉冲,不可能采用扫描方式记录数据。因此研究单次曝光相位恢复成像技术有着较为重要的现实意义。我们曾提出基于二维光栅分光方法的 PIE^[20],将互相交叠的衍射光束照射在待测样品上,并保证各个子光束之间彼此有一定重叠,CCD 单次曝光记录 PIE 所需全部数据。2016 年, Cohen 等^[21]提出将小孔阵列置于 $4f$ 系统前焦面,在 $4f$ 系统共焦点附近获得互

相交叠的照明光阵列,通过置于 $4f$ 系统后焦面的 CCD 经过单次曝光获得 PIE 所需全数据。这两种方法本质上都是用光束的空间分布来代替传统 PIE 的扫描,确实可以实现高质量单次曝光成像,但由于既要保证各子光束的特性完全一样,还要同时做到样品面上彼此之间有合适比例的重叠而在探测器面上又彼此完全分开,不但成像系统较标准的 PIE 复杂很多而且调节难度很大,很难实际应用于短波长成像。为此,本文提出一种复振幅分束调制的单次曝光高精度相位恢复成像方法,待测光束入射到二维达曼光栅衍射为数十束,然后这些衍射光束簇穿过一个弱衍射物体,所形成的衍射光斑阵列被后面一定距离处的 CCD 记录,利用弱衍射物体的透射函数以及所记录的衍射光斑强度,在给定达曼光栅平面上入射光束一个初始猜测值后,由菲涅耳衍射积分将初始猜测光束在记录平面、弱衍射物体平面和达曼光栅平面之间往复传播并进行迭代计算,即可重建出达曼光栅表面的入射光,并在此基础上反演重建出样品的透射光强度和相位。和原有的光栅分光法相比,本文方法将在原来放置样品的位置放置一个已知结构的弱散射板,而将待成像样品放置于光栅前面。这样,在已知结构的弱衍射调制板表面各子光束之间不再需要重叠,从而很容易避免所记录的各子衍射光斑之间的重叠影响,不仅可以减小重建的噪声,而且大大简化了光路,使光栅分光技术更适合短波长成像的实际需要。

2 基本原理

本文方法的基本原理如图 1 所示。一近似平行的光束穿过待成像样品后,被其后面一定距离处的达曼光栅分成 $M \times N$ 束,各衍射光束传播一定距离后照射到光栅后面的一个弱衍射物体的不同部分,并在强度和相位上受到调制而在记录平面上形成衍

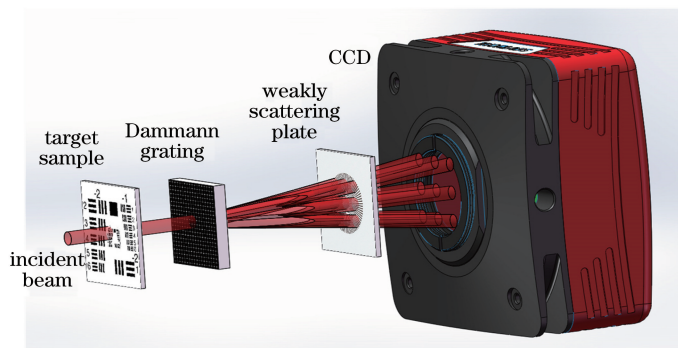


图 1 编码分束相位恢复成像基本原理图

Fig. 1 Schematic of beam splitting modulation phase retrieval

射光斑阵列。若衍射调制板的衍射能力较弱,透射光束大体上仍然沿着原来的方向继续传播,光栅与已知弱衍射物体之间的距离 L_1 足够长,弱衍射物体后的 CCD 将可以记录到一组相互分开的互不相同的衍射光斑阵列。根据文献[20]可知,如果光栅与弱衍射物体的距离合适且弱衍射物体上的照明光已知,则可由记录的衍射光斑重建出弱衍射物体的分布,反之若弱衍射物体的分布已知,则可以重建出衍射物体上照明光的分布。图 1 中被测量样品的信息被包含在光栅的照明光中,同时由于调制板的透射函数已知,照射其表面的各个子光束之间不需要有彼此重叠,因此光路安排更为简单。严格的来说,图 1 所示的光路已经不是 PIE 成像技术,而是分幅调制成像(BSMI)技术,与原光栅分光技术存在根本的区别,图 1 中的调制板必须是弱散射物体,否则探测面上所形成的衍射光斑间将发生彼此重叠,因此其技术上和利用强散射调制的相干调制成像(CMI)^[22]技术也有所不同。

假设已知弱衍射物体的分布为 P ,光栅具有 $M \times N$ 个衍射级,分别为光栅的第 $(1,1), (1,2), \dots, (m,n), \dots, (M,N)$ 衍射级,各个衍射级的复振幅为 $Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{mn}, \dots, Q_{MN}$,光栅与已知弱衍射物体之间的距离为 L_1 ,已知弱衍射物体与 CCD 之间的距离为 L_2 ,CCD 上记录的光斑个数为 $M \times N$,各个衍射光斑的光强为 $I_{m,n} (m=1, \dots, M, n=1, \dots, N)$,在迭代恢复过程中给光栅前入射光束的复振幅一个初始猜测 $\varphi_{k,m,n}$,第 k 次迭代过程如下。

1) 根据衍射理论,光栅前入射光束 $\varphi_{k,m,n}$ 会传播到弱衍射物体处,当入射光经过光栅第 (m,n) 级复振幅后的出射光束为 $\varphi_{k,m,n} Q_{mn}$,根据菲涅耳衍射理论可算出弱衍射物体前的光束复振幅为 $\varphi_{k,m,n} = \mathfrak{S}(\varphi_{k,m,n} Q_{mn}, L_1)$,其中 \mathfrak{S} 代表菲涅耳传播过程,弱衍射物体后的出射光束为 $\psi_{k,m,n} = \varphi_{k,m,n} P$ 。

2) 根据衍射理论计算 CCD 靶面上第 (m,n) 个衍射斑的复振幅分布 $\Psi_{k,m,n} = \mathfrak{S}(\psi_{k,m,n}, L_2)$ 。

3) 由 CCD 上记录的第 (m,n) 个衍射斑的光强 $I_{m,n}$,对 $\Psi_{k,m,n}$ 进行振幅代换,即保持 $\Psi_{k,m,n}$ 相位不变,振幅替换为 $\sqrt{I_{m,n}}$,更新后的 CCD 靶面上的衍射斑复振幅为 $\Psi'_{k,m,n} = \sqrt{I_{m,n}} \exp(j\gamma_{m,n})$,其中 $\gamma_{m,n}$

为 $\Psi_{k,m,n}$ 的相位。

4) 将 $\Psi'_{k,m,n}$ 逆传回弱衍射物体平面得到更新后的出射光复振幅 $\phi'_{k,m,n} = \mathfrak{S}^{-1}(\Psi'_{k,m,n}, L_2)$,其中 \mathfrak{S}^{-1} 代表反向菲涅耳传播过程。并对弱衍射样品上入射光束进行更新,更新公式为

$$\phi'_{k,m,n} = \phi_{k,m,n} + \frac{|P|}{|P|_{\max}} \frac{\text{conj}(P)}{|P|^2 + \alpha} (\phi'_{k,m,n} - \phi_{k,m,n}), \quad (1)$$

式中 α 为常数,用来抑制噪声,在这里 $\alpha=1$ 。

5) 将 $\phi'_{k,m,n}$ 逆传回光栅平面,得到一个新的光栅平面处出射光复振幅 $R_{k,m,n} = \mathfrak{S}^{-1}(\phi'_{k,m,n}, L_1)$,并对光栅前入射光复振幅 $\varphi_{k,m,n}$ 进行更新,更新公式为

$$\varphi'_{k,m,n} = \varphi_{k,m,n} + \frac{|Q_{mn}|}{|Q_{mn}|_{\max}} \frac{\text{conj}(Q_{mn})}{|Q_{mn}|^2 + \alpha} (R_{k,m,n} - \varphi_{k,m,n} * Q_{mn}). \quad (2)$$

6) 令 $\varphi_{k,m+1,n} = \varphi'_{k,m,n}, \varphi_{k,m+1,n}$ 作为下次循环的初始值,在下次循环中 $\varphi_{k,m+1,n}$ 经过光栅的第 $(m+1,n)$ 级复振幅 $Q_{m+1,n}$,并在步骤 3) 中用第 $(m+1,n)$ 个衍射斑的光强 $I_{m+1,n}$ 进行振幅替换,重复步骤 1) 到 6),直到 CCD 所记录的光斑均完成迭代,此时一次迭代完成,并令 $\varphi_{k+1,1,1} = \varphi'_{k,M,N}$,进行下一次迭代。

7) 根据误差计算公式 $E_k = \frac{\sum_{m,n} |\sqrt{I_{m,n}} - |\Psi_{k,m,n}||^2}{\sum_{m,n} I_{m,n}}$ 计算每次迭代的误差,当误差足够小或每次迭代后误差变化很小时,则终止迭代,将最终得到的光栅前的入射光复振幅由菲涅耳衍射反向传播到待测物体平面即得到待测物体出射光的振幅和相位。

3 数值模拟

为验证上述方法的可行性,进行了计算机模拟验证,假设待测样品具有如图 2(a) 和 (b) 所示的振幅和相位,其中振幅的分布范围为 $0 \sim 1$,相位的分布范围为 $0 \sim \pi$ 。为保证 CCD 所记录的衍射光斑之间互不重叠,需根据 CCD 靶面大小选择合适的入射光束直径,假设入射光束为高斯光束且直径为 1.8 mm ,入射光束经过待测样品后的出射光束如图 2(c) 和 (d) 所示。为保证光栅的各级次衍射光强、光斑分布基本相同,假设光栅的衍射级次为 5×5 ,其透射率为

$$Q(x,y) = \left[0.25 + \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{1}{a}x\right) + \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{1}{2a}x\right) \right] \left[0.25 + \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{1}{a}y\right) + \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{1}{2a}y\right) \right]. \quad (3)$$

已知弱衍射物体的振幅和相位如图 3(a)和(b)所示,其振幅分布范围为 0~1,相位分布范围为 0~ π 。为和实验的参数一致假设 CCD 靶面的像元大小为 9 μm ,像素个数为 2672 \times 2672,激光波长为 632.8 nm。待测物体和光栅的距离为 20 mm,光栅

和已知弱衍射物体的距离为 250 mm,已知弱衍射物体和 CCD 的距离为 70 mm,入射光束依次经过待测物体和光栅后照射在已知衍射物体上的光斑如图 3(c)所示,可以看出照射在已知衍射物体上的衍射斑互相分开,互相独立。

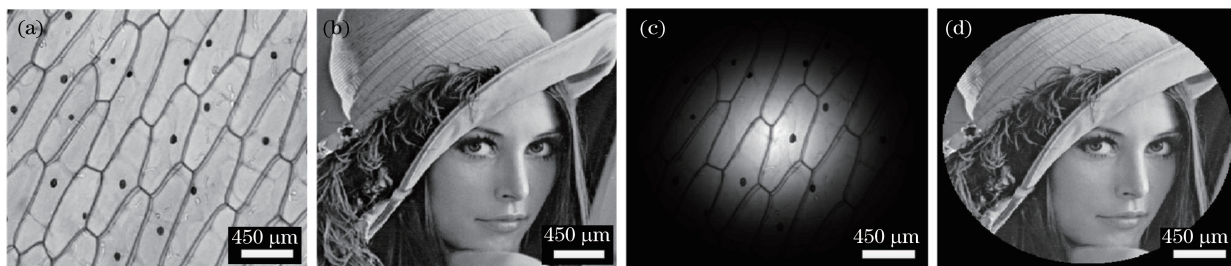


图 2 待测样品(a)振幅和(b)相位;待测样品出射光(c)振幅和(d)相位

Fig. 2 (a) Amplitude and (b) phase of target sample; (c) amplitude and (d) phase of output beam of target sample

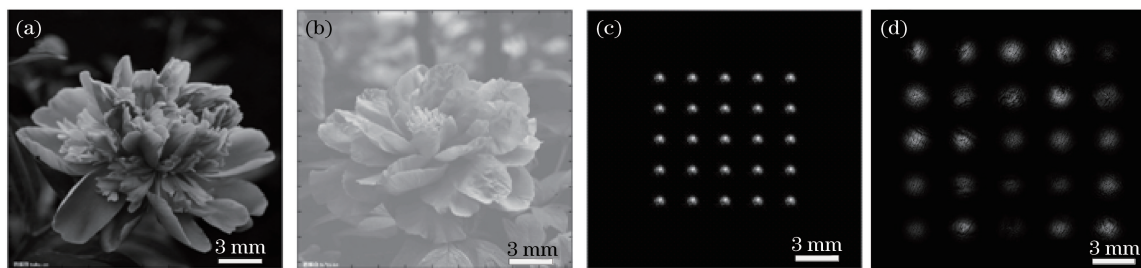


图 3 弱衍射物体(a)振幅和(b)相位;(c)入射光束经过待测物体和光栅后在弱衍射物体上形成的照明光;(d) CCD 靶面上形成的最终衍射斑

Fig. 3 (a) Amplitude and (b) phase of weakly scattering plate; (c) incident beam pass through target sample and grating form the illuminating beam on weakly scattering specimen; (d) final diffraction patterns on CCD chip

衍射光斑经过已知弱衍射物体后在 CCD 靶面上形成的最终衍射斑如图 3(d)所示。由于这些衍射斑是由弱衍射物体上不同位置衍射形成,故各个衍射光斑均不相同,每个衍射斑对应着对于入射光束的不同的调制。把每个不同编码调制的衍射光斑的强度和光栅弱衍射物体的分布代入到上述迭代算法中。经过 200 次迭代后,恢复出待测样品出射波的振幅和相位如图 4(a)和(b)所示,可

以看出,该方法能够完整地恢复出待测样品出射光的振幅和相位。由误差公式计算得出迭代误差与迭代次数的关系如图 4(c)所示,经过 20 次迭代后,误差已小于 1%,而在 CMI 方法^[22-23]的数值模拟中最快的收敛条件下也要经过 50 次迭代后达到收敛。并且在 CMI 的实验中^[24-26]要经过 300 次迭代后,误差才小于 10%,相比之下该方法具有较快的收敛速度。



图 4 恢复待测物体出射光的(a)振幅和(b)相位;(c)迭代误差随迭代次数变化曲线

Fig. 4 Reconstructed (a) amplitude and (b) phase of target sample; (c) curve of iteration error changed with iteration times

为了比较恢复过程中参与迭代的衍射斑个数对于恢复结果的影响,特在 CCD 上记录的衍射斑强度中加入 6 dB 的高斯白噪声,分别模拟了当光栅级次为 3×3 , 4×4 和 5×5 时,恢复待测样品出射光分布的情况并分别计算误差随迭代次数变化曲线,结果如图 5 所示。由于高斯白噪声的加入,恢复待测样品出射光的振幅和相位信息中含有不同程度的噪声,光栅级次为 3×3 时,恢复的相位分布中含有的噪声明显比光栅级次为 4×4 和 5×5 时要多,且随着参与迭代的衍射斑个数的减少,恢复的相位分布中噪声逐渐增多,恢复质量逐渐

变差。由误差与迭代次数的曲线可以看出,同样经过 30 次迭代后,光栅级次为 5×5 时误差已达到 0.29%,而当光栅级次为 3×3 时误差为 0.84%,光栅级次为 4×4 时误差为 0.52%,均比光栅级次为 5×5 的要高。当迭代次数为 180 次时,光栅级次为 5×5 时最终误差稳定在 0.29%;光栅级次为 4×4 时最终误差稳定在 0.51%,而光栅级次为 3×3 时误差为 0.82%。因此参与迭代的光斑数越多,计算收敛时误差越小,收敛速度越快,在实验中必须尽可能采集更多的衍射光斑参与迭代重建,以提高重建精度和重建速度。

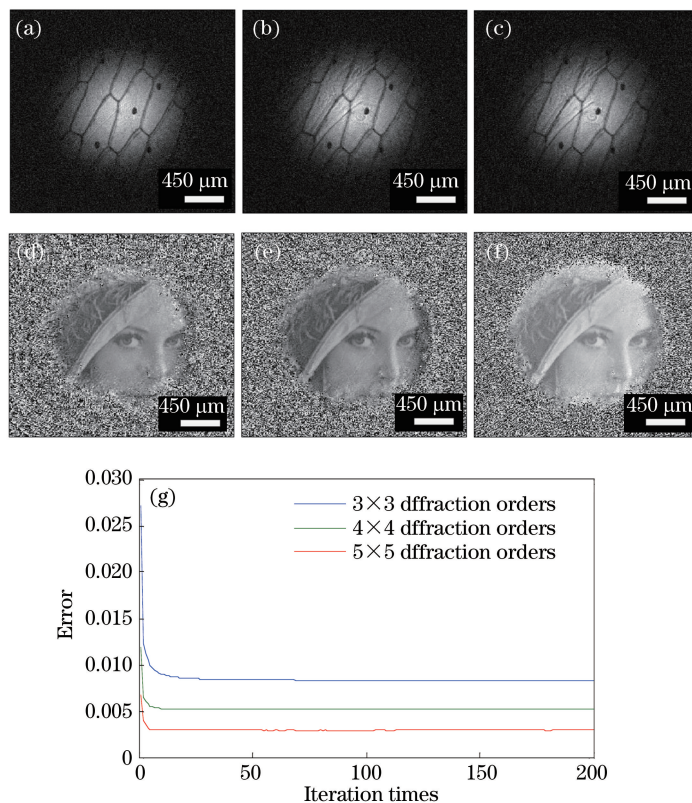


图 5 光栅衍射级次为 3×3 时恢复待测物体出射光的 (a) 振幅和 (b) 相位; 光栅衍射级次为 4×4 时恢复待测物体出射光的 (c) 振幅和 (d) 相位; 光栅衍射级次为 5×5 时恢复待测物体出射光的 (e) 振幅和 (f) 相位; (g) 光栅衍射级次分别为 3×3 , 4×4 , 5×5 时误差随迭代次数变化的曲线

Fig. 5 Reconstructed (a) amplitude and (b) phase of output beam when the grating has 3×3 diffraction orders; reconstructed (c) amplitude and (d) phase of output beam when the grating has 4×4 diffraction orders; reconstructed (e) amplitude and (f) phase of output beam when the grating has 5×5 diffraction orders; (g) curve of iteration error changed with iteration times when the diffraction grating has 3×3 , 4×4 , 5×5 diffraction orders respectively

在实际实验过程中,弱衍射物体的实际位置和预设位置之间可能会存在一定的偏差。但和普通 PIE 成像相同,这种位置偏差仅仅会在最后的重建结果中产生一个相位倾斜因子 $\tan \theta$,其大小由偏移量 δ 和衍射物到 CCD 的距离 L 决定,即 $\tan \theta = \delta/L$ 。为了分析这种情况,在模拟过程中,使弱衍射物体相对于

理想位置向下偏移 100 pixel,向右偏移 100 pixel,记录得到的衍射斑如图 6(a)所示,恢复待测样品出射光的振幅和相位如图 6(b)和(c)所示。可以看出,由于弱衍射物体位置的偏移,导致实际记录的衍射斑[图 6(a)]与预期记录的衍射斑[图 3(d)]不同,而当迭代恢复过程中使用理想位置时,恢复出的相位图 6(c)带

有倾斜因子,但振幅信息不受任何影响。在光学测量中相位分布的倾斜因子仅代表光束传播方向发生了改变,并不对相位分布产生任何影响,而且这个倾斜因子可以通过软件自动识别的方法直接纠正,最简单

的纠正方法是将带有倾斜因子的复振幅做傅里叶变换,并将频谱移到中心位置,然后再做傅里叶逆变换。图 6(d)是利用这种方法对图 6(c)进行纠正的结果,其和图 4(b)相比没有任何区别。

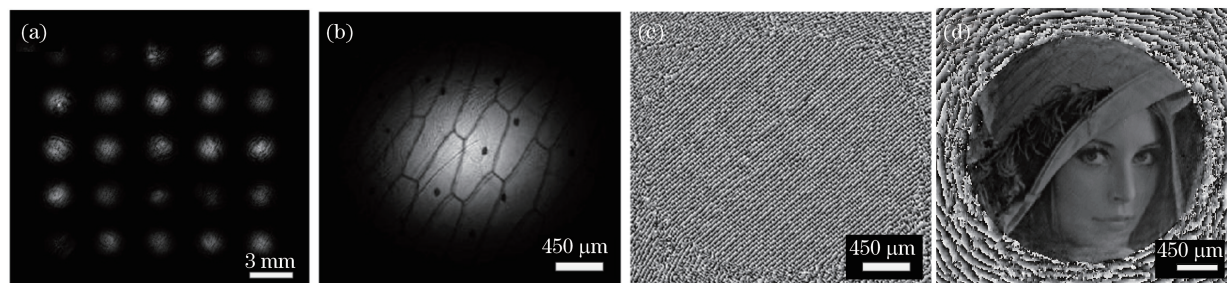


图 6 (a)弱衍射物体存在位置误差时的衍射光斑;待测样品出射光的(b)振幅和(c)相位;

(d)采用软件自动识别和纠正后得到的相位分布

Fig. 6 (a) Final recorded diffraction patterns when the weakly scattering plate has position error; reconstructed (b) amplitude and (c) phase of output beam of target sample; (d) phase distribution automatically identified and corrected by software

现实成像中 CCD 记录的衍射光斑会不可避免地存在噪声,为了比较不同大小的噪声对于恢复结果的影响,在图 3(d)中对 CCD 记录的衍射光斑分别加上 0.1 dB,0.5 dB,1 dB,5 dB,10 dB 的噪声,进行迭代恢复并计算误差随迭代次数变化曲线,恢复结果如图 7 所示,当噪声为 0.1 dB 和 0.5 dB 时,迭代误差分别收敛于 17.74% 和 16.89%,且恢复样品的复振幅周围含有很多噪声,使得视场变小,但中心部分还是能得到完整的恢复;当噪声为 1 dB 时,迭代误差收敛于 15.81%,此时恢复样品复振幅中噪声有所减小,但与原样品相比还存在很多噪声;当所加噪声为 5 dB 和 10 dB 时,迭代误差分别收敛于 8.65% 和 3.62%,此时恢复样品复振幅中噪声大幅度减小,视场也进一步扩大。因此,随着衍射斑所加噪声的增加,最终迭代误差会逐渐增加,但本文算法仍具有很高的抗噪性,即使所加噪声为 0.1 dB 和 0.5 dB 时,仍能完整恢复样品的中心部分。

当弱衍射物体存在相位误差 $\exp(i\varphi_1)$ 时,则在迭代过程中由 CCD 记录面回传到弱衍射物体上的光束复振幅,在除去弱衍射物体分布后,会带有相位误差 $A\exp[i(\varphi_0 - \varphi_1)]$,其中 φ_0 为光束不带误差时的相位,当此带有相位误差的光束复振幅由菲涅耳衍射积分传播到物体平面时,由于菲涅耳衍射可看成是傅里叶变换,此时 $\mathcal{F}\{A\exp[i(\varphi_0 - \varphi_1)]\} = \mathcal{F}\{A\exp(i\varphi_0)\exp(-i\varphi_1)\}$ 可看成是 $\mathcal{F}\{A\exp(i\varphi_0)\}$ 和 $\mathcal{F}\{A\exp(-i\varphi_1)\}$ 的卷积。由于 $\mathcal{F}\{A\exp(-i\varphi_1)\}$ 的

卷积作用,使得恢复样品的复振幅 $\mathcal{F}\{A\exp(i\varphi_0)\}$ 成像质量下降,因此,弱衍射物体具有的相位误差会导致恢复样品图像质量的下降。

当样品不是平面物体时,由于本文算法中恢复的是待测平面样品的透射光复振幅,因此,可以将迭代恢复出的光栅前入射光复振幅由反向菲涅耳衍射传播到三维物体所在位置不同距离处,恢复出不同轴向距离处的样品平面信息,此时处于正确传播距离处的样品平面成清晰对焦的像,而不在同一平面的样品信息将处于离焦状态,成不对焦模糊的像。以图 8(a)和(b)所示两个相距 2 mm 的互不交错的平面物体代替三维物体,由迭代算法恢复出光栅前入射光的复振幅,并将恢复结果由菲涅耳衍射积分反向传播到两个物体所在的不同的平面,恢复结果如图 8(c)和(d)所示,可以看出,根据菲涅耳衍射积分传播距离不同,可逐个恢复出不同平面处的样品信息,并且当菲涅耳衍射积分反向传播到“A”物体所在的平面时,“A”物体可以得到清晰的像,“B”物体由于在后一平面而处于离焦状态成模糊的像,当菲涅耳衍射积分反向传播到“B”物体所在的平面时,“B”物体可以得到清晰的像,而“A”物体处于离焦状态。因此对于不是平面物体的样品,可以将迭代恢复出的光栅前入射光复振幅,由反向菲涅耳衍射传播到不同距离处,恢复出不同轴向距离处的样品平面信息,此时不在同一平面的样品平面信息将处于离焦状态。

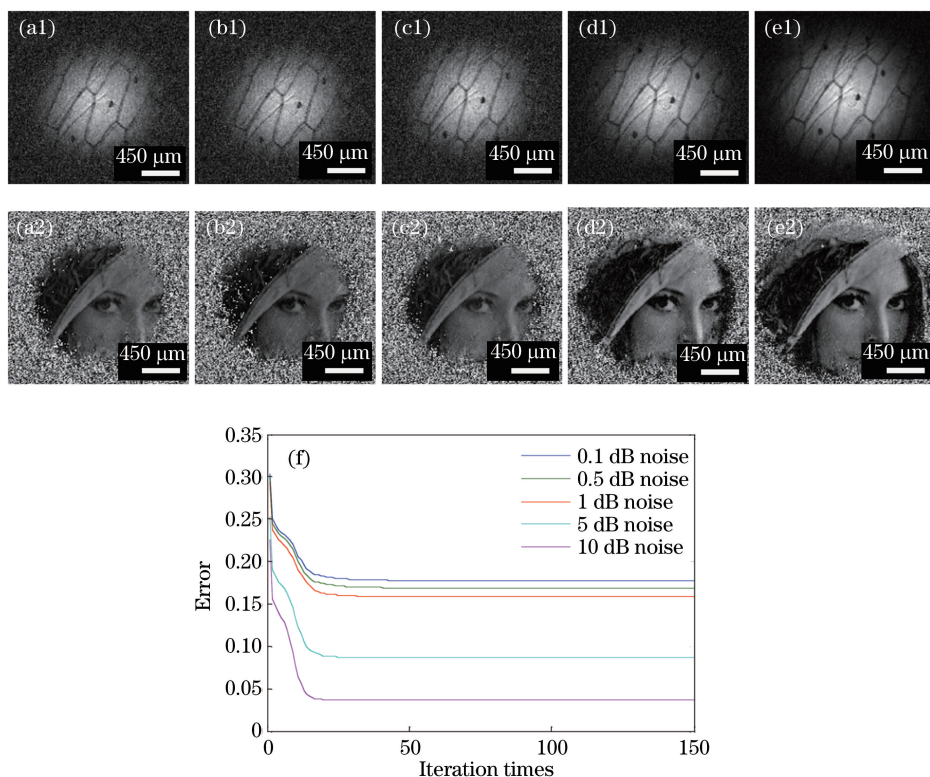


图 7 CCD 记录衍射斑上添加不同噪声时恢复出待测样品的
(a1)~(e1)振幅和(a2)~(e2)相位;(f)误差随迭代次数变化的曲线

Fig. 7 (a1)-(e1) amplitude and (a2)-(e2) phase of target sample reconstructed from the recorded diffraction patterns with different noises; (f) curves of error changed with iteration times

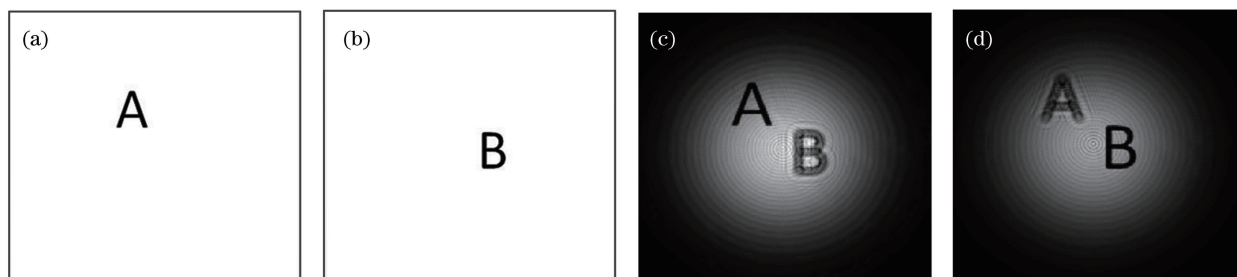


图 8 (a)(b)两个相距为 2 mm 的互不交错的平面物体代替三维物体;

(c)(d)迭代恢复出的达曼光栅前入射光复振幅由菲涅耳衍射积分反传到(a)物体和(b)物体所在的平面得到的振幅分布

Fig. 8 (a)(b) Two non-overlapping plane objects at a distance of 2 mm represent a three-dimensional object;

(c)(d) amplitude of the reconstructed complex field of incident beam on the Damman grating propagate back to the plane of (a) object and (b) object by Fresnel diffraction

为了验证算法的迭代性是否会随物体的复杂性而改变,选取 5 个复杂性逐渐增加的待测样品进行恢复模拟,并计算相应的误差随迭代次数变化曲线,恢复结果如图 9(a)~(f)所示,可以看出,图 9(a)~(e)所示的“A”、“AB”、“ABC”、“ABCD”、“cell”物体结构逐渐变复杂,经过 35 次迭代后误差分别收敛于

0.32%,0.52%,0.63%,0.79%,0.97%,因此随着物体复杂性的增加,迭代算法的最终收敛误差逐渐增大,而算法的收敛速率基本变化不大。由图 9(f)和图 5(g)可以看出,本文算法收敛性取决于单次曝光记录及所用衍射斑个数和物体的复杂程度,参与迭代的衍射斑越多,待测物体越简单,算法最终收敛误差越小。

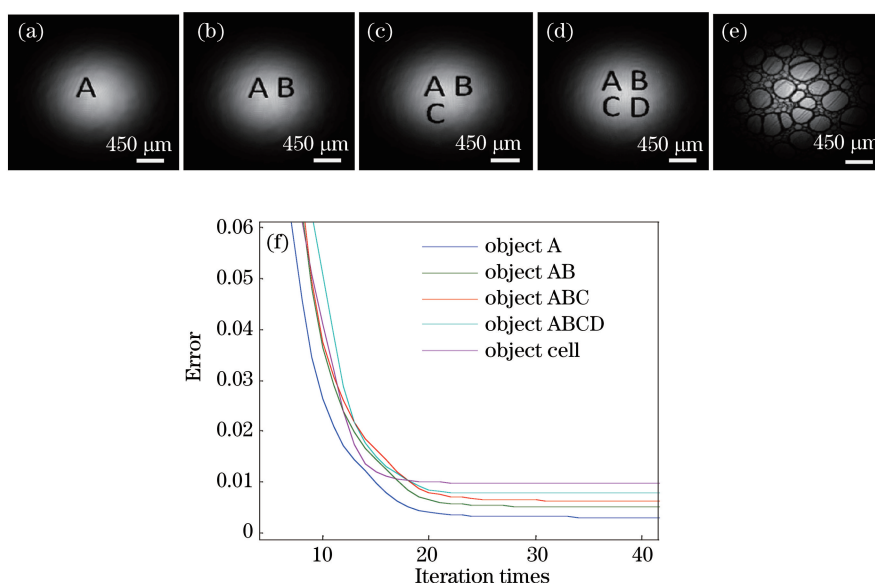


图 9 (a)恢复物体“A”的振幅;(b)恢复物体“AB”的振幅;(c)恢复物体“ABC”的振幅;
(d)恢复物体“ABCD”的振幅;(e)恢复物体“cell”的振幅;(f)由迭代算法恢复(a)~(e)得到的误差随迭代次数变化曲线

Fig. 9 (a) Reconstructed amplitude of object A; (b) reconstructed amplitude of object AB;
(c) reconstructed amplitude of object ABC; (d) reconstructed amplitude of object ABCD;
(e) reconstructed amplitude of object cell; (f) curves of iterative error changed with the iteration times when reconstructing (a)~(e)

4 结 论

提出一种基于编码分束的单次曝光相位恢复成像方法,该方法将待测样品出射光束经过二维光栅分束后,使分束光束同时分别经过已知弱衍射物体上不同位置得到不同的衍射斑,通过 CCD 单次曝光记录这些不同的衍射斑阵列,随后将所记录的衍射斑强度和已知衍射物体,光栅的分布带入到迭代算法中,可恢复出待测样品的振幅和相位,该方法具有较快的收敛速度和较高的收敛精度。本文方法与其他单次曝光 PIE 方法相比,由于照射在已知弱衍射物体上的光斑互相分开,因此不仅可使各个光斑之间重叠的影响降至最小,还大幅度减小了实验装置的复杂性,从而使波前分束编码成像技术更适应 X 射线和电子束等短波长成像的技术需求。

参 考 文 献

- [1] Mccutchen C W. Superresolution in microscopy and the Abbe resolution limit[J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(10): 1190-1192.
- [2] Vainrub A, Pustovyy O, Vodyanov V. Resolution of 90 nm ($\lambda/5$) in an optical transmission microscope with an annular condenser [J]. Optics Letters, 2006, 31(19): 2855-2857.
- [3] Pelliccia D, Sorrentino A, Bukreeva I, *et al.* X-ray phase contrast microscopy at 300 nm resolution with laboratory sources [J]. Optics Express, 2010, 18 (15): 15998-16004.
- [4] Erni R, Rossell M D, Kisielowski C, *et al.* Atomic-resolution imaging with a sub-50-pm electron probe [J]. Physical Review Letters, 2009, 102 (9): 096101.
- [5] Schroer C G. Focusing hard X-rays to nanometer dimensions using Fresnel zone plates [J]. Physical Review B, 2006, 74(3): 033405.
- [6] Maser J, Stephenson G B, Vogt S, *et al.* Multilayer Laue lenses as high-resolution X-ray optics [C]. Design and Microfabrication of Novel X-Ray Optics II, 2004: 185-194.
- [7] Haider M, Uhlemann S, Schwan E, *et al.* Electron microscopy image enhanced [J]. Nature, 1998, 392 (392): 768-769.
- [8] Inami W, Nakajima K, Miyakawa A, *et al.* Electron beam excitation assisted optical microscope with ultra-high resolution [J]. Optics Express, 2010, 18 (12): 12897-12902.
- [9] Gabor D. A new microscope principle [J]. Nature, 1948, 161: 777-778.
- [10] Hoppe W, Strube G. Beugung in inhomogenen Primärstrahlenwellenfeld. II. Lichtoptische Analogieversuche zur Phasenmessung von

- Gitterinterferenzen [J]. Acta Crystallographica, 1969, 25(4): 502-507.
- [11] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35:237-250.
- [12] Yang G Z, Gu B Y. On the amplitude-phase retrieval problem in optical systems[J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(3): 410-413.
杨国桢, 顾本源. 光学系统中振幅和相位的恢复问题[J]. 物理学报, 1981, 30(3): 410-413.
- [13] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. Optics Letters, 1978, 3(1): 27-29.
- [14] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [15] Zhao Y, Gao Z S, Dou J T, *et al.* A multi-wavelength gradient acceleration phase retrieval iterative algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0109001.
赵彦, 高志山, 窦建泰, 等. 一种多波长梯度加速相位恢复迭代算法 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0109001.
- [16] Faulkner H M, Rodenburg J M. Movable aperture lensless transmission microscopy: a novel phase retrieval algorithm [J]. Physical Review Letters, 2004, 93(2): 023903.
- [17] Rodenburg J M, Faulkner H M L. A phase retrieval algorithm for shifting illumination [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(20): 4795-4797.
- [18] Yao Y D, Liu C, Pan X C, *et al.* Research status and development trend of PIE imaging method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0609001.
姚玉东, 刘诚, 潘兴臣, 等. PIE 成像方法技术现状及发展趋势 [J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609001.
- [19] Rodenburg J M, Hurst A C, Cullis A G. Transmission microscopy without lenses for objects of unlimited size[J]. Ultramicroscopy, 2007, 107(2/3): 227-231.
- [20] Pan X, Liu C, Zhu J. Single shot ptychographical iterative engine based on multi-beam illumination[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(17): 171105.
- [21] Cohen O, Sidorenko P. Single-shot ptychography [J]. Optica, 2016, 3(1): 9-14.
- [22] Zhang F, Rodenburg J M. Phase retrieval based on wave-front relay and modulation[J]. Physical Review B Condensed Matter, 2010, 82(12): 2511-2524.
- [23] Zhang F, Chen B, Morrison G R, *et al.* Phase retrieval by coherent modulation imaging[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13367.
- [24] Tao H, Suhas P V, Pan X, *et al.* Lens-free coherent modulation imaging with collimated illumination[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(7): 071203.
- [25] Tao H, Veetil S P, Cheng J, *et al.* Measurement of the complex transmittance of large optical elements with modulation coherent imaging [J]. Applied Optics, 2015, 54(7): 1776-1781.
- [26] Pan X, Veetil S P, Liu C, *et al.* On-shot laser beam diagnostics for high-power laser facility with phase modulation imaging [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(5): 055001.