

文章编号: 0253-2239(2009)10-2786-05

强度关联三维衍射层析的实验研究

应关荣 刘红林 魏 青 韩申生

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800)

摘要 提出了一种基于强度关联成像的新型三维衍射层析技术。利用强度关联成像技术(鬼成像)可实现无透镜傅里叶变换的特点,并结合衍射层析技术和二步相位恢复算法,使用波长为 650 nm 的赝热光实现了强度关联三维衍射层析。详细描述了强度关联三维衍射层析的基本原理以及具体实验结果,为在第三代同步辐射光源实现非相干 X 光衍射成像积累了经验。

关键词 强度关联成像; 衍射层析; 相位恢复; 滤波背投影(FBP)算法

中图分类号 O431.2; O434 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092910.2786

Experimental Investigation of Intensity Correlated Three Dimensional Diffraction Tomography

Ying Guanrong Liu Honglin Wei Qing Han Shensheng

(Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A new three-dimensional diffraction tomography, based on intensity correlation imaging, is demonstrated. Intensity correlated imaging (ghost imaging), which can realize the lensless Fourier-transform, the diffraction tomography and the two-step phase-retrieval algorithm are combined together to realize intensity correlated three dimensional diffraction tomography by using 650 nm pseudo-thermal light. The theoretical basis of this technique is outlined, and the experimental results are presented. This paper is a preparation for the applications of incoherent X-ray intensity correlated three-dimensional diffraction tomography in the third generation X-ray synchrotron radiation source.

Key words intensity correlated imaging; diffraction tomography; phase retrieval; filtered back-project (FBP) algorithm

1 引 言

强度关联成像(又称鬼成像)作为一种新的非局域成像方式,近年来受到许多科学家的关注。强度关联成像技术可以用非相干的经典热光源实现无透镜傅里叶变换^[1-4],这一特性给基于探测频谱强度的衍射成像特别是 X 射线衍射成像增加了一种新的可能途径。

对 X 射线成像技术而言,基于物体对 X 射线波前的振幅吸收,人们发明了 X 光摄像和计算机层析术(CT)^[5,6]。由于纳米科学与生命科学的飞速发展,人们迫切希望获得具有物质内部原子级分辨能

力的三维显微成像技术,而医学上 CT 成像的分辨率显然无法满足这一要求。近年来人们热衷于开展具有纳米级分辨能力的 X 射线衍射光学研究^[7-15]。在 X 射线衍射成像中,通过探测透过物体后的 X 射线光场的傅里叶频谱强度并结合过采样理论和相位恢复算法,从而反演物体内部三维信息。由于高质量相干 X 光源的难以获得^[8];并且在 X 波段没有很好的聚焦透镜^[9],使得 X 射线衍射成像必须满足 Fraunhofer 条件(对于 1 nm 的 X 光和 1 mm 大小的样品在不考虑过采样的条件下,满足 Fraunhofer 条件要求衍射距离 $Z > 3$ km),因此其使用受到很大

收稿日期: 2008-10-31; 收到修改稿日期: 2009-01-22

基金项目: 上海市科学技术委员会科研项目(06JC14069)资助课题。

作者简介: 应关荣(1984—),男,硕士研究生,主要从事衍射层析和相位恢复方面的研究。E-mail: grying@gmail.com

导师简介: 韩申生(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事极高能量密度介质中的强非线性过程及其应用、X 光相位成像技术及量子成像等方面的研究。E-mail: sshan@mail.shnc.ac.cn

的限制。强度关联成像不但可以在菲涅耳衍射距离上获得物面的傅里叶变换,而且光源采用非相干光,这样限制相干 X 衍射成像的两个条件都有望得到很好的解决。

2 强度关联三维衍射层析实验

2.1 实验样品的选择和原理图

实验上采取的物体样品是裸石英光纤,由于其物理性质(折射率、表面反射率、吸收率)在光纤轴线方向上分部均匀,因此只要知道其横截面的物理性质分布就知道了整根光纤的三维物理性质分布。再加上光纤横截面物理性质本身圆对称的特性,使得实验上不需要像 CT 或通常情况下的衍射层析那样必需把实验样品绕某个转轴进行旋转,如 M. H. Maleki 等^[16]的工作,这样大大简化了实验装置,提高了实验效率。在实验中,采用可见光作为光源,通过给光纤周围加折射率配比溶液使得入射光通过待测样品时保持传播方向不变,即在可见光波段满足光的直透性。这使得可见光穿过物体时具有和 X 光一样的效果,从而可以实现用可见光模拟非相干 X 光强度关联衍射成像。

强度关联衍射层析所采用的原理图,如图 1 所示。

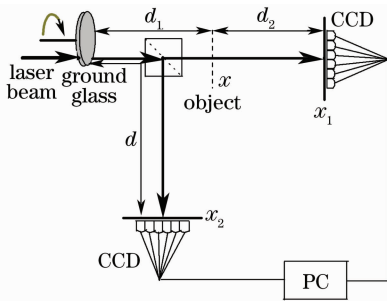


图 1 实验装置图

Fig. 1 Sketch of experimental setup

实验中用一束波长为 650 nm 的相干光垂直照射到旋转毛玻璃产生赝热光源,经过一个分束棱镜把整个系统分成两路光路,含有物体的光路称作“物臂”,不含物体的光路称为“参考臂”^[1~3]。其中 x 是待成像物体所在的平面, x_1, x_2 分别是物臂 CCD 探测面和参考臂 CCD 探测面。对于强度关联成像,当图中距离满足条件 $d = d_1 + d_2$ 时,物臂探测面上的强度涨落自相关运算对应于强度透射函数的傅里叶变换^[1]

$$\langle \Delta I_1(x_1) \Delta I_1(x'_1) \rangle \propto \left| \mathcal{F} \left\{ \left| t \left[\frac{2\pi(x'_1 - x_1)}{\lambda d_2} \right] \right|^2 \right\} \right|^2, \quad (1)$$

而互相关运算对应于振幅透射函数的傅里叶变换^[2,3]

$$\langle \Delta I_1(x_1) \Delta I_2(x_2) \rangle = \frac{I_0^2}{\lambda^4 d_2^4} \left| \mathcal{F} \left\{ t \left[\frac{2\pi(x_1 - x_2)}{\lambda d_2} \right] \right\} \right|^2, \quad (2)$$

其中 I_0 为光源光强, $I_1(x_1)$ 为物臂探测器光强, $I_2(x_2)$ 为参考臂探测器光强。 \mathcal{F} 表示傅里叶变换。根据(1)式和(2)式,只要知道关联结果就可以通过相位恢复来反演具体透射函数 $t(x)$, 并通过 $t(x)$ 进一步反演物体的内部信息,即实现强度关联衍射层析。

2.2 实验中的近似条件及其物理基础

用裸石英光纤作为样品物体,并用纯度为 99.9% 的氯苯给以折射率配比,两者折射率偏差小于 1.8%^[17]。当一束光通过直径为 500 μm , 并且和周围环境折射率偏差为 1.8% 的光纤横截面时,光束将在接触面发生折射和反射,如图 2 所示。

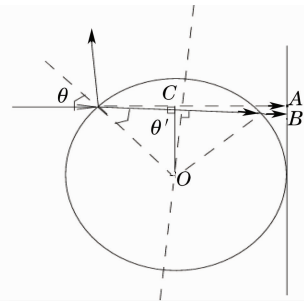


图 2 入射光场在光纤横截面中的传播

Fig. 2 Propagation of the incident light in the cross section of optical fiber

计算图 2 中由于光纤折射作用而产生的偏移 \overline{AB}

$$\overline{AB} = 2R \cos \theta' \sin(\theta - \theta') + R [1 - \cos(2\theta' - \theta)] \tan[2(\theta - \theta')], \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta &= \arcsin(x/R), \\ \theta' &= \arcsin(x/n_o R), \\ R &= 500 \mu\text{m}, \quad n_o = 1.018, \end{aligned}$$

点 O 是光纤横截面的中心, x 是光纤横截面圆心到入射光的垂直距离,即 $x = \overline{OC}$ 。在不考虑反射效应情况下,根据(3)式得到线段 \overline{AB} 的值,如图 3 所示。

从图中可看出在接近于光纤中心方向的 \overline{AB} 值很小,在 $-50 \mu\text{m} \leq x \leq 50 \mu\text{m}$ 区域, \overline{AB} 值小于 $1 \mu\text{m}$, 因此可以认为光在此区域内是直线传播。在光纤的其他部分,即 $-250 \mu\text{m} \leq x < -50 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m} < x \leq 250 \mu\text{m}$ 区域, \overline{AB} 的值迅速增大导致不满足直线传播。并且在这些区域由于入射角的增大导致反射效果也随之增大,最终导致此区域透过的光强很弱。

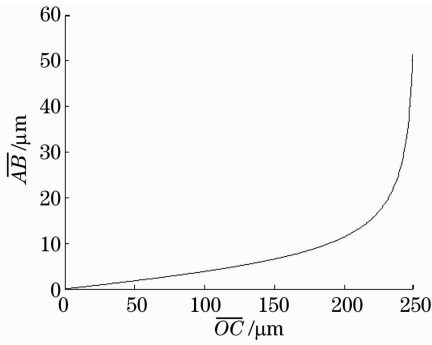


图3 入射光透过光纤发生折射产生的偏移

Fig. 3 Deviation of the incident light caused by the fiber

2.3 具体实验参数及结果

实验中具体参数如表1所示。

表1 用500 μm 光纤样品进行实验的具体参数

Table 1 Experimental parameters for the 500 μm fiber

Diameter / μm	500
d_1 / cm	26.7
d_2 / cm	21.2
Over-sample ratio	42.8
Coherent length at object plane / μm	34.7
Matching solution	Chlorobenzene
Pupil at reference arm / μm	500
Number of samples	15000

表中 d_1 表示光源到光纤的距离; d_2 表示光纤到

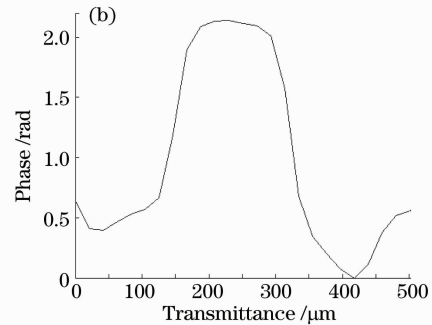
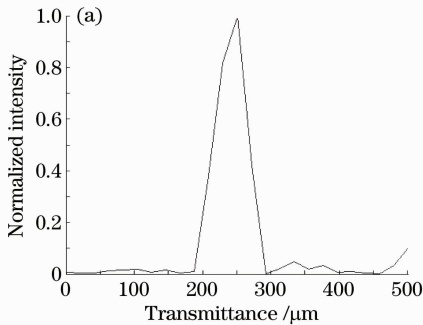


图5 通过相位恢复得到的透射场分布。(a)归一化的强度,(b)相对相位

Fig. 5 Transmittance distribution via the phase retrieval algorithm, (a) Normalized intensity; (b) relative phase

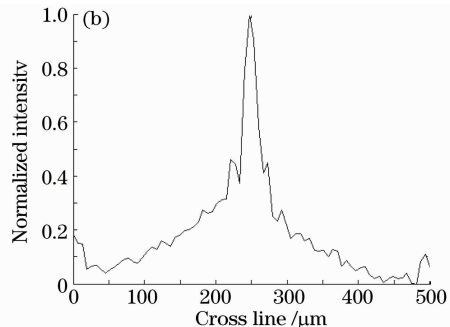
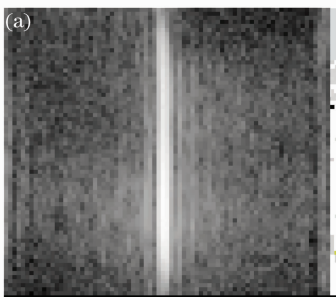


图6 (a)非相干光2f-2f成像得到的光场强度分布;(b)归一化的横截线强度分布

Fig. 6 (a)Intensity distribution obtained by incoherent-light 2f-2f system; (b) Normalized intensity distribution of the cross line

探测 CCD 的距离。

在物臂探测面上对15000个样本数进行强度涨落关联运算获得的强度透射函数的傅里叶变换频谱和振幅透射函数的傅里叶变换频谱,如图4所示。

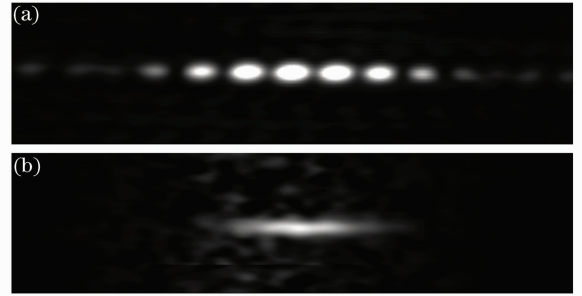


图4 实验上通过关联运算获得的傅里叶频谱强度分布
(a)强度透射函数,(b)振幅透射函数

Fig. 4 Experimental Fourier spectrum intensity distribution via correlated measurement respectively correspond to (a) the intensity transmittance; (b) the amplitude transmittance

对图4所示频谱强度进行相位恢复^[18~20]得到透过光纤的后表面光场分布,如图5所示。

从图5(a)可看出光纤只有中间部分是透光的。为了测试透射场强度恢复结果的正确性,实验上用非相干光直接照射光纤,进行2f系统成像,得到透过光纤后的光场强度分布,如图6所示。

对比图 6(b)和图 5(a)可得,通过关联运算反演得到的光强分布与直接成像的光强分布大体上一致,从而证明了透射场强度恢复结果的正确性。

根据图 5 所示的透射场强度分布和相位分布,进行物体内部三维透射率函数的反演。在反演中做了如下近似,假设光通过光纤是直线传播,光纤表面的反射作用可以等同于光纤对光场的“吸收作用”。基于直线传播近似可以定义

$$A(x, y) = A_0 \exp \left[i \int T(x, y) dy \right], A_0 = \sqrt{I_0}$$

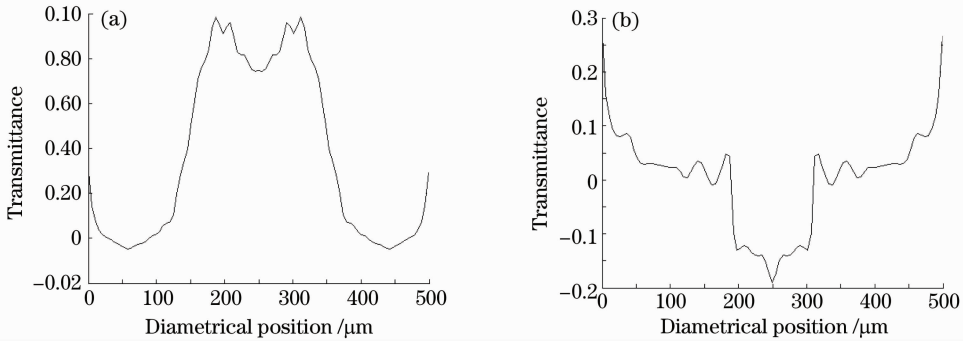


图 7 光纤内部各点透射率函数在径向上的分布。(a)实部;(b)虚部

Fig. 7 Distribution of transmittance in diametrical section. (a)Real part;(b)imaginary part

由于反演光纤内部透射率函数 $T(x, y)$ 时把光纤表面的反射作用等效于“吸收”,光纤边缘部分对光场的反射作用会随着入射角 θ 的增大而增大^[21],如图 2 所示,导致光纤边缘部分的“吸收”越来越强。但是 $T(x, y)$ 本身与入射角 θ 大小无关,并且具有圆对称性质,而光纤中心部分由于入射角比较小反射作用比较弱,即此区域是通光的,因此为了弥补光纤边缘对光场的“吸收”作用而在光纤中心出现 $T(x, y)$ 的虚部为负值,即光纤中心产生对光场一个等效的“放大”作用。透过率函数 $T(x, y)$ 的虚部反演结果如图 7(b)所示,光纤边缘部分透射率函数虚部为正表示这部分对光场产生“衰减”作用,而光纤中心部分透射率函数虚部为负表示这部分对光场产生“放大”作用。两者综合作用导致光纤中心部分由于等效的“放大”作用补偿而使这部分光场通过,而光纤边缘光场被“吸收”。

实验中通过反演获得了物体的三维透射率函数,验证了基于直线传播的强度关联三维衍射层析的可行性。

3 结 论

把强度关联成像和衍射层析技术结合起来,发挥各自的优势,把强度关联成像推广到三维空间,在

其中 $T(x, y)$ 为光纤内部横截面上圆对称分布的透射率函数。光纤的透射率系数的实部与光场的相位相关;虚部与光场的能量相关,并且可正可负,虚部为正表示光纤对光场的衰减作用,虚部为负等效于光纤对光场的“放大作用”,而且透射率函数圆对称,对实部和虚部分别进行 FBP 反演^[5,6]得到的 $T(x, y)$ 在直径上的分布,如图 7 所示。

实验上利用波长为 650 nm 的赝热光完成了可见光波段强度关联三维衍射层析,为将来实现非相干 X 射线、 γ 射线以及热中子的强度关联三维衍射成像积累了经验。

参 考 文 献

- Minghui Zhang, Qing Wei, Xia Shen *et al.*. Sub-wavelength Fourier-transform imaging of a pure-phase object with thermal light[J]. *Phys. Lett. A*, 2007, **366**(6): 569~574
- J. Cheng, S. S. Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(9): 093903~093906
- Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia *et al.*. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(3): 021803~021806
- Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia *et al.*. Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1858~1866
张明辉,魏青,沈夏等.基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟与实验验证[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1858~1866
- A. C. KAK. Computerized tomography with X-ray, emission and ultrasound sources [J]. *Proc. IEEE*, 1979, **67**(9): 1245~1272
- Chen Xin, Sun Yi, Zhu Peiping. Reconstruction algorithm of cone-beam phase X-ray computer-tomography based on grating imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1079~1084
陈欣,孙怡,朱佩平.光栅成像的锥束相位 CT 重建算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1079~1084
- Miao, J. W. *et al.*. Extending the methodology of X-ray crystallography to allow imaging of micrometre-sized non-crystalline specimens[J]. *Nature*, 1999, **400**(6742): 342~344
- A. Y. Nikulina, A. V. Darahanau, R. Horneya *et al.*. High-

- resolution X-ray diffraction imaging of non-Bragg diffracting materials using phase retrieval X-ray diffractometry (PRXRD) technique[J]. *Physica B*, 2004, **349**(1-4): 281~295
- 9 Miao, J. W. *et al.*. High resolution 3D X-ray diffraction microscopy [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89** (8): 088303~088306
- 10 Liu Li, Zhu Peiping, Shu Hang *et al.*. Quantitative measurement in X-ray diffraction enhanced imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1492~1495
刘 力, 朱佩平, 舒 航 等. X 射线衍射增强成像中的定量测量 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1492~1495
- 11 I. K. Robinson, I. A. Vartangants, G. J. Wuiams *et al.*. Reconstruction of the shapes of gold nanocrystals using coherent X-ray diffraction [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87** (19): 195505~195508
- 12 J. Miao, Tetsuya Ishikawa, Erik H. Anderson *et al.*. Phase retrieval of diffraction patterns from noncrystalline samples using the oversampling method[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67** (17): 174104~174109
- 13 J. W. Miao. Three-dimensional GaN-Ga₂O₃ core shell structure revealed by X-ray diffraction microscopy [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(21): 215503~215506
- 14 S. Marchesini, H. N. Chapman, S. P. Hau-Riege *et al.*. Coherent X-ray diffractive imaging: applications and limitations [J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(19): 2344~2353
- 15 J. M. Rodenburg, A. C. Hurst, A. G. Cullis *et al.*. Hard-X-ray lensless imaging of extended objects[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(3): 034801~034804
- 16 M. H. Makieli, A. J. Devaney, A. Schatzberg. Tomography reconstruction from optical scattered intensities[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, **9**(8): 1356~1363
- 17 T. C. Wedburd, J. J. Stamnes. Experimental examination of the quantitative imaging properties of optical diffraction tomography[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(3): 493~500
- 18 J. Miao, D. Sayre, H. N. Chapman. Phase retrieval from the magnitude of the Fourier transforms of nonperiodic objects[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(6): 1662~1669
- 19 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769
- 20 Guanrong Ying, Qing Wei, Xia Shen *et al.*. A two-step phase-retrieval method in Fourier-transform ghost imaging [J]. *Opt. Comm.*, 2008, **281**(20): 5130~5132
- 21 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Beijing University Press, 1984, 245~251
赵凯华, 钟锡华. *光学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984, 245~251