

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0850-03

X 射线像面全息术

朱佩平¹⁾ 高鸿奕²⁾ 蒋诗平³⁾ 陈 敏²⁾ 崔明启¹⁾ 徐至展²⁾ 陈建文²⁾

(1), 中国科学院北京高能研究所, 北京 100039
(2), 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
(3), 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029

摘要 : 提出了一种新的分辨率能达到 10 nm 的 X 射线像面全息术。它采用了两个波带板, 其中一个用来成像, 另一个用来产生参考光束, 能有效地降低对 X 射线相干性的要求。全息像能被 CCD 相机记录。此技术也能用在 X 射线干涉仪上, 称之为双波带板 X 射线干涉仪。

关键词 : X 射线 ; 像面全息术 ; 波带板

中图分类号 : O438.1 文献标识码 : A

1 引 言

自从 Gabor 发明全息术以来, 人们就想把这一研究成果应用到 X 射线波段。然而, X 射线全息所遇到的困难比电子全息术还多^[1], 最大的障碍是缺少一个相干 X 射线源。早在 30 年代人们就知道, 用磁场可以让电子聚集和成像, 但是直到最近由于相干电子束源的发展, 才能制作出高分辨率的微波带片, 为软 X 射线成像提供了可能。

X 射线激光的出现为 X 射线全息的发展展示了可能想象的空间。目前所报道的 X 射线激光器皆是以自发辐射模式运转。对于这种类型的激光器, 无论空间和时间相干性, 都不能满足全息术的要求。至于同步辐射源, 它是一个非相干的光源, 必须经过空间和单色滤波才能部分满足全息术的要求; 但拍摄一张全息图所需的曝光时间相当长, 需 2 h ~ 4 h, 这就对条纹的稳定性提出了相当高的要求。或许从光学和电子像面全息术^[2]能给予我们启示: 能不能制作一个 X 射线像面全息术系统, 以降低对光源相干性的要求呢? 这就是本文研究的目的。

2 X 射线像面全息术参数的设计

X 射线像面全息术原理如图 1 所示。图中 H 为 X 射线全息图记录系统, 本文选用 CCD。这里使用了两个波带板, 一个用来产生参考波, 另一个用来对样品进行放大成像。

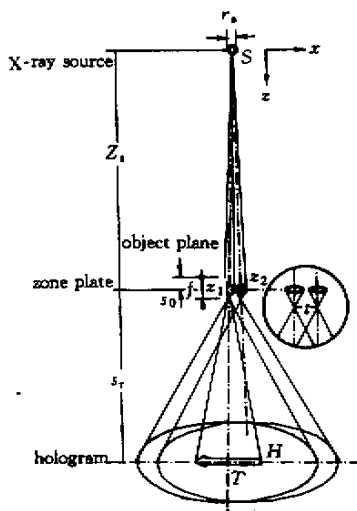


Fig.1 Diagram of X-ray imaging holography

假定记录在全息图上的平均干涉条纹间距为 Δd , 记录介质的截止频率为 f_0 , 则必须满足

$$\Delta d \geq 1/f_0. \quad (1)$$

而一次衍射波和零级波的分离条件为

$$\alpha \geq 3\theta_i, \quad (2)$$

式中 α 为物束和参考束的夹角, θ_i 为成像光锥角半径, 即物波和参考波所形成的干涉条纹的空间频率必须大于成像分辨率的三倍。由布拉格公式知:

$$\alpha = \lambda/\Delta d, \quad (3)$$

而 θ_i 和菲涅耳波带片的半径 ρ_k 的关系如下:

$$\rho_k = s_i \theta_i, \quad (4)$$

式中 s_i 为像距, 将 (2) 式和 (3) 式代入 (4) 式得到

$$\rho_k = s_i \lambda/3\Delta d. \quad (5)$$

于是就得到成像半径 r_i 和全息图上干涉条纹间距 Δd 的关系式

$$r_i = 0.61s_i\lambda/\rho_k \geq 1.83\Delta d. \quad (6)$$

若需要分辨的物元半径为 r_o , 物距为 s_o , 则上述波带片的放大率 M 为

$$M = \frac{r_i}{r_o}. \quad (7)$$

波带片的焦距为

$$f = (s_o^{-1} + s_i^{-1})^{-1} = \frac{s_i}{M + 1}. \quad (8)$$

波带片的第一波带半径 ρ_1 为

$$\rho_1 = (f\lambda)^{1/2}. \quad (9)$$

波带片的波带数

$$K = (\rho_k/\rho_1)^2 = (0.61s_i\lambda/r_i)^2 [s_i\lambda K(M+1)] = 0.37\lambda(M+1)s_i\lambda/M^2r_o^2. \quad (10)$$

两波带片焦点之间的距离为

$$t = (s_i - f)\lambda/\Delta d = [M(M+1)]s_i\lambda/\Delta d. \quad (11)$$

至此,若给出所需分辨的物元半径 r_o , 记录介质截止频率 f_o , 就能确定 X 射线像面全息记录装置的全部参量。

特别需要指出的是,像面全息术的最大优点是它大大降低了对光源空间相干性的要求。这一点已经在文献 [2] 中作过探讨。

3 像面全息术对光源时间单色性的要求

根据范西特-泽尼克定理,当半径为 r_s 的 X 射线源和波带片的距离 Z_s 满足

$$Z_s \geq r_s t/0.16\lambda \quad (12)$$

时,就能保证获得大于 0.88 的空间相干度。在全息图上,波带片的两个衍射斑的中心距离 T 为

$$T = t(Z_s + Z_i)(Z_s + f), \quad (13)$$

设物平面坐标为 (R_o, Φ) , 像平面(全息图平面)坐标为 (R_i, Φ) , 从图 1 和图 2 可以看出,从 X 射线源到全息图参考波的光程为

$$L_i(R_i, \Phi) = Z_s + \frac{s_i}{s_i - f} \times [(s_i - f)^2 + R_i^2 + T^2 - 2R_i T \cos \Phi]^{1/2} \approx (Z_s - s_o) + s_o + s_i + (R_i^2 + T^2 - 2R_i T \cos \Phi)s_i/\lambda(s_i - f)^2 \quad (14)$$

而通过半径为 ρ 的成像波带片的物波光程为

$$L_o(R_o, \Phi, \rho) = (Z_s - s_o) + [(s_o + s_i)s_i \sqrt{s_i^2 + R^2}]^{1/2} + \rho^2/2s_o + \rho^2/2s_i \approx (Z_s - s_o) + s_o + s_i + (1 + 1/M)R^2/2s_i + \rho^2/2f. \quad (15)$$

因为物波的空间频率 ν 和某一波带半径 ρ 的关系为

$$\nu = \rho/s_o\lambda, \quad (16)$$

所以参考波和空间频率为 ν 的物波的光程差为

$$\Delta L(R_i, \Phi, \nu) = |L_i(R_i, \Phi) - L_o(R_i, \Phi, \nu)| \approx |(R_i^2 + T^2 - 2R_i T \cos \Phi)s_i/\lambda(s_i - f)^2 - (1 + 1/M)R_o^2/2s_i - (\nu s_o\lambda)^2/2f|. \quad (17)$$

从以上讨论可知,参考波物波的光程差是物点的坐标 (R_o, Φ) 和物波空间频率 ν 的函数。

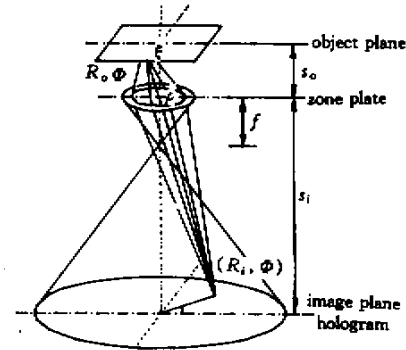


Fig. 2 Diagram for calculating the light path-length of X-ray imaging holography

4 讨 论

现在给出一些实际数值来判断用此方法在合肥国家同步辐射源上从事实验工作的可能性及其可能达到的分辨率。

假定采用分辨率为 $5 \mu\text{m}$ 的 CCD 记录,那么物光和参考光所产生的最小干涉条纹间距为 $6 \mu\text{m}$ 。同步辐射波的单色波长为 3.3 nm , 波带片的焦距长为 995 mm 。波带片 K 数值为 334。两个波带片中心间距为 $109.5 \mu\text{m}$, 要求分辨能力达到 60 nm , 如果选择物体坐标为 $(R_o, \Phi) = (5 \mu\text{m}, 0)$, 像斑的坐标为 $(R_i, \Phi) = (100 \mu\text{m}, 0)$, 则物光束与参考光束之间的光程差可以求得为

$$\Delta L = 1.3 \mu\text{m}.$$

从上面计算可以看出,只要采用合适的参数,是能够在合肥国家同步辐射实验室上从事实验工作的。

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):135 ~ 147microscopy. *J. Modern Optics*, 1987, **34**(12):1525 ~

[2] Chen Jianwen. The image holography method in electron

1534

X-Ray Image Holography

Zhu Peiping¹⁾ Gao Hongyi²⁾ Jiang Shiping³⁾ Chen Min²⁾
Cui Mingqi¹⁾ Xu Zhizhan²⁾ Chen Jianwen²⁾

(1), *Beijing Institute of High Energy, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*
(2), *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*
(3), *National Synchrotron Radiation Laboratory, The University of Science and Technology of China, Hefei 230029*

(Received 15 March 2000 ; revised 17 May 2000)

Abstract : A new method for taking X-ray image holograms with tens nanometer resolution is proposed. It employs two micro-zone-plates, one is for imaging and another for producing the reference. The holograms can be recorded in digital form by a charge-coupled device (CCD) camera. The device can also be used as an X-ray interferometer, called double-zone-plate X-ray interferometer.

Key words : X-ray ; image holography ; micro-zone-plates