

文章编号: 0258-7025(2002)02-0164-05

# 基于激光等离子体 X 光源的软 X 射线全息 显微成像实验的模拟研究

张长学, 程 静, 韩申生, 吴衍青, 汤宇辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学研究实验室, 上海 201800)

**提要** 对目前实际可获得的台式激光等离子体 X 射线光源各种性能进行了分析, 论证了利用这类设备获得有实际应用价值的 X 光全息图的可行性。并在此基础上进行数值模拟, 讨论了各种参数对实验结果的影响, 讨论了缩短实验时间及获得更高分辨率的可能途径。

**关键词** 全息, 显微, X 射线, 激光等离子体

**中图分类号** TB 877 **文献标识码** A

## Simulative Research of holographic Microscopy Based on Laser-plasma Soft X-ray Source

ZHANG Chang-xue, CHENG Jing, HAN Shen-sheng, WU Yan-qing, TANG Yu-hui

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Different property parameters of practically available table-top laser-plasma X-ray source are analyzed theoretically, and the feasibility of making valuable X-ray hologram using these kinds of facilities is proved. On the basis of these achievements, in-line holography and image reconstruction are programmed and simulated. Parameters including X-ray coherence, signal to noise ratio, source intensity and recording length that can influence experimental result are discussed. Furthermore, the possible methods to reduce exposure time and to acquire higher resolution are studied.

**Key words** holography, microscopy, table-top X-ray, laser plasma

## 1 引 言

X 射线全息显微以其能观察微小样品的三维结构的潜在优势而日益受到人们的重视。早在 1952 年 Baez 就提出利用 X 射线进行显微成像的构想。此后, 随着理论和实验方面的进展, 成像分辨率不断提高。1986 年, Howell 等采用波荡器和高分辨率光刻胶进行同轴 X 光全息实验, 全息图分辨率达到 40 nm。1990 年, Jacobsen 等利用波长为 2.57 nm 的同步辐射源, 记录下生物样品的同轴全息图, 分辨距离小于 56 nm<sup>[1]</sup>。目前此类实验大多采用同步辐射光源产生的 X 光, 用高分辨率的光刻胶(PMMA)作为记录介质, 实验得到的全息图经采样后输入计算机, 用数字方法重现原物体。由于缺乏合适的 X 光透镜和分束器, 多采用同轴全息或无透镜傅里叶变换

全息两种记录方式。应当指出, 目前的记录及重现手段距医学、生物学的实际应用还有相当距离, 主要困难在于昂贵的大型同步辐射源作为探测仪器目前并不现实。随着台式器件的发展, 目前可以用体积小、价格便宜的台式激光等离子体 X 射线光源, 产生较低相干度的 X 光激光。本文试图探讨用这种方法获得有实际应用价值的 X 射线全息图的可能性。

## 2 模拟光路及参数分析

### 2.1 模拟光路

实验光路如图 1 所示, 激光入射在由电机驱动的带状固体靶上产生 X 射线, 经滤波、准直后照射样品并在光刻胶上成像, 其中 X 光反射镜为起滤波

收稿日期 2000-11-08; 收到修改稿日期 2000-12-25

作者简介 张长学(1976—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士, 主要从事 X 射线全息显微研究。

作用的多层膜反射镜。其简化后的等效光路如图 2 所示。

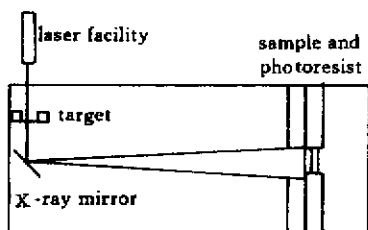


图 1 实验排布

Fig.1 Experimental arrangement

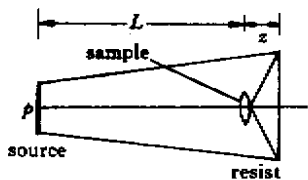


图 2 简化的实验排布

Fig.2 Simplified arrangement

### 2.2 光源

文献 2 指出,原子序 10 号以前的固体靶比较容易产生单一线谱。其中碳的拉曼  $\alpha$  线(波长 3.4 nm)的 X 射线谱如图 3 所示,可见以 3.4 nm 处的 X 光转化率最高。使脉冲激光聚焦在带状靶上产生高密度等离子体即可产生前向 X 射线。

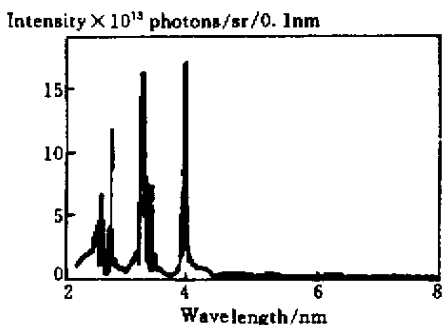


图 3 X 射线源的光谱

Fig.3 Spectrum of X-ray from laser-plasma X-ray source

### 2.3 空间相干性

据文献 3 及[4],当  $\omega \geq 2.5\lambda z/\Delta$  (其中  $\omega = \lambda l/\rho$  表示光源的空间相干长度; $\Delta$  表示记录介质可记录最小条纹间距; $\lambda$  为成像光波长; $z$  为物距; $l$  为从光源到样品的距离; $\rho$  为扩展光源线度)时数字复原全息图的结果与完全相干情形基本一致,偏差小于 10%。若取  $\lambda = 3.4 \text{ nm}$ ,  $\Delta = 50 \text{ nm}$ ,可以得出  $l \geq$

$500z$ 。另外,根据范西特·泽尼克定理<sup>[5]</sup>,当 X 光源对 X 光全息记录装置的最大张角小于  $0.16\lambda/\rho$  时,就能保证获得大于 0.88 的空间相干度。此时  $\frac{2\rho}{l+z} < \frac{0.16\lambda}{\rho}$  取  $\rho = 10 \mu\text{m}$ ,得到  $\lambda l > 1250 \mu\text{m}^2$ 。当  $\lambda = 3.4 \text{ nm}$ ,  $l > 0.37 \text{ m}$  即可满足条件。

假设光源强度及焦斑大小保持不变,则物面上总的曝光强度  $I \propto 1/l^2$ ,由此看来,似乎  $l$  只要满足大于 0.37 m 的条件越小越好。但另一方面,由于  $l \geq 500z$  的限制, $l$  的减小将使  $z$  相应减小(小于 1 mm),而这不仅会带来实验操作上的困难,还会造成复原时严重的孪生像问题。理论计算及数字模拟表明,取  $z = 0.8 \text{ mm}$ ,  $l = 0.4 \text{ m}$  时即可得到较为理想的结果。

### 3 数字模拟结果

利用 FFT 算法,可以很方便地模拟出二维平面物体的全息成像及复原过程。所用的物体如图 4(a)所示的透过率为 1 的 F 字符。适当选择取样间隔,使物体取样范围和得到的全息图尺寸相同<sup>[6]</sup>。计算中取样点数为  $1024 \times 1024$ ,取样间隔为 51.5 nm。如果用理想单色光照明,不考虑噪声的影响,可以得到相应的全息图(如图 4(b))。以一条经过

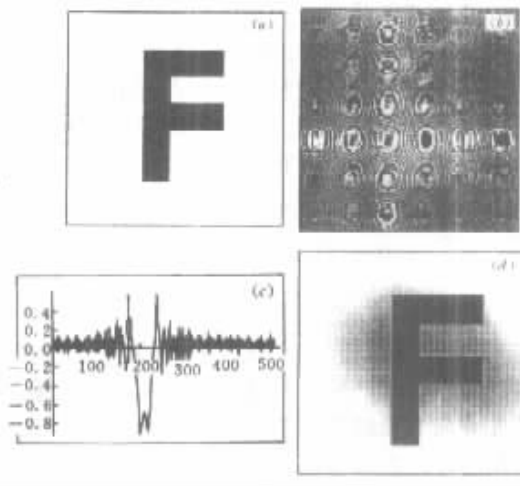


图 4

(a)样品 (b)样品的理想单色光全息图; (c)全息图能量中心一维能量密度图 (d)理想单色光复原图

Fig.4

(a)Sample;(b)Hologram of the sample by monochromatic light;(c)1-D PSD of the hologram through its center;(d)Reconstructed image by monochromatic light

该图强度最高点且平行于  $x$  轴的直线为横坐标, 图上能量密度为纵坐标作图, 则得到图 4(c)。用参考光相同的单色光复原全息图, 得到如图 4(d) 的复原像。可以看出, 在这种理想情况下, 得到的复原像边缘清晰, 与原物体完全相似。其中 F 中央部分亮度较边缘稍高, 这是由于复原时孪生像的影响。在实际情况下, 总会有各种因素影响成像质量。

### 3.1 物体与底片的距离

计算中发现, 物体和底片之间的距离与复原像质量有密切的关系。当两者距离较近时, 全息图产

生的虚像与实像叠加, 使光强在原物基础上有一定的起伏。而当两者距离较远时, 此虚像尺寸增大, 光强减弱, 由它引起的起伏逐渐减小而至可以被忽略。图 5(a)~(c) 显示了这种变化趋势。

另外还发现, 若物体尺寸较小 ( $\mu\text{m}$  量级), 则孪生像影响会变得很小。此时即使  $z$  值较小, 也可以得到理想的复原像。在相同  $z$  值情况下, 可比较图 5(d)。这一点与 Jacobsen 等的实验结果是完全一致的<sup>[1]</sup>。

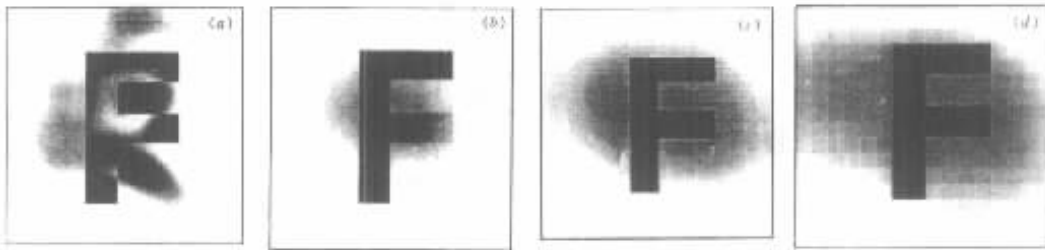


图 5 (a)  $z = 200 \mu\text{m}$  时的复原图; (b)  $z = 500 \mu\text{m}$  时的复原图; (c)  $z = 800 \mu\text{m}$  时的复原图; (d)  $z = 200 \mu\text{m}$  时小物体的复原图

Fig. 5 (a) Reconstructed image when  $z = 200 \mu\text{m}$ ; (b) Reconstructed image when  $z = 500 \mu\text{m}$ ; (c) Reconstructed image when  $z = 800 \mu\text{m}$ ; (d) Reconstructed image of little sample when  $z = 200 \mu\text{m}$

### 3.2 光源大小

光源大小实际上表示光源的空间相干性。光源尺寸越小, 对应的相干性越好, 成像质量也越好。这里将使用一种简化后的模型来研究扩展光源的空间相干特性。如图 6 所示, 由于  $l \gg \rho$ , 从光源中心  $O$  点发出的球面波到达照相底片时可近似看作传播方向平行于光轴的平面波。以它为参考波, 物上中心点  $P$  在底片上得到的全息图为中心位于  $(x_i, y_i)$  的菲涅耳波带片。同理, 光源面上  $(x_s, y_s)$  点发出的光波作为参考波时, 将在像面上得到中心位于  $(-x_s \frac{z}{l}, -y_s \frac{z}{l})$  的菲涅耳波带片(图 6)。由于源面上不同点之间是完全不相干的, 像面上  $P$  点实际的全息图是这些波带片的强度叠加。讨论中忽略了参考光方向与光轴之间有一定夹角时, 全息图将沿离开原点方向有微小的畸变。当用平面单色光复原  $P$  点的全息图时, 每一个菲涅耳环对应一个有一定空间展宽的点物复原像, 总的复原图便是这些复原像的强度叠加, 从而使复原像的空间展宽比单色光成像时大, 这就是光源的空间相干性对成像分辨率的影响机理(图 7)。以上只考虑物上一点  $P$ , 推广至整个物体时, 亦可得到同样的结果。

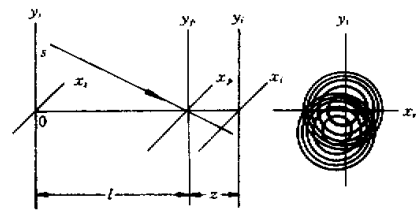


图 6 光源上一点与其对应效果位置示意图

Fig. 6 Sketch map of a point on the source plane and its respondent result on the image plane

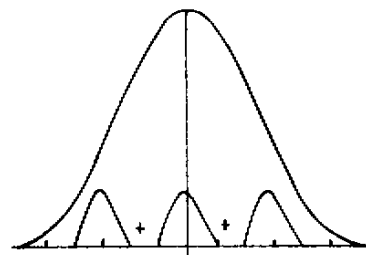


图 7 不同光源点效果叠加

Fig. 7 Total result of all the source

将是单色光成像时复原图在半径为 20 nm 的圆内平移叠加, 这将使点复原像实际展宽增大 20 nm 左右。

假设光源线度为  $20 \mu\text{m}$ ,  $l = 500z$ , 则复原像

图 8(a) ~ (c) 显示相干性逐渐增加时复原像的变化。可以清楚地看出,相干度的增加使复原像边缘更清晰锐利。因此在能量一定时,我们总希望光源面积尽可能小。

### 3.3 全息图的信噪比

事实上,从理论上彻底研究信噪比对成像分辨率的影响是很困难的,而且各种实验排布、光学元件性能都将产生不同特性的噪声。在模拟计算中我们采用了以下物理模型:假设全息图上各处都均匀分布着随机白噪声,全息条纹强度必须超过噪声强度某一倍数,在数字重现时才可以被当作有用信息加

以利用,否则便视为不能分辨的信息。全息条纹起伏越小,相应的信噪比越低,直到某一极限时信号完全被噪声湮没而不可识别。在文献 [1] 中,由全息图上能量密度与条纹空间频率关系图可以看出,在  $31 \mu\text{m}^{-1}$ , 即条纹宽度为 16 nm 处,信噪比为 4:1,并将其视为条纹可利用的下限。在计算得到的理想情况下的全息图上,相对于不同空间分辨率,将相应的空间频率处强度的 1/4 作为噪声强度,将小于此强度的成分看作噪声,即可得到图 9(a) ~ (c) 的复原像。

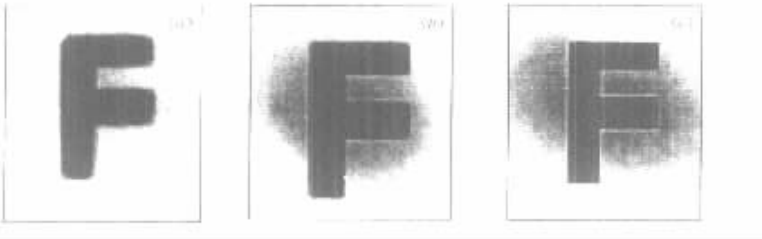


图 8 (a)光源半径为 50 μm ;(b)光源半径为 25 μm ;(c)平面单色光源情况

Fig. 8 (a) Source with 50 μm radius ;(b) Source with 25 μm radius ;(c) By planar monochromatic source



图 9 (a)全息图条纹截止宽度为 300 nm ;(b)全息图最小条纹宽度为 200 nm ;(c)全息图最小条纹宽度为 100 nm

Fig. 9 (a) From hologram with the lowest stripe width 300 nm ;(b) From hologram with the lowest stripe width 200 nm ;

(c) From hologram with the lowest stripe width 100 nm

## 4 讨论

针对台式 X 射线全息显微成像实验的主要方面进行了模拟研究,并讨论各种因素对实验结果的影响。本文所用的参数都是现有条件能达到或据文献报道可实现的。因此,这些模拟工作对实验研究将有较强的参考价值。下面讨论可能会影响和改进实验结果的几个因素。

### 4.1 曝光量要求

由文献 [7],由高密度等离子体所发出的 X 射线在  $\Delta\nu/\nu = 10^{-3}$  带宽中单脉冲光谱亮度目前已可以达到  $10^{27}$  光子/cm<sup>2</sup>·s·sr。将 X 光源近似看作余弦发射体,以单次脉冲脉宽 50 ps,频率 1000 Hz 的激光器为例,若不计传输损耗,在光刻胶的 1 μm<sup>2</sup> 面积

上,在 1 s 时间内接收到的光子数为 2000 个,相应的能量为  $1.2 \times 10^{-13}$  J。

Steve Lindas 等在 1996 年用同步辐射 X 射线源所做的同轴软 X 射线全息显微实验中<sup>[8]</sup>,光刻胶上曝光量达到  $1.3 \times 10^{-9}$  J/μm<sup>2</sup>,相应复原图的分辨率约为 40 nm。实际上,我们的理论计算表明,Lindas 等的实验在重现中并没有利用到全息图上的全部信息,我们可以降低光照度的要求而不影响实际分辨率,这样就进一步放宽了对曝光时间的限制<sup>[9]</sup>。根据文献 [9] 的计算,在该实验中假设像距 z 为 300 μm,则其实际需要的光照度只需原来的

$$(300/500)^2 = 0.36$$

这样,如果我们想要获得同样的分辨率,曝光时间大约是

$$(1.3 \times 10^{-9})(1.2 \times 10^{-13}) \times 0.36 = 4.3 \times 10^3(\text{s}) \approx 1.2(\text{h})$$

目前我们的固体带状移动靶完全可以达到这样的时间要求(事实上如果实验装置的稳定性控制在一定范围内,可以持续曝光 5 h 以上)。另外,适当放宽分辨率的要求,亦能大幅度降低曝光量的要求。文献 [1] 指出,全息图上的能量密度随着空间频率的升高而降低,其大致关系为  $\text{PSD} \propto f^{-3.2}$ 。也就是说,假如其他要求不变,将分辨率从  $40 \mu\text{m}$  降到  $80 \mu\text{m}$ ,曝光时间即可从 1 h 降到 10 min 左右。在某些希望用小型的比较经济的设备获得分辨率要求很高的全息显微图的场合,这种方法尤其具有应用价值。

比照国内做过的同类实验,如在国家同步辐射实验室软 X 射线显微术实验站进行的同轴软 X 射线全息成像实验,用 30 min 的曝光时间得到了  $2 \mu\text{m}$  的重现分辨率,这样的实验结果无疑是鼓舞人心的。另外,如果用灵敏度更高的卤化物薄片代替光刻胶(单位面积上曝光量只需光刻胶的  $1/50$ )<sup>[10]</sup>,亦可大幅缩短曝光时间。因此可以预计,随着实验条件和消噪声手段的提高,此类实验结果将会进一步改善。

#### 4.2 时间相干性的讨论

我们将要采用的碳的拉曼  $\alpha$  线的频宽是与等离子体的温度、密度有关的单一线谱,其  $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-4} \sim 10^{-3}$ 。如图 4 所示,考虑物面上一点,设其全息图可分辨的最小条纹间距为  $50 \text{ nm}$ ,即  $\frac{\lambda}{\sin\alpha} = 50 \text{ nm}$ ,此处物点衍射光与参考光光程差为  $\frac{z}{\cos\alpha} - z_0$ 。时间相干性要求相干长度  $L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} > \frac{z}{\cos\alpha} - z_0$ 。由此可得  $\Delta\lambda/\lambda < 1/680$ 。虽然目前的滤波器件,如菲涅耳波带片和 X 射线多层膜反射镜的  $\Delta\lambda/\lambda$  大致在  $1/100$  至  $1/200$  之间,但考虑到碳的单一线谱结构,只要滤波器件能有效抑制距  $3.4 \text{ nm}$  较远处的光谱成份,即可满足时间相干性的要求。

#### 4.3 其他曝光方式

值得一提的是,现有 X 射线波段 CCD 的灵敏度更比卤化银类胶片高 50 至 100 倍,分辨率在  $1 \mu\text{m}$

以下。如果用合适波段 CCD 代替胶片,不仅曝光时间大大缩短,而且全息图可不经处理和扫描直接输入计算机进行复原,实验有达到实时显示的潜力。另据文献 [11],使用 CCD 接收全息信号时,用基于两张全息图的方法可很方便地消除孪生像的影响。这将允许进一步缩短底片与样品的距离,使像面上强度更高。因此有理由相信,这方面的实验工作将是前景乐观而有意义的。

#### 参 考 文 献

- 1 M. Howells, C. Jacobsen, J. Kirz *et al.*. X-ray holograms at improved resolution: a study of zymogen granules. *Science*, 1987, **238**(4826):514 ~ 517
- 2 C. Jacobsen, M. Howells, J. Kirz *et al.*. X-ray holographic microscopy using photoresists [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(10):1847 ~ 1861
- 3 Zhang Yuxuan, Jiang Shiping, Fu SHaojun *et al.*. Soft X-ray in-line holographic microscopy and numerical reconstruction [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(2):145 ~ 150 (in Chinese)
- 4 G. M. Zeng, H. Daido, K. Murai *et al.*. Line x-ray emissions from highly ionized plasmas of various species irradiated by compact solid-state lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(8):3355 ~ 3362
- 5 Cheng Jing. Researches on Incoherent and Partially Coherent X-ray 3-D and Phase-imaging Technology [D]. Graduate Thesis of Master's Degree, 1998. 9, 43
- 6 Cheng Jing, Han Shensheng, Shao Wenwen *et al.*. Theory of X-ray in-line Gabor holography with partial coherent source [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **9**(3):306 ~ 314 (in Chinese)
- 7 Cheng Jing, Han Shensheng. On x-ray in-line Gabor holography with a partially coherent source [J]. *Opt. Comm.*, 1999, **172**:17 ~ 24
- 8 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. 5th ed. Pergamon, Oxford, 1975
- 9 Steve Linds, Malcolm Howells, Chris Jacobsen *et al.*. X-ray holographic microscopy by means of photoresist recording and atomic-force microscope readout [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(9):1788 ~ 1800
- 10 R. C. Elton. X-ray Laser. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese)
- 11 Johnson C. Solem, George F. Chapline. X-ray biomicroholography [J]. *Opt. Eng.*, 1984, **23**(2):193 ~ 203