

多波长高次谐波波面重建中样品吸收的影响

梅波^{1,2}, 曾志男^{1,3*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800;²中国科学院大学, 北京 100049;³张江实验室, 上海 200120

摘要 高次谐波自身特性的表征是其在超快时间测量中应用的前提,但是由于其所处波段和宽带光源的特性,使得其三维时空相位的完整测量一直是高次谐波表征的难题。多波长高次谐波的相干合成可以获得阿秒脉冲,但是目前阿秒脉冲的相位测量也只能获得一维时域信息。针对以上问题,提出了一种改进的混态叠层衍射成像方案来解决高次谐波的空域测量,成功实现由多个极紫外(EUV)波长构成的高次谐波梳的空域复振幅重建,并研究了样品吸收对空域复振幅重建过程的影响。研究发现,对于多波长高次谐波重建速度和质量,存在最优的样品衍射图案对比度。

关键词 测量; 高次谐波; 叠层衍射成像; 相位恢复; 多波长

中图分类号 O434 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230720

1 引言

近些年来,高次谐波产生(HHG)凭借其超快的时间分辨、宽光谱带宽、相干性好、产生和选通装置简单等优良特性,在超快光学、强场物理、半导体成像等领域展现了非凡的潜力。随着高次谐波在时域极限的不断突破,其自身特性对于阿秒调控以及电子动力学过程的研究非常重要。光电探测器只能测量强度信息,而哈特曼波前传感器、点衍射干涉法等传统相位测量方法由于需要添加透镜或引入参考光等因素并不适用于高次谐波,因此需要寻求新的测量方法实现高次谐波波面复振幅的空域测量。

叠层衍射成像算法(PIE)是 Rodenburg 等^[1]提出的一种无透镜计算成像技术。通过记录照明光交叠照射样品的散斑信息,利用大量的数据冗余,实现样品复振幅的快速重建。Maiden 等^[2]在 2009 年提出的拓展叠层衍射成像算法(ePIE)首次实现照明光复振幅的准确重建,证明 ePIE 不仅是一种样品的高分辨成像手段,也是一种光场波面检测技术。然而,这些算法都要求光束是完全相干的,光源相干性的高低决定了重建质量的好坏^[3-5]。由此带来一个问题,即不同波长的衍射光在电荷耦合器件(CCD)上只能非相干叠加,使得多波长照明光的重建难度大大提高,这是 PIE 主要面临的技术难点^[6]。混态 PIE 算法是 Thibault 等^[7]提出的一种提高部分相干光照明成像质量的技术。该算

法的核心思想是将非相干的混态照明过程看作是一系列独立的完全相干过程的非相干叠加。目前,混态 PIE 算法已经应用于窄带宽照明光^[8]、三色可见光光束^[9]以及四色极紫外(EUV)光束和样品的复振幅重建^[10]。

混态 PIE 算法直接应用于高次谐波空域检测存在两个问题:一是根据过采样率理论^[11],多波长照明光的重建需要提高重叠率,即需要更长的扫描时间,因此要求光源具有很好的稳定性,这对高次谐波检测是不利的;二是需要考虑样品在 EUV 波段存在强烈吸收等特性。我们基于混态 PIE 法提出了一种新的检测方案,为了尽量减少对光源稳定性的需求,利用已知样品结构和光谱分布来增大过采样率。在此过程中,我们发现样品对照明光的吸收率对于重建过程有着重要影响,存在一个最优的衍射图案对比度(即样品吸收率),在此对比度下可以快速重建不同级次高次谐波照明光的复振幅分布,实现复杂脉冲波面的三维检测。

2 模型和检测方案

高次谐波光源具有很宽的 EUV 光谱,多波长的复色光相干合成可获得脉冲宽度极短的阿秒脉冲,但这同时也是叠层衍射成像算法中的难点。因此本文考虑分立谱模型,即利用多个 EUV 波长构成的高次谐波梳来实现各级次二维空间复振幅分布的重建。

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-05-03; 录用日期: 2023-05-09; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(91950203, 11874374)、中国科学院战略先导科技专项(B类)(XDB16)

通信作者: *zhinan_zeng@mail.siom.ac.cn

需要注意的是, PIE 方法无法重建不同波长的色散分布, 因此重构完整的阿秒脉冲时空分布仍然需要双光子干涉阿秒拍频重构 (RABBITT)^[12] 或者单频振荡滤波相位反演 (PROOF)^[13] 等方法测量获得其色散曲线。

为了降低叠层衍射扫描对高次谐波稳定性的要求, 我们的算法中尽可能利用已知信息。根据 Thibault 等^[7] 对混态问题的分析, 将 PIE 与多路信息复用 (IM) 相结合, 利用改进的信息复用叠层衍射成像算法 (PIM)^[8] 来对多级次高次谐波梳进行重建。本文的目的是重建高次谐波光场, 因此在 PIM 算法的基础上做了一些改变: 1) 由于需要重建不同波长成分, 根据过采样要求, 需要额外的已知信息来约束。我们最大化地利用样品这一自由度, 定义初始的物函数已知, 并且在重建算法的迭代过程中不更新, 以此来提高过采样率。2) 在气体高次谐波中, 光谱的测量并不复杂, 因此我们引入不同波长下的光谱权重作为先验信息, 一方面可以提高过采样率, 减少对光源稳定性的要求, 另一方面可以优化初始猜测照明光。我们只在初始猜测值代入先验的光谱权重, 迭代过程中依然维持光谱的更新, 在不影响重建结果的基础上, 能够通过恢复后的光谱权重来反映重建质量。

利用图 1 所示的已知样品建立物函数 $O_{k,l,m}(x,y)$, (x,y) 为物平面, 样品上具有已加工的已知衍射图案。图 1 中白色部分表示无样品材料, 高次谐波可无吸收 100% 透过, 而黑色部分则表示存在样品材料, 即对软 X 射线波段的高次谐波有一定的吸收, 它由材料厚度 d 和复折射率确定。显然, 当 $d=0$ 时, 图 1 的衍射图案不存在, 高次谐波波面自然也无法重建。当 d 很大时, 会导致高次谐波被全部吸收, 衍射图案的对比度最高。下面的模拟中我们用材料厚度 d 来控制样品对高次谐波的吸收比例。

通过这种方式, 将已知物函数代入 PIM 算法中, 引入模拟照明光全空间总强度与真实照明光全空间总

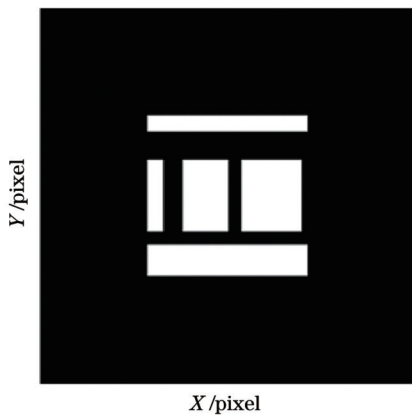


图 1 模拟样品

Fig. 1 Simulation sample

强度的均方误差 (MSE), 通过均方误差来判断算法是否收敛。详细的算法步骤可参见支撑材料。

3 模拟结果和讨论

首先, 我们尝试利用改进的 PIM 算法对简单波面五级次高次谐波进行空域重建。在阿秒脉冲测量过程中, 一般将 q 次谐波写作

$$E_q(t) = E_{0q}(t) \exp(-i\omega_q t + i\varphi_{0q}), \quad (1)$$

式中: E_{0q} 为谐波振幅 (时域电场包络); ω_q 为角频率; φ_{0q} 为初始谐波相位。

通过将这些不同级次的谐波光场合成得到阿秒脉冲的时域光场, 但它只有一维时域描述。将对每个谐波光场的描述形式改为

$$E_q(x, y, t) = E_{0q}(x, y, t) \exp[-i\omega_q t + i\varphi_q(x, y) + i\varphi_{0q}], \quad (2)$$

式中: φ_q 为谐波相位。

式 (2) 中的 q 值取决于选择的谐波级次。本文选用中心波长为 800 nm 的驱动激光生成的 21~29 次奇次谐波, 对应波长分别为 27.6、29.1、31.5、34.6、38.1 nm, 其初始光谱如图 2 所示。对于衍射图案的黑色部分, 先考虑足够厚的样品材料, 即假设黑色部分透过率为 0, 样品对比度为 1。

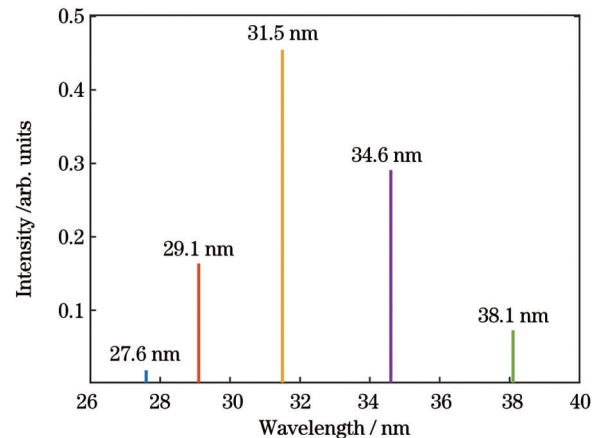


图 2 初始光谱分布

Fig. 2 Initial spectral distribution

初始振幅和相位分布分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。光斑是圆形光斑, 振幅、相位均采用高斯线型, 扫描矩阵为 3×3 , 扫描重叠率为 60%, CCD 像平面位于 $z = 80$ mm。重建算法中, 先猜测照明光分布为全空间的单位矩阵, 然后进行迭代, 收敛时可以得到照明光光斑尺寸。另外, 初始光谱分布已知, 该先验值在实验上可通过光谱仪测得。因此, 初始照明光分布为具有特定光斑尺寸和不同光谱权重的圆形矩阵。利用该方案对照明光进行重建, 各波长重建振幅如图 3(a) 点线所示, 重建相位如图 3(b) 点线所示, 迭代过程中的 MSE 如图 3(c) 所示。我们也假设了在样品未知情况

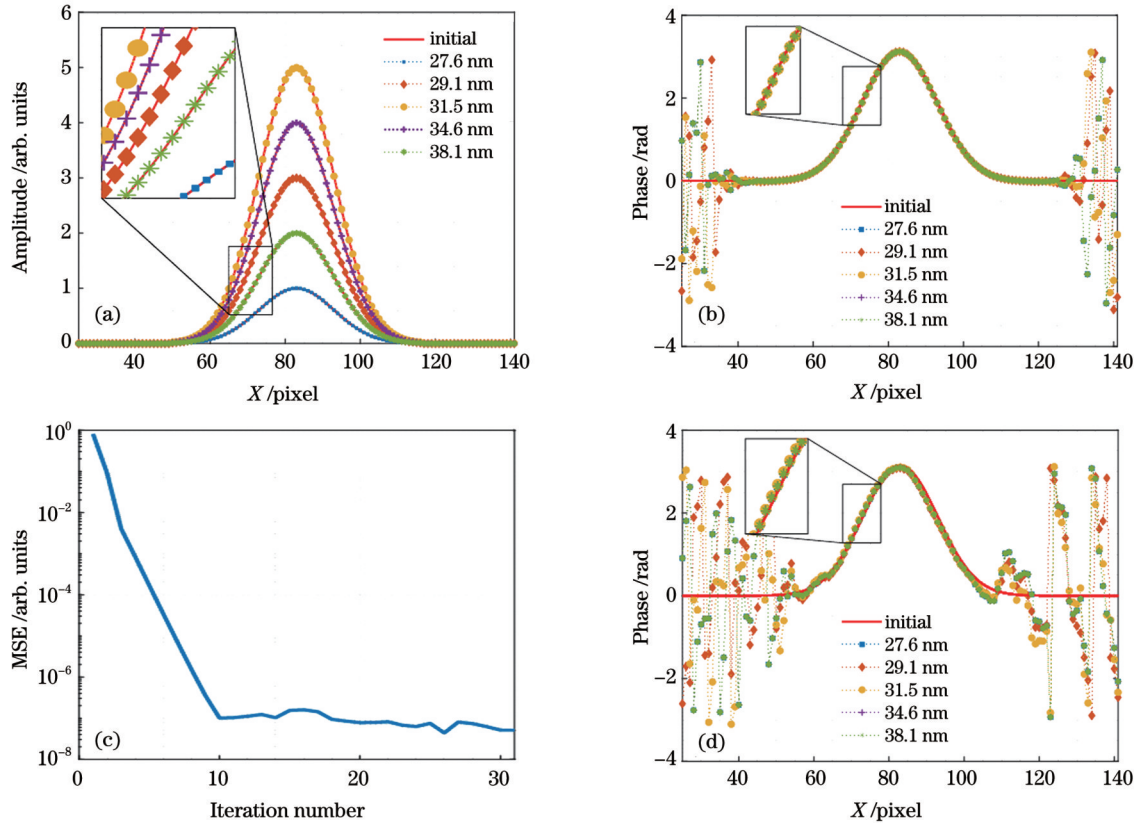


图3 多波长高次谐波重建结果。(a)振幅重建对比;(b)相位重建对比;(c)已知样品并且不做更新情况下的MSE;(d)同时重建样品和照明光时的相位重建对比

Fig. 3 Multi-wavelength high-order harmonics reconstruction results. (a) Comparison of amplitude reconstruction; (b) comparison of phase reconstruction; (c) MSE in case of priori sample and without updating; (d) comparison of phase reconstruction in case of simultaneous reconstruction of sample and probe

下同时重建样品和照明光,各波长重建相位如图3(d)所示。

图3(a)表明振幅重建效果非常好,从图3(b)则可以看出在光强接近0的地方,重建的相位振荡非常明显。由于照明光复振幅的空间二维分布图很难直观地比较重建结果,我们通过二维分布图中心的一维数据,可以仔细比较重建结果与真实值的偏差。详细的二维分布图可参见支撑材料。从图3(c)可以看出,只需要十几次迭代,均方误差就已达到 10^{-6} 量级,表明总的光谱强度与CCD高度一致。结合图3(a)和图3(b)可知,改进后的PIM算法对各级次照明光振幅与相位的重建质量非常高。另外,采用常规的PIM利用冗余信息额外对样品进行了重建,相位重建结果如图3(d)所示。从图3(d)可以明显看出重建质量变差,这是由于在较小的扫描矩阵下,引入额外的未知信息很难满足过采样条件。因为我们更关心的是气体高次谐波的波前恢复,重建样品没有实际意义,所以已知样品在PIM应用于高次谐波检测中十分关键。

上述简单高次谐波相位分布在很小的 3×3 扫描矩阵下即可很好地重建,但是Hoflund等^[14]研究了气体高次谐波的聚焦特性,认为极紫外谐波焦点位置和

光斑大小是谐波阶数的函数,并且焦点的性质随谐波阶数和生成条件而改变。换言之,在高次谐波波中,不同级次对应不同的焦点,因此在物平面上具有不同的光斑尺寸,相位面可能会很复杂。下面考虑模拟光斑具有更复杂分布的情况,初始光谱、振幅、相位分布如图4(a)~图4(c)所示。为了实现重建,提高扫描过程中的信息冗余度,扫描矩阵设为 7×7 ,计算重叠率为80%,各波长重建振幅如图4(b)点线所示,重建相位如图4(c)点线所示,迭代过程中的MSE如图4(d)所示。这里选择更大的扫描矩阵,是因为 3×3 的扫描矩阵已无法重建复杂的相位面分布。由于保持了光谱权重更新,可以得到重建的光谱与真实值的偏差,如表1所示。表1中,真实光谱分布值 a 是先验条件,与图4(a)一致,重建光谱分布值 b 通过初始光谱权重不断更新,在误差函数收敛时得到。重建光谱分布值与真实值的偏差 δ 定义为

$$\delta = \frac{b - a}{a} \times 100\% \quad (3)$$

从表1中可以看出,复杂面型高次谐波光谱的重建存在一定偏差,这同样可以从误差曲线中观察到。相较于图3中的误差曲线,图4(d)中的均方误差显然很大,不过仍然在十几次迭代后收敛。从图4(c)可以

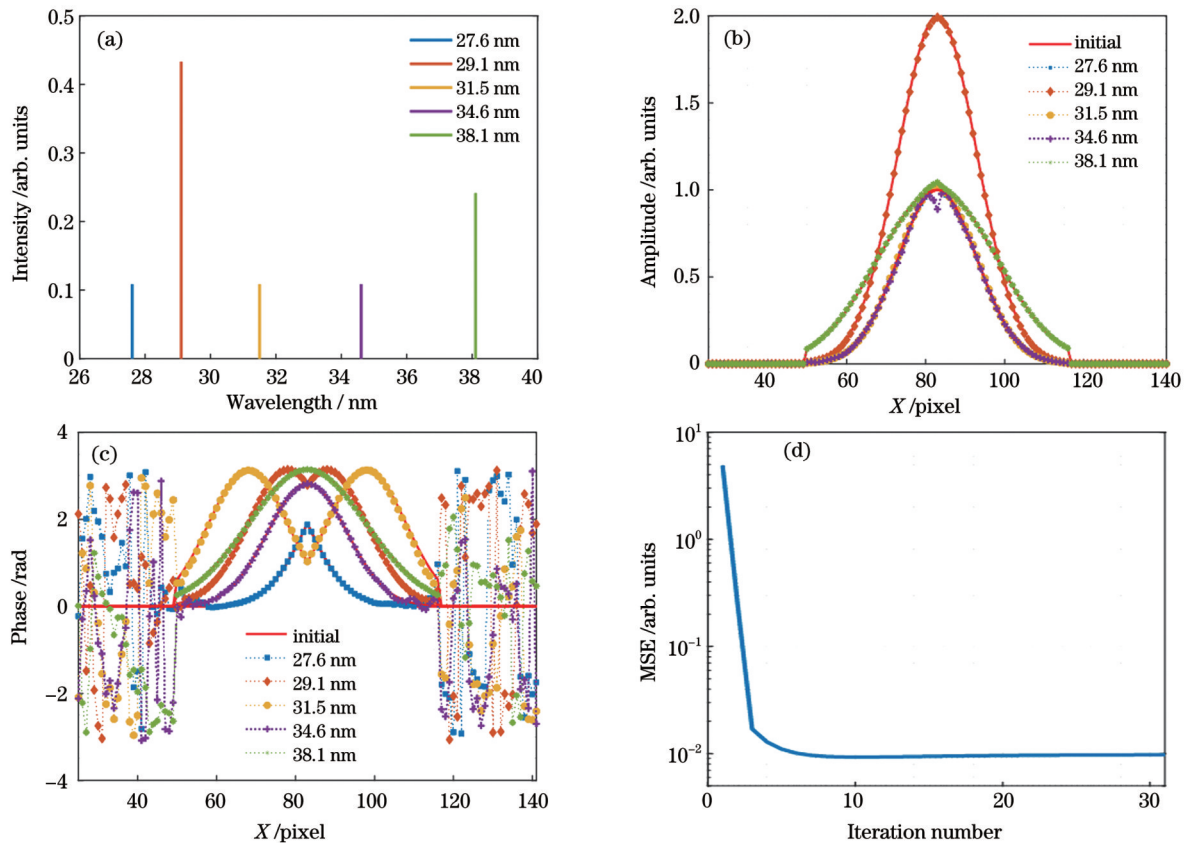


图4 复杂波面多波长高次谐波重建结果。(a)初始光谱分布;(b)振幅重建对比;(c)相位重建对比;(d)迭代过程中的MSE
Fig. 4 Reconstruction results of multi-wavelength high-order harmonics with complex wavefront. (a) Initial spectral distribution;
(b) comparison of amplitude reconstruction; (c) comparison of phase reconstruction; (d) MSE during iterative process

表1 光谱分布重建对比

Table 1 Comparison of spectral distribution reconstruction

Wavelength λ / nm	True intensity value a	Simulated intensity value b	Deviation δ / %
27.6	0.1083	0.1090	0.6464
29.1	0.4333	0.4295	-0.8770
31.5	0.1083	0.1104	1.9391
34.6	0.1083	0.1068	-1.3850
38.1	0.2418	0.2444	1.0753

看出各级次相位恢复很好,而图4(b)中只有29.1 nm级次的振幅重建得很好,其余级次的振幅重建均不理想。图5仔细对比了其余级次的振幅重建结果,可见均有不小的偏差。

从图5中的重建结果可知,各级次振幅恢复均有偏差,一般情况下需要更大的扫描矩阵来提高重建质量。但是,我们发现这可能是初始样品结构导致的。在初始样品设置中只考虑了透明与不透明,图1中的黑色部分完全吸收了照明光,损失了一部分已知信息,影响了复杂波面的恢复。因此,下面将讨论样品材料厚度 d 的影响,通过改变样品黑色区域的厚度来改变样品对比度,从而实现不同程度的吸收和相位变化,以

减少信息损失,提高重建质量。由于34.6 nm波长的谐波在不透明样品中重建波面偏差较大,因此下面以34.6 nm为例说明样品厚度对于重建的影响,其余波长结果受厚度的影响可参见支撑材料。不同样品对比度下34.6 nm重建结果如图6所示。

图6中蓝色虚线对应的是重建振幅,红色实线是重建结果与真实值的差,用来衡量重建的质量。图6(a)对应的条件是样品黑色区域采用完全不透明结构,即完全吸收,此时振幅波面重建误差很大。当样品结构改为部分透明时,通过改变厚度可以设置不同的样品对比度。针对不同对比度进行了研究。从图6(a)~图6(d)可以看出,样品黑色区域的吸收对于重建的改

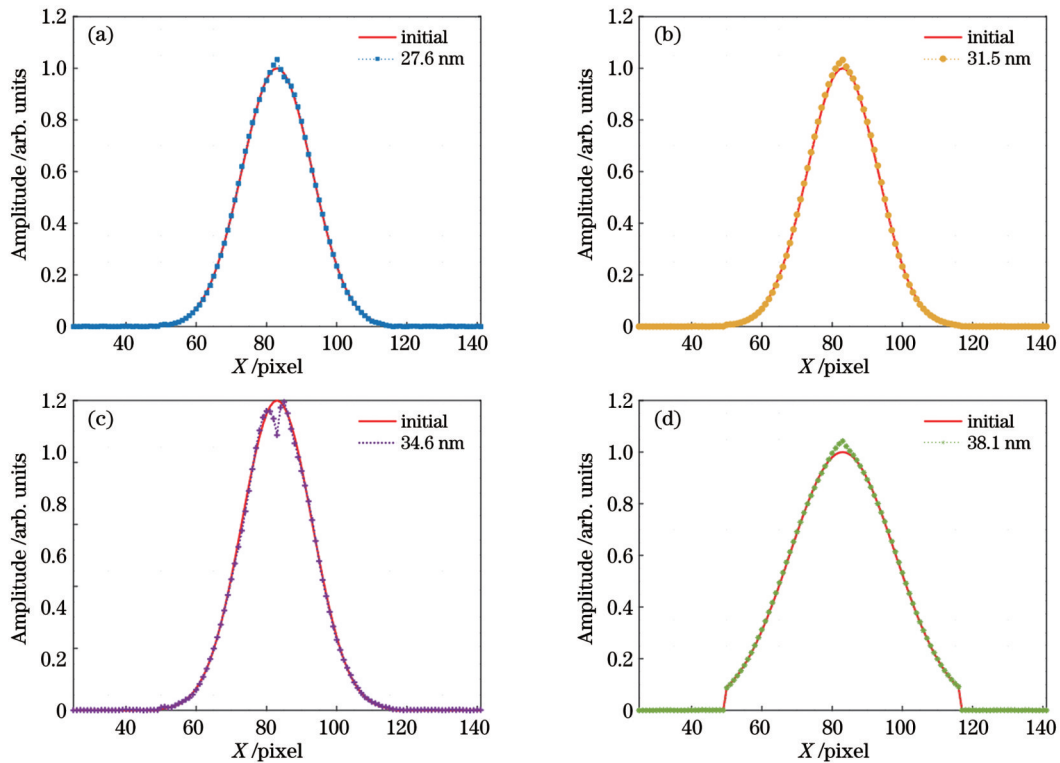


图 5 各级次振幅重建对比。(a)27.6 nm;(b)31.5 nm;(c)34.6 nm;(d)38.1 nm

Fig. 5 Amplitude reconstruction for each order. (a) 27.6 nm; (b) 31.5 nm; (c) 34.6 nm; (d) 38.1 nm

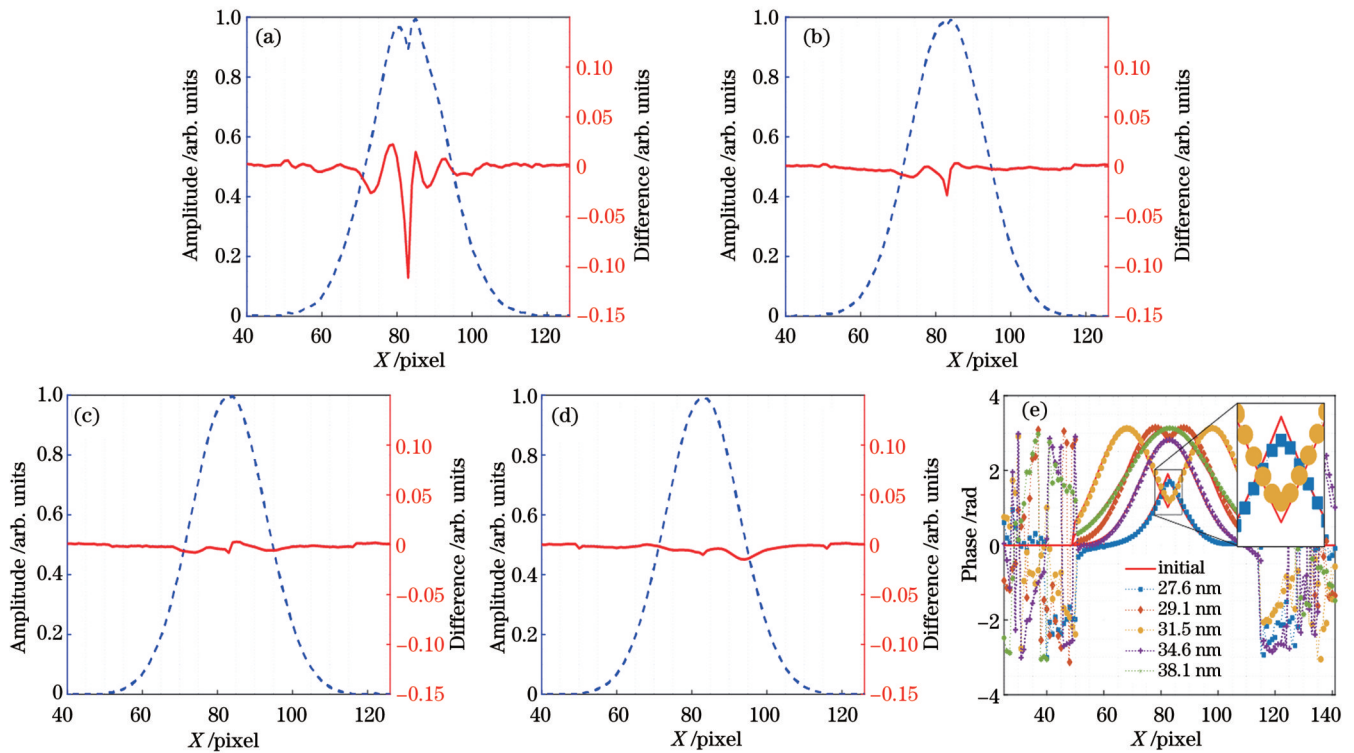


图 6 不同样品对比度下的 34.6 nm 波长谐波的振幅与相位重建对比。(a)样品对比度为 1 的振幅重建对比;(b)样品对比度为 0.14 的振幅重建对比;(c)样品对比度为 0.19 的振幅重建对比;(d)样品对比度为 0.28 的振幅重建对比;(e)样品对比度为 0.28 的各级次相位重建对比

Fig. 6 Amplitude and phase reconstruction comparison for 34.6 nm harmonic with different sample contrasts. (a) Amplitude reconstruction with sample contrast of 1; (b) amplitude reconstruction with sample contrast of 0.14; (c) amplitude reconstruction with sample contrast of 0.19; (d) amplitude reconstruction with sample contrast of 0.28; (e) phase reconstruction for each order with sample contrast of 0.28

善有一个最佳值,即样品对比度在 0.19 附近时,能够得到最好的复振幅重建。尽管对比度在 0.28 时振幅的重建质量也到了不错的改善,但图 6(e)插图表明对应的 0.28 对比度下的相位重建已经开始偏离真实值,这主要是因为厚样品会带来较大的相位变化,从而影响相位的重建。在 0.19 对比度时,除 34.6 nm 外,其余

波长的重建质量也得到了很大的改善。

上述研究表明,样品对比度的改变能显著影响重建质量。因此我们认为可以通过改变样品结构来适当减少扫描时间,从而更有利于高次谐波检测。在进一步研究中,将扫描矩阵设为 5×5 ,通过改变样品对比度进行波面重建。重建结果如图 7 所示。

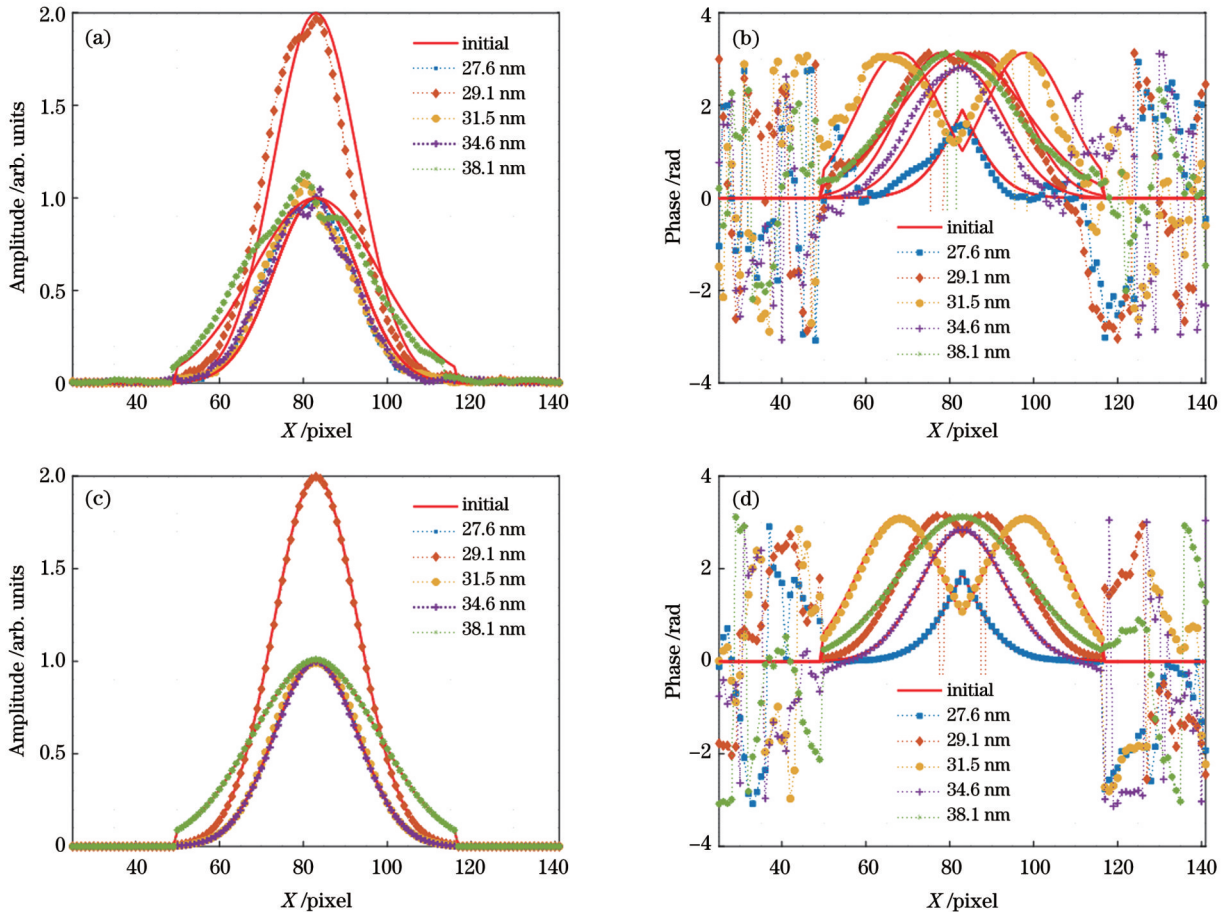


图 7 采用 5×5 扫描矩阵时样品对比度的影响。(a) 样品对比度为 1 的各级次振幅重建对比; (b) 样品对比度为 1 的各级次相位重建对比; (c) 样品对比度为 0.19 的各级次振幅重建对比; (d) 样品对比度为 0.19 的各级次相位重建对比

Fig. 7 Influence of sample contrast with 5×5 scan matrix. (a) Amplitude reconstruction for each order with sample contrast of 1; (b) phase reconstruction for each order with sample contrast of 1; (c) amplitude reconstruction for each order with sample contrast of 0.19; (d) phase reconstruction for each order with sample contrast of 0.19

图 7(a) 和图 7(b) 表明,在样品对比度为 1 时, 5×5 的扫描矩阵所提供的重叠率并不能实现高次谐波波面复振幅重建。保持其余条件不变,改变样品黑色区域厚度,设置大约 0.19 的样品对比度,可以实现非常高质量的重建,如图 7(c) 和图 7(d) 所示。这一结果说明将样品材料的吸收设置成一定的对比度,能在提高重建质量的同时减少重叠率的需求。这一点在高次谐波波面检测中至关重要,很大程度上减少了对高次谐波光源稳定性的需求。

4 结 论

本文在现有 PIM 算法的基础上提出方案的改进,使其更有利于 EUV 波段高次谐波的空域波面检测。

利用已知样品和光谱分布以减少扫描时间,从而在保证重建质量的前提下降低对高次谐波光源的稳定性要求,在简单波面情况下以 3×3 的扫描矩阵即可实现很好的重建。另外,对于更一般化的高次谐波梳的多级次、复杂波面检测,在较大扫描矩阵下成功证明了该方案对于高次谐波空域检测的可行性和潜力。更重要的是,我们首次发现适当的材料吸收形成的衍射图案对比度对于高次谐波的重建速度和质量是最优的。当样品对比度在 0.19 附近时,将得到最佳的重建质量。该方案不需要透镜、参考光、滤波等,对复杂相位变化敏感,弥补了传统相位检测手段的不足,减少了长时间扫描的光源不稳定问题,是实现高次谐波波面检测的有效手段,并有望应用于孤立阿秒脉冲等超连续谱。

备注:本文针对部分内容有支撑材料,可扫下方二维码获得。



参 考 文 献

- [1] Rodenburg J M, Faulkner H M L. A phase retrieval algorithm for shifting illumination[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(20): 4795-4797.
- [2] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging[J]. *Ultramicroscopy*, 2009, 109(10): 1256-1262.
- [3] Williams G J, Quiney H M, Peele A G, et al. Coherent diffractive imaging and partial coherence[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(10): 104102.
- [4] Burdet N, Shi X W, Parks D, et al. Evaluation of partial coherence correction in X-ray ptychography[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5452-5467.
- [5] Stachnik K, Mohacsi I, Vartiainen I, et al. Influence of finite spatial coherence on ptychographic reconstruction[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(1): 011105.
- [6] 潘兴臣, 刘诚, 肖伟刚, 等. 相干衍射成像技术的最新进展: 层叠相位重建技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(22): 2200001. Pan X C, Liu C, Xiao W G, et al. Recent developments in coherent diffraction imaging: ptychographic iterative engine[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(22): 2200001.
- [7] Thibault P, Menzel A. Reconstructing state mixtures from diffraction measurements[J]. *Nature*, 2013, 494(7435): 68-71.
- [8] Batey D J, Claus D, Rodenburg J M. Information multiplexing in ptychography[J]. *Ultramicroscopy*, 2014, 138: 13-21.
- [9] 潘安, 王东, 史祎诗, 等. 多波长同时照明的菲涅耳域非相干叠层衍射成像[J]. *物理学报*, 2016, 65(12): 124201. Pan A, Wang D, Shi Y S, et al. Incoherent ptychography in Fresnel domain with simultaneous multi-wavelength illumination [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(12): 124201.
- [10] Zhang B S, Gardner D F, Seaberg M H, et al. Ptychographic hyperspectral spectromicroscopy with an extreme ultraviolet high harmonic comb[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18745-18754.
- [11] Miao J W, Ishikawa T, Anderson E H, et al. Phase retrieval of diffraction patterns from noncrystalline samples using the oversampling method[J]. *Physical Review B*, 2003, 67(17): 174104.
- [12] Muller H G. Reconstruction of attosecond harmonic beating by interference of two-photon transitions[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(1): s17-s21.
- [13] Chini M, Gilbertson S, Khan S D, et al. Characterizing ultrabroadband attosecond lasers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 13006-13016.
- [14] Hoflund M, Peschel J, Plach M, et al. Focusing properties of high-order harmonics[J]. *Ultrafast Science*, 2021, 2021: 9797453.

Influence of Sample Absorption on Multi-Wavelength High-Order Harmonic Wavefront Reconstruction

Mei Bo^{1,2}, Zeng Zhinan^{1,3*}

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

³Zhangjiang Laboratory, Shanghai 200120, China

Abstract

Objective With its ultrafast time resolution, broadband spectrum, full coherence, and simple generation and selection devices, high-order harmonic generation (HHG) has shown its potential in the fields of ultrafast optics, strong-field physics, and semiconductor imaging. The characterization of the spatial domain properties of the high-order harmonics is important for applications in the attosecond electron dynamics processes. Although spatial measurements such as the Hartmann wavefront sensor (HWFS) and holography have been proposed in many areas, the extreme ultraviolet (EUV) or X-ray wavelength of the high-order harmonics and the difficulty of introducing reference light make spatial measurements of high-order harmonics a challenge. This paper introduces an improved mixed-state ptychography scheme to realize the spatial measurement of high-order harmonics. This approach makes good use of the multiple wavelengths of the high-order harmonics as well as reduces the stability requirements of the light source. We hope that it will be useful for spatial domain measurements of high-order harmonics and for the study of high-order harmonics generation and focusing.

Methods In order to reduce the experimental requirement for the reconstruction of high-order harmonics, we try to make use of known information in our algorithm as more as possible and focus only on the reconstruction of the probe; the reconstruction of the sample is not important. Therefore, we modify the existing mixed-state ptychography scheme and introduce two priori conditions: the spectral distribution at different wavelengths and a specific sample with a certain contrast. These priori conditions are easily obtained

experimentally. For the first iteration, the probe size is obtained, and then it is substituted into the initial estimated probe along with the priori spectral distribution. Subsequent iterations are performed with the modulus and frequency domain constraints to achieve complex amplitude reconstruction of the probe. The sample is not updated during the iterative process, thus making it more applicable to high-order harmonics. The effect of sample absorption or contrast on the reconstruction is investigated by varying the sample thickness.

Results and Discussions In the reconstruction of high-order harmonics with simple wavefront (Fig. 3), we successfully reconstruct the complex amplitudes of the five EUV wavelengths with very low errors as well as a highly consistent spectral distribution. Also, we perform additional reconstructions of the sample without changing the scan matrix, resulting in poorer reconstruction quality of the probes. This indicates that the priori sample information is important for the probe reconstruction at such a small scan matrix. In the reconstruction of the complex wavefront (Fig. 4), we find that the reconstruction of the phase is great, but the reconstruction of the amplitude is not satisfactory (Fig. 5). In addition, the error curve is larger and the spectral distribution is deviated compared with that of the simple wavefront case (Table 1).

By varying the contrast of the particular sample, we find that different sample absorption has an important effect on the reconstruction and that the best complex amplitude reconstruction is obtained at a sample contrast of about 0.19 (Fig. 6). Despite continuing to increase the sample contrast, the quality of the probe amplitude reconstruction remains good. However, the reconstruction of the phase is affected by introducing a large phase due to the increase in thickness. Furthermore, our investigation using the optimum sample contrast (Fig. 7) reveals that the scan matrix could be reduced while maintaining the reconstruction quality, thus reducing the stability requirements for the light source.

Conclusions In this work, a scheme that is more favorable for the characterization of spatial domain wavefront of the EUV high-order harmonics is proposed. The scan matrix is reduced by means of known sample information and spectral distribution, thus ensuring the reconstruction quality with reduced stability requirements for the light source. We have succeeded in reconstructing simple wavefronts with a small 3×3 scan matrix. For more generalized complex wavefronts, we have also carried out simulations, illustrating the feasibility and advantages of the scheme for high-order harmonic wavefront recovery. More critically, we find that sample contrast has a significant impact on the reconstruction. The best reconstruction quality is obtained when the sample contrast is around 0.19. And samples with a certain contrast can reduce the scanning matrix while maintaining the reconstruction quality. This scheme makes up for the shortcomings of traditional phase measurement methods and requires low stability of the light source. It is an important tool for recovering high-order harmonic wavefronts.

Key words measurement; high-order harmonics; ptychography; phase retrieval; multi-wavelength