

软 X 射线多缝干涉实验研究

陈建文 徐至展 朱佩平 肖体乔 寇雷刚

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

谢行恕 贾成芝 徐向东 蒋诗平 单晓斌

(中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

提要 采用菲涅耳波带板作为色散元件, 小孔压缩线宽的方法, 在合肥国家同步辐射实验室在水窗波段完成了一个多缝干涉实验, 观察到清晰的干涉条纹。

关键词 软 X 射线, X 射线干涉, X 射线全息术

1 引 言

近几年来随着同步辐射源亮度不断提高, X 射线激光取得的重大进展, X 射线光学技术正在接近实用化, 这些有力地推动了 X 射线全息术和 X 射线层析求的发展^[1~5]。

X 射线具有很强的穿透性, 特别是波长为 2.32~4.37 nm 的“水窗”软 X 射线, 水和蛋白质对其的吸收相差一个数量级^[5], 使“水窗”软 X 射线对生物样品的成像具有天然的衬度机制, 使人们有可能在细胞水平上观察生物大分子的三维结构, 从而揭示生命过程的秘密, 吸引了众多科学家的广泛兴趣。

本研究的目的在于采用菲涅耳波带片作为色散元件, 用小孔压缩线宽, 改善同步辐射装置 X 射线束的时间相干性, 并通过多缝干涉实验, 从实验的角度探讨在合肥国家同步辐射装置上进行 X 射线无透镜傅里叶变换全息成像实验的可能性。

2 实验方法

和一般 X 射线源相比, 同步辐射源是一个亮度高、频带宽的 X 射线源, 为了改善 X 射线束的单色性, 我们采用菲涅耳波带片和小孔压缩线宽。利用菲涅耳波带片在焦点的色散, 并通过调整小孔的半径和在焦点的位置, 就可获得所需要的波长和线宽。然后根据空间相干性的要求, 将待拍摄的多缝放置在小孔后面, 即可实现多缝干涉。实验装置如图 1 所示, 四缝的缝宽 $d = 2 \mu\text{m}$, 其中三条缝等间距, 与另一缝相距 $d_1 + d_2 = 32 \mu\text{m}$ 。下面我们给出相干性的计算。

2.1 空间相干性

软 X 射线波长为 2.8 nm, 源的半径 r_s 为 $4 \mu\text{m}$, 物平面上参考狭缝到最远物狭缝的距离 D_{max} 为 $32 \mu\text{m}$, 源到物平面的距离为 z_s , 见图 2。根据范西特 - 泽尼克定理, 要使空间相干度大于

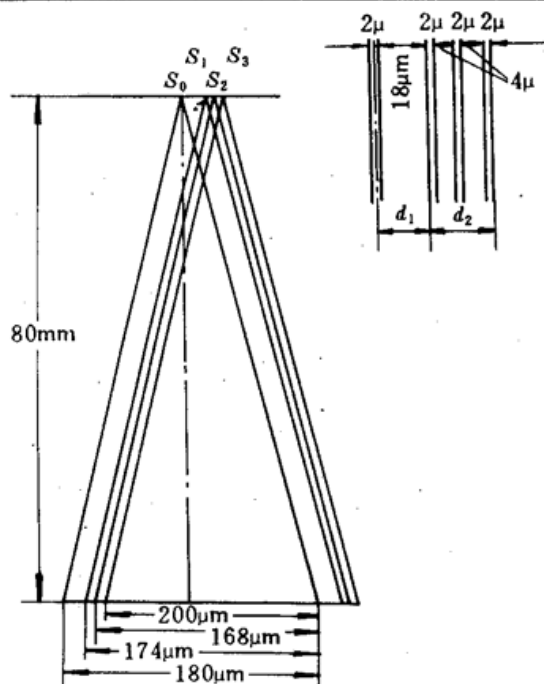


Fig. 1 Shows the related dimensions of the four-slit interference experiment

差的条件下,干涉条纹的可见度为零。要获得可观的可见度,应使相干长度等于光程差的两倍,即 $L_c \geq 90 \text{ nm}$ 。

或等于 0.88, 必须满足条件 $D_{\max} \leq 0.16\lambda z_s/r_s$, 于是得到 $z_s \geq D_{\max}r_s/0.16\lambda = 286 \text{ mm}$, 因此只要小孔到物面距离大于 286 mm, 就可以实现相干照明。

2.2 时间相干性

两相距最远狭缝的衍射波在干涉图上的光程差应小于相干长度。由图 2 可知, 相干长度应满足下列条件

$$\begin{aligned} L_c &\geq \left| \left[z^2 + \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right]^{1/2} - \left[z^2 + \left(\frac{W}{2} - D_{\max} \right)^2 \right]^{1/2} \right| \\ &= \left| \left[z + \frac{(W/2)^2}{2z} \right] - \left[z + \frac{(W/2 - D_{\max})^2}{2z} \right] \right| \\ &\approx WD_{\max}/2z = D_{\max}\lambda/d = 44.8 \text{ nm} \end{aligned}$$

上式是临界相干条件, 即相干长度(波列长度)只需大于等于光程差。实际上在相干长度等于光程

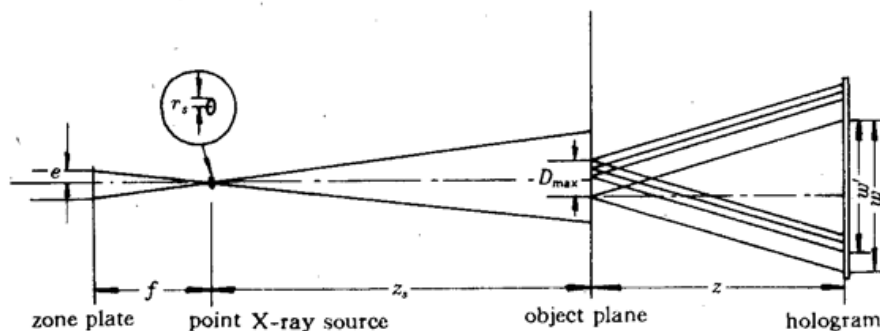


Fig. 2 Schematic diagram of the four-slit interference experiment

3 时间相干长度的估算

实验中 X 射线束的时间相干长度可以根据波长、波带片的半径和焦距以及滤波小孔半径等四个参量来计算。

我们用的波带片是中国科技大学同步辐射实验室提供的。波带片的半径 ρ_k 为 2.8 mm, 当波长 λ 为 2.8 nm 时, 波带片的焦距 f 为 530 mm。由这三个参数可以推出波带片的其他参数。波带片的第一波带半径 $\rho_1 = (f\lambda)^{1/2} = 38.52 \mu\text{m}$, 波带数 $k = (\rho_k/\rho_1)^2 = 5283$, 最外圈波带宽度 $\Delta\rho_{\min} = \rho_k - \rho_{k-1} = \rho_1[k^{1/2} - (k-1)^{1/2}] = 0.265 \mu\text{m}$ 。

这个结果表明, 只有当加工精度达到 0.265 μm 的水平, 才能加工出具有以上三个参数的波带片。为了使我们的估算具有更高的可信度, 设最外圈波带宽度 $\Delta\rho_{\min}$ 为 0.5 μm , 可得波带数 k 约为 1500, 波带片的半径 ρ_k 为 1.5 mm。因此, 下面的估算采用比较保险的数据。

波带片半径 ρ_k 为 1.5 mm, 滤波小孔半径 r_s 为 4 μm 。相干长度可从以下两个方面来估算:

(1) 如图 3 位于 $2\Delta f$ 范围内的色散光谱 $\Delta\lambda$ 可以全部通过小孔。由此可计算出相干长度的上限。 $f = \rho_k^2/\lambda$, $\Delta f/f = -\Delta\lambda/\lambda$, $\Delta f/r_s = f/\rho_k$, $\Delta f = r_s f/\rho_k$, 得 $|\Delta\lambda| = \lambda\Delta f/f = \lambda r_s/\rho_k$ 。

考虑到焦距正的增量和负的增量, 实际焦距的变化范围应是 Δf 的两倍。因而波长的变化范围也应是 $|\Delta\lambda|$ 的两倍。有 $\Delta\lambda_1 = 2|\Delta\lambda| = 2\lambda r_s/\rho = 15 \times 10^{-3} \text{ nm}$, 得相干长度的上限为 $L_{\text{cmin}} = \lambda^2/\Delta\lambda_1 = 0.52 \mu\text{m}$ 。

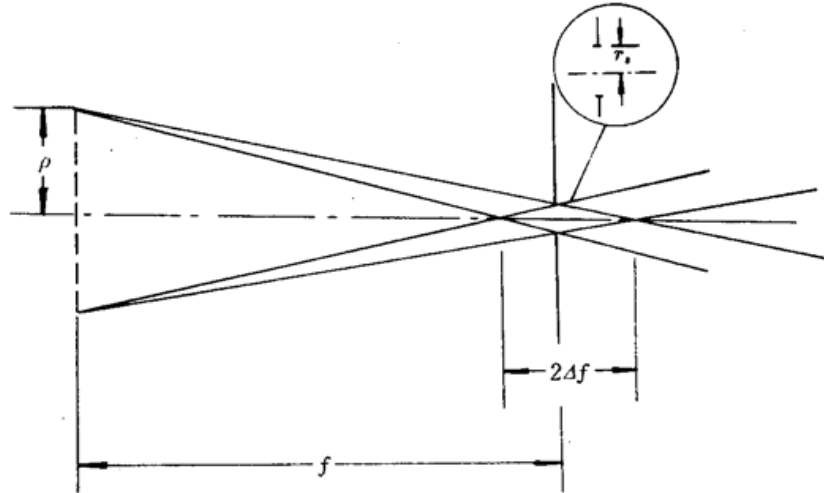


Fig. 3 Scheme of the filter with a zone plate

(2) 使用波带片进行准直和滤波时, 只有用和焦斑尺寸相当的滤波小孔滤掉零级透射光和高频杂散波, 才能获得最好的滤波效果。这意味着我们应该用半径为 $0.6 \mu\text{m}$ 的滤波小孔才能和波带片匹配。由于缺乏半径这样小的小孔, 可用的滤波小孔的半径 r_s 为 $4 \mu\text{m}$ 。根据滤波小孔, 可以算出与滤波小孔匹配的波带片的有效半径, 从而计算出相干长度的下限。波带片的有效半径为 $\rho_{\text{eff}} = 0.61f\lambda/r_s = 226 \mu\text{m}$, 得到 $\Delta\lambda_2 = 2\lambda r_s/\rho_{\text{eff}} = 0.1 \text{ nm}$ 。则相干长度的下限为 $L_{\text{cmin}} = \lambda^2/\Delta\lambda_2 = 78.4 \text{ nm}$ 。这个结果已经接近理论计算的时间相干条件 $L_c \geq 90 \text{ nm}$ 。如果要继续提高 X 射线束的时间相干性, 可采取两项措施: ① 缩小滤波小孔的尺寸以提高相干长度的上限; ② 用半径等于波带片有效半径的光阑遮去波带片的中心部分, 挡住相干性较差的衍射光, 见图 4。

从上面的计算可以看出, 采用波带板加小孔的方法, 既可以满足空间相干性的要求, 又可以满足时间相干性的要求。

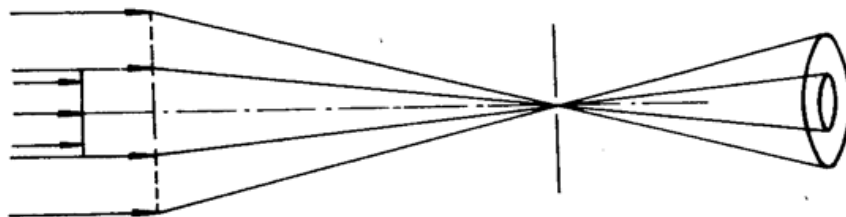


Fig. 4 An aperture is used to improve the monochromatic radiation

4 实验结果

实验光路如图 2。实验在合肥同步辐射实验室软 X 射线显微站上进行, 样品是一个四缝金箔, 由中国科学院微电子中心提供。同步辐射光源能量为 800 MeV , 平均束流约为 100 mA 。

图中波带片和滤波小孔配合用来改善 X 射线束的时间相干性。波带片是一种衍射聚焦光学元件, 因而在焦点附近有色散。焦距的色散 Δf 和 X 射线束的谱宽 $\Delta\lambda$ 之间的关系为 $\Delta f = -(f/\lambda)\Delta\lambda$ 。因为 $f \gg \lambda$, 所以 X 射线波长的微小变化, 将导致焦距有较大的色散。因此, 将小孔放

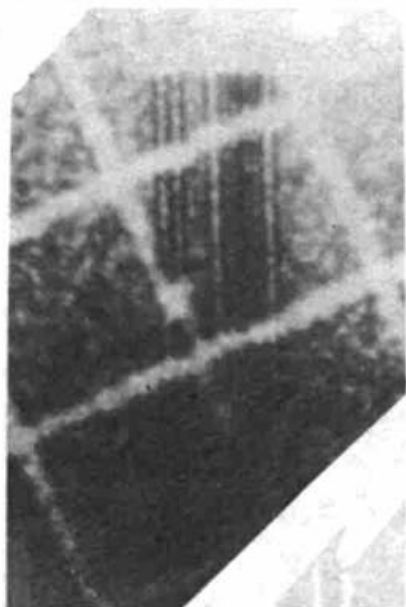


Fig. 5 Four-slit interference fringes

置不同焦距处,便可选择不同的中心波长,而小孔的半径则决定 X 射线束的谱宽。为了缩短曝光时间,我们采用了感光灵敏度较高的电子干板记录干涉条纹。曝光时间 8 min,拍摄的干涉图形经光学显微镜放大 200 倍以后,如图 5 所示。四缝金箔被放置在电子显微镜上用的标准铜网上,图中的方格即是铜网。由于使用普通的电子干板作为记录介质,因而噪声比较大。由于受到实验条件的限制,记录介质和样品的距离还不够大,左边狭缝的单缝衍射场和右边三条缝的衍射场重叠程度不高。在下一步的实验中,我们准备用缝宽为 $1\ \mu\text{m}$ 的样品做实验,拍摄一维无透镜傅里叶变换全息图。

致谢 作者对中国科技大学同步辐射实验室傅绍军为实验提供了波带片,中国科学院微电子中心王玉玲为我们制备了四缝金箔,一并感谢,作者还对合肥国家同步辐射实验室加速器部以及办公室的同事们热诚合作深表谢意。

参 考 文 献

- 1 M. R. Howells, M. A. Iarocci, J. Kirz. Experiments in X-ray holographic microscopy using synchrotron radiation. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, **A3**(12): 2171~2178
- 2 J. E. Trebes, S. B. Brown, E. M. Campbell *et al.*. Demonstration of X-ray holography with an X-ray laser. *Science*, 1987, **238**(4826): 517~519
- 3 C. Jacobsen, M. Howells, J. Kirz *et al.*. X-ray holographic microscopy using photoresists. *J. Opt. Soc. Am.*, 1990, **A7**(10): 1847~1861
- 4 I. McNulty, J. Kirz, C. Jacobsen *et al.*. High resolution imaging by Fourier transform X-ray holography. *Science*, 1992, **258**(5): 1009~1012
- 5 J. W. Chen, Z. Z. Xu, P. P. Zhu *et al.*. Some problems on reconstruction of soft X-ray hologram with visible light. *Acta Optica Sinica*, 1994, **B3**(1): 77~81
- 6 陈建文, 徐至展, 朱佩平等. X 射线全息术. *物理学进展*, 1995, **15**: 125~147

Experimental Study on Soft X-ray Multi-slit Interference

Chen Jianwen Xu Zhizhan Zhu Peiping Xiao Tiqiao Kou Leigang
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Xie Xingsu Jia Chenzi Xu Xiangdong Jiang Siping Shan Xiaobin
(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029)

Abstract Multi-slit interference experiments have been carried out in Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory at the X-ray water-window wavelength region using a Fresnel zone plate as a dispersion element and an aperture to reduce the linewidth.

Key words soft X-ray, X-ray interference, X-ray holography