

合肥国家同步辐射源 X 射线束 时间相干长度的估算

陈建文 徐至展 肖体乔 朱佩平 陈 敏

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

谢行恕 贾成芝

(中国科学技术大学基础物理中心, 合肥 230029)

徐向东 蒋诗平 单晓斌 傅绍军

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘 要 报道了合肥国家同步辐射实验室软 X 射线束的时间相干长度的理论估算、方法和实验结果。

关键词 软 X 射线, 同步辐射, 相干长度。

1 引 言

在波长为 2.32~4.37 nm 波段的软 X 射线, 有一种特殊性质, 蛋白质对其的吸收率比水的高将近一个数量级。这就是所谓的“冰窗”。“冰窗”波段的 X 射线的特殊性质, 为其对生物样品的成像提供了天然的对比度增强机制^[1]。加上 X 射线穿透性强的性质, 使得利用“冰窗”对生物样品成像比起电子显微镜成像有着独特的优点。无论是软 X 射线全息^[2]、显微或层析^[3], 它们对同步辐射源的辐射谱宽都有一定的要求。为了压缩线宽, 通常采用一高分辨率的光栅。而合肥国家同步辐射源软 X 射线显微站采用一普通软 X 射线菲涅耳波带板作为色散元件, 用小孔压缩线宽, 以改善同步辐射装置软 X 射线束的时间相干性。人们迫切地希望知道这种压缩线宽的效果, 并能给出一定量的结果。

本文就该实验装置软 X 射线束的时间相干长度作一理论估算以及对实验结果作一介绍。

2 理论估算

波带片其实就是一个变间距圆形光栅, 其线密度沿径向递增。利用波带片几乎可以对所有波长的辐射成像和聚焦。最基本的波带片是菲涅耳波带片, 它是由一系列黑白相间的环带组成。

根据菲涅耳圆孔衍射理论, 如果按半径 $\rho_k = (kf\lambda)^{1/2}$ 把圆孔连续地分割成一个个半波带,

把奇数(或偶数)个半波带遮住,就可以在衍射场中获得类似于透镜的聚焦成像。式中 k 为半波带数, f 为波带片的焦距, λ 为辐射波长。按照这一原理制作的波带片可以当作透镜对物成像,并遵循以下成像关系:

$$1/s_0 + 1/s_1 = 1/f \quad (1)$$

式中 s_0 为物距, s_1 为像距, f 为波带片焦距。波带片成像有一系列虚实焦点,其焦距为:

$$f_m = \rho_1^2/m\lambda \quad (2)$$

式中 m 为衍射级次, $m = \pm 1, \pm 2, \dots$; ρ_1 为第一半波带内径,而圆环的半径可表为:

$$\rho_k^2 = k\lambda f + (k\lambda)^2/4, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

当 $N \geq 100$ 时,它可以看成一个单色透镜。

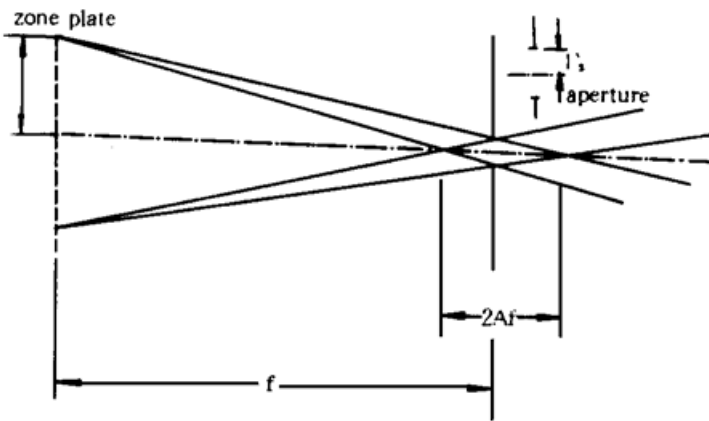


Fig. 1 The scheme of the filter set-up with a zone plate

$$\begin{aligned} \because f &= \rho_1^2/\lambda, & \therefore \Delta f/f &= -\Delta\lambda/\lambda \\ \therefore \Delta f/r_s &= f/\rho_k, & \therefore \Delta f &= r_s f/\rho_k \end{aligned} \quad (4)$$

$$|\Delta\lambda| = \lambda\Delta f/f = \lambda r_s/\rho_k \quad (5)$$

式中 r_s 为滤波小孔的半径。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。则

$$\Delta\lambda = 2|\Delta\lambda| = 2\lambda r_s/\rho \quad (6)$$

得相干长度为

$$L_c = \lambda^2/\Delta\lambda = \lambda\rho/2r_s \quad (7)$$

式中 ρ 为波带片的半径。从(7)式可以看出,合肥同步辐射源软 X 射线显微站时间相干长度是滤波小孔 r_s 和波带片的半径 ρ 的函数。要提高 X 射线束时间相干性可采用以下两项措施:(1) 用小尺寸的滤波小孔 r_s , (2) 采用大尺寸的波带片 ρ 。这是显而易见的。当然波带片的尺寸和滤波小孔都受到制作工艺的限制。

3 实验结果

首先要说明的是,目前不能像在可见光波段那样用诸如迈克尔逊干涉方法来直接测量软 X 射线束的相干长度,只能用一些极其简单的方法作一些验证。所用实验装置如图 2 所示。实验是在合肥国家同步辐射实验室软 X 射线显微站上进行的。样品是一个四缝金箔,由中国科学院微电子中心提供,具体细节见文献[4]。同步辐射光源的电子能量是 800 MeV,平均束流约为 100 mA。辐射中心波长 $\lambda = 2.8$ nm。波带片的焦距为 530 mm。最外一圈波带宽度,估计为 $0.5 \mu\text{m}$ 。由此可推导出该片的半径 $\rho = 1.5$ mm。实验中所使用的滤波小孔半径 r_s 为

从(2)式可以看出,波带片具有很强的色散($f \propto 1/\lambda$),因此当一定带宽的 X 射线入射到波带片上,不同波长的射线其焦点在轴上的位置不同,将适当孔径的光阑置于波带片的焦平面,改变光阑在轴上的位置即可选出所需波长的 X 射线及压缩线宽。这是本文的物理基础。

压缩线宽系统如图 1 所示。如果中心波长选择在小孔的中心部分,位于 $2\Delta f$ 范围内的色散光谱 $\Delta\lambda$ 可以全部通过小孔。由此可给出相干长度的解析表达式。

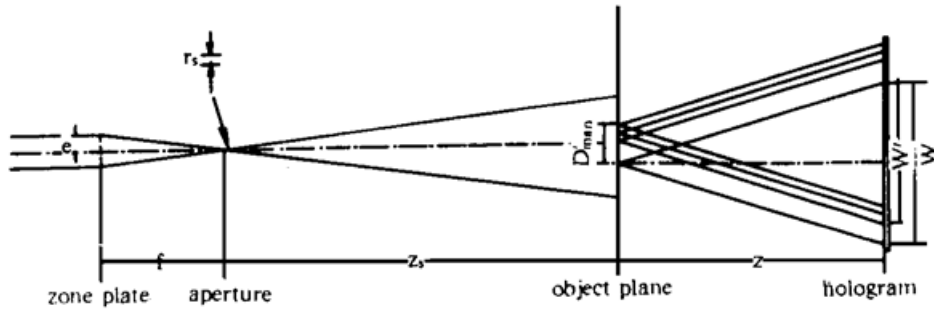


Fig. 2 The scheme of four-beam interference experiment set up

4 μm , 获得的四缝干涉图形如图 3 所示。

将上述实验值代入(7)式可以求得其相干长度上限 $L_c = 0.52 \mu\text{m}$ 。必须注意的是, 采用波带片当作色散元件和小孔滤波时, 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光, 才能获得最佳的滤波效果。经简单的计算可知, 应选用半径为 $0.6 \mu\text{m}$ 的滤波小孔才能和波带片匹配。然而作者没有半径这样小的小孔, 当时可用的滤波小孔的半径为 $r_s = 4 \mu\text{m}$, 这相当于小孔可以让半径为 $4 \mu\text{m}$ 的焦斑畅通无阻地通过。根据滤波小孔允许通过焦斑的半径, 可以算出与滤波小孔匹配的波带片的有效半径, 从而计算出等效相干长度。波带片的有效半径为

$$\rho_{\text{eff}} = 0.61f\lambda/r_s = 276 \mu\text{m} \quad (8)$$

把上值代入(7)式, 求得合肥国家同步辐射实验室的相干长度下限为 78.4 nm 。综上所述, 相干长度范围为 $0.52 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$ 之间。

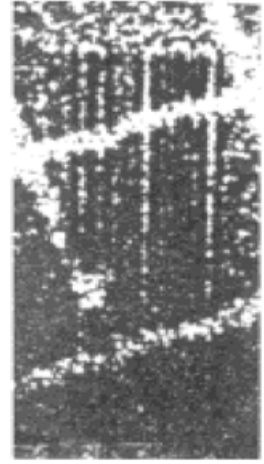


Fig. 3 Four-beam interference fringes

4 讨 论

1) 干涉图最外侧刚可分辨的条纹到两相邻狭逢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

$$L_c = |[z^2 + (w/2)^2]^{1/2} - [z^2 + (w/2 - D_{\text{max}})^2]^{1/2}| = w D_{\text{max}}/2z = 37.5 \text{ nm} \quad (9)$$

(9)式是临界相干条件, 即相干长度(波列长度)只须大于等于光程差。实际上在相干长度等于光程差的条件下, 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 $L_c = 75 \text{ nm}$ 。这一简单的计算证明了本文对合肥国家同步辐射实验室软 X 射线束的时间相干度的理论估算是正确的。

2) 四缝干涉的强度分布

$$\text{菲涅耳衍射条件为} \quad z \gg (\pi/4\lambda)(x_0 - x_1)_{\text{max}}^4 \quad (10)$$

$$\text{夫琅和费衍射条件为} \quad z \gg k(x_1^2)_{\text{max}}/2 \quad (11)$$

当取值: $z = 80 \text{ mm}$, $(x_0 - x_1)_{\text{max}} w/2 = 100 \mu\text{m}$, $(x_1)_{\text{max}} w/2 = 100 \mu\text{m}$, 代入(10)和(11)式, 分别有

$$(80 \text{ mm})^3 \gg [3.14(45 \text{ nm})](100 \mu\text{m})^4 = 15.7 (\text{mm})^3 \quad (12)$$

$$80 \text{ mm} < 2 \cdot 3.14 \cdot 5 \text{ nm} (100 \mu\text{m})^2 / 2 = 6283 \text{ mm}$$

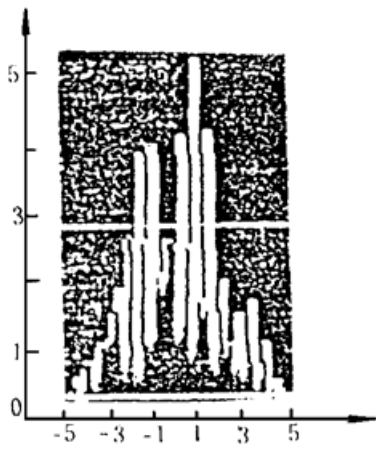
(12)式的结果说明参量取值数据满足(10)式, 但不满足(11)式。因此, 四缝干涉可以看为四缝的菲涅耳衍射, 而不能看为夫琅和费衍射。

在参考狭缝中心建立 $x-z$ 坐标系, 四缝可以用下式表达

$$t(x) = \text{rect}(x/2) + \text{rect}[(x-20)/2] + \text{rect}[(x-26)/2] + \text{rect}[(x-32)/2] \quad (13)$$

四缝干涉图上的复振幅分布为

$$\begin{aligned} U(x_h) &= [\exp(jkz)/jkz] \int_{-\infty}^{+\infty} t(x) \exp[(-jk/2z)(x_h-x)^2] dx \\ &= [\exp(jkz)/jkz] \int_{-\infty}^{+\infty} \{ \text{rect}(x/2) + \text{rect}[(x-20)/2] \\ &\quad + \text{rect}[(x-26)/2] + \text{rect}[(x-32)/2] \} \\ &\quad \exp[(-jk/2z)(x_h-x)^2] dx \end{aligned} \quad (15)$$



四缝干涉图上的强度分布为

$$I(x_h) = U(x_h)U^*(x_h) \quad (16)$$

Fig. 4 The calculation result of the four-beam interference

将实验参数代入上式, 用计算机求得四缝干涉的强度分布如图 4 所示, 从图 4 可以清楚地分辨出有 12 个尖峰, 它正好和图 3 的干涉条纹数是一致的。这证明了本文所获得的实验结果是正确的, 它也从另一方面说明, 用本文所采用的方法来估算相干程度是可行的。

参 考 文 献

- [1] 陈建文, 徐至展, 朱佩平等, X 射线全息术. 物理学进展, 1995, **15**(2): 125~ 147
- [2] I. McNulty, J. Kirz, C. Jacobsen *et al.*, High resolution imaging by Fourier transform X-ray holography. *Science*, 1992, **256**(5): 1009~ 1012
- [3] 谢行恕, 生物样品的软 X 射线显微镜成像. 物理学进展, 1992, **12**(3): 333~ 358
- [4] 陈建文, 徐至展, 朱佩平等, 软 X 射线多缝干涉实验研究. 中国激光, 1996, **23**(8): 737~ 740

An Estimate of Time Coherent Length for the Soft X-Ray Beam in Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory

Chen Jianwen Xu Zhizhai Xiao Tiqiao Zhu peiping Chen Ming
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Xie Xingshu Jia Cenzhi

(University of Science and Technology of China, Hefei 230029)

Xu Xiangdong Jiang Shiping Shan Xiaobing Fu Shaojun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029)

(Received 2 September 1996; revised 9 April 1996)

Abstract The experimental and theoretical results of the time coherent length estimated for soft X-ray beam are given in the Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory using a Fresnel zone plate as a dispersion element and an aperture to reduce the line-width.

Key words soft X-ray beam, synchrotron radiation, coherent length.