

非齐明点成像的 X-射线波带板 制造中的应用

周绍祥 胡玉禧
(中国科技大学精密机械系)

提 要

软 X 射线成像需用高分辨率波带板 (Zone plate)。本文分析了齐明系统非齐明点球差特性。利用这种特性可以产生制作高分辨率 X 射线波带板所需的两束非球面波。文中还给出了合肥国家同步辐射实验室光束线所用的软 X 射线波带板的结构参数和制造这种波带板的光学系统。

关键词: 波带板; X 射线成像; 全息干涉; 光学设计。

在 X 辐射波段, 波带板是重要的成像元件。它是一种径向线密度递增的透射式圆光栅, 利用衍射原理成像。当波带数 ≥ 100 时, 成像情况和折射薄透镜相同^[1]。

由波带板成像原理(图 1), 当 P 点发出的两条光线经过波带板相邻两环带 r_n 和 r_{n-1} 而到达 Q 点时, 它们的光程差必须是 $\lambda/2$, 即

$$|l| + l' + \frac{1}{2} n\lambda = (l^2 + r_n^2)^{1/2} + (l'^2 + r_{n-1}^2)^{1/2},$$

展开后,

$$n\lambda = r_n^2 \left(\frac{1}{|l|} + \frac{1}{l'} \right) - \frac{1}{4} r_n^4 \left(\frac{1}{|l|^3} + \frac{1}{l'^3} \right) + \dots$$

第 n 环带半径的三级近似式为

$$r_n^2 = n\lambda f' + \frac{n^2 \lambda^2}{4} \left[\frac{V^3 + 1}{(V + 1)^3} \right],$$

式中 $\frac{1}{f'} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l}$, $V = -\frac{l}{l'}$,

当 $l = -l'$, 即 $V = 1$ 时, 波带板环带半径公式可简化为

$$r_n^2 = \frac{n\lambda l'}{2} + \frac{1}{16} n^2 \lambda^2.$$

已知工作波长 λ 和物距 l 、像距 l' 后, 按上面公式便可设计出波带板的参数 r_n 。

随着同步辐射 (SRL) 光源的出现, X 光显微术及其它 X 光技术的发展, 对高分辨率 X 波带板的需要也随之增加。波带板通常用激光全息干涉法来制作, 两个球面波 (或一个球面波和一个平面波) 相干涉, 所形成的干涉条纹便是波带板的环带图案^[2]。但是, 由于制作时

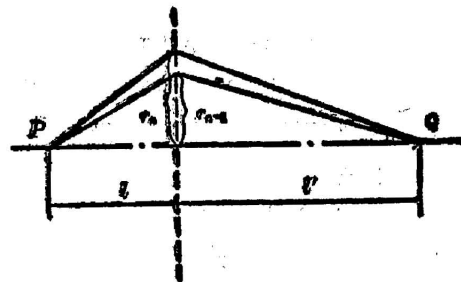


Fig. 1 Imaging principle by zone plate

激光光波的波长和使用时 X 光的波长有很大的差异(两个数量级), 因此, 在用激光干涉法制作 X 射线波带板时, 需要对干涉激光球面波前形状进行修正。

设 X 射线波带板具有如下参数: 外带直径 $D=2r_n=2.8$ mm; 带数 $n=1506$; 最外带宽 $\Delta r_n=0.465$ μm ; 物距 $l=-10000$ mm; 像距 $l'=600$ mm; 当工作波长 $\lambda=0.0023$ μm 时, 按波带板半径公式确定的各波带半径值列于表 1 中。如果制作该波带板采用的激光波长 $\lambda=0.4579$ μm (氩激光), 并令干涉记录平面放在两干涉激光束中间位置上, 那么由前述的波带板环带半径公式计算得 X 射线波带板各环带半径对应的物距 l 和像距 l' 值列在表 1 中, 图 2 为相应光路图和像差曲线。

Table 1 Parameters of the X-ray zone plate and spherical aberrations of optics for forming the zone plate

| parameters of the zone plate | | | | spherical aberration | |
|------------------------------|------------|----------|-----------|----------------------|------------------------------|
| n | r_n (mm) | l (mm) | l' (mm) | $l' - l$ (mm) | $\Delta l' = -\Delta l$ (mm) |
| 1 | 0.0361 | -10000 | 600 | 5.686 | 0 |
| 400 | 0.7216 | -10000 | 600 | 5.662 | -0.024 |
| 800 | 1.0205 | -10000 | 600 | 5.640 | -0.046 |
| 1200 | 1.2499 | -10000 | 600 | 5.617 | -0.069 |
| 1506 | 1.4002 | -10000 | 600 | 5.598 | -0.088 |

显而易见, 构成波带板各环带半径的物距 l (或像距 l') 是不相同的, 我们称各环带所对应的物距(或像距)与第 1 环带半径的物距(或像距)之差(图中的 $\Delta l_n = l_n - l_1$, $\Delta l'_n = l'_n - l'_1$)为球差。这就是说, 当用激光干涉法来制作 X 射线波带板时, 必须采用两束具有一定球差的非球面波相干涉得到。当记录平面对称于两激光波前中心放置时, 两非球面波前的球差值必须大小相等符号相反。

用激光全息干涉法制作高分辨率 X 射线波带板的设计关键在于利用齐明系统的非齐明点球差特性。齐明系统具有一对无球差的齐明点, 这是众所周知的。通过计算分析又发

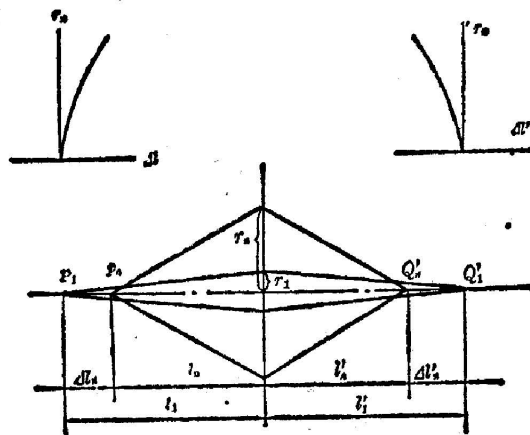


Fig. 2 Spherical aberration of coherent waves for making zone plate

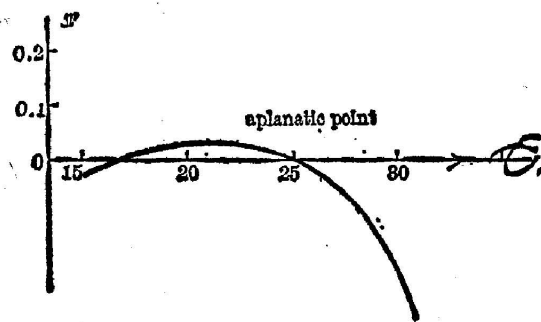


Fig. 3 Relation between $\Delta l'$ and l'

现,在齐明系统的非齐明点处还具有如下特性:

1) 在齐明点两侧某一对称的非齐明点范围内有相反符号球差,该范围大小与齐明透镜结构参数有关。

以单块齐明透镜为例,取第 1 面齐明面半径为 20 mm,第 2 面同心面半径为 28.33mm,透镜玻璃折射率为 1.5,计算了同一孔径,不同像距时的球差,图 3 便是该齐明透镜球差随像距的变化曲线。

2) 在齐明点右边,球差随像距单值地急剧变化;而左边球差小,且随像距呈偶次曲线缓慢地变化。

3) 齐明系统结构参量(包括半径、厚度和间隔等)的微量变化可以引起球差的变化。虽然不同参量对球差的具体影响不同,但都遵循一个共同的规则,即结构参量变化对齐明点右边像点的像差影响灵敏,而对左边像点影响微弱。通过调整参量,可以实现对称于齐明点位置处,具有大小相等、符号相反的球差。

齐明系统的这种非齐明点成像特性可用来产生制作高分辨率 X 射线波带板的非球面波。如图 4 所示, O, O' 为齐明系统 A 的齐明物点和齐明像点,将干涉记录平面放在 O' 处,使两束相干球面波前的曲率中心 P, Q 分别位于 O 点的两侧,经齐明系统后, P, Q 波前的傍轴光与光轴相交于 P', Q' ,它们位于 O' 点的两侧,边缘光与光轴相交于 P'', Q'' 。 P', P'' 和 Q', Q'' 为符号相反、大小等于要求的球差值,所以在记录平面上能构成所要求的 X 射线波带板图案。

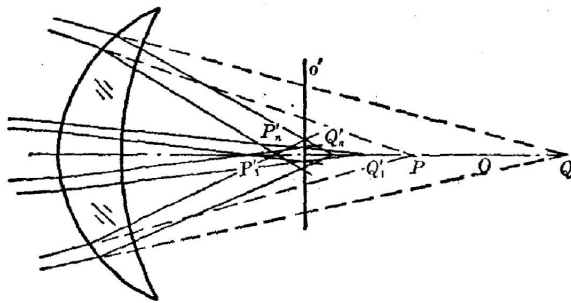


Fig. 4 Path of light rays in non-aplanatic point imaging

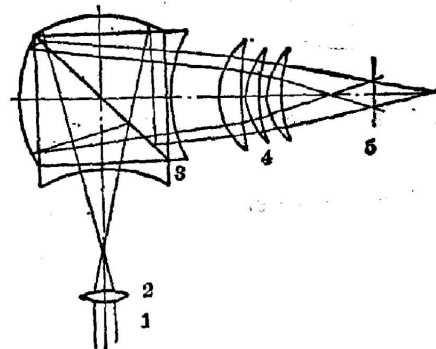


Fig. 5 Optics for forming high power X-ray zone plate

1—Ar laser light; 2—condenser; 3—beam splitter
4—aplanatic lens system; 5—zone plate

为用激光干涉法制作合肥国家同步辐射实验室中显微术光束线所需的 X 光波带板(参数见表 1),设计了图 5 的光学系统。氩激光器 1 发出的激光经透镜 2 聚焦点光源。分束镜 3 将理想点光源来的一个球面波分成两个共轴相干球面波。4 是齐明系统,它由三片齐明透镜组成,每片齐明透镜包含一齐明面和一同心面。齐明系统的作用是变两束球面波前为两束具有一定形状的非球面波前。干涉记录平面 5 位于齐明系统齐明像点处,并对称于两非球面波前轴上的中心点放置。

通过对齐明系统图结构参量的精心调整,严格平衡球差,使 X 光波带板的像点弥散控制在微米量级。

参 考 文 献

- [1] D. Rudolph, G. Schmahl; «High Power Zone Plate for a Soft X-ray Microscope», (Ann. NY Acad. Sci., 342, 1980), 94~104.
- [2] S. Niemann, D. Rudolph *et al.*; *Opt. Commun.*, 1974, 12, No. 2 (Oct), 160~163.

Application of non-aplanatic point imaging to fabrication of high resolution X-ray zone plate

ZHOU SHAOXIANG AND HU YUXI

(University of Science and Technology of China, Hefei)

(Received 31 January 1986; revised 19 May 1986)

Abstract

High power zone plate is an important imaging element for soft X-ray. This paper analyses the spherical aberration of non-aplanatic point imaging of aplanatic system. The characteristic of aplanatic system shows that non-aplanatic point imaging can produce aspherical holographic interference for high resolution zone plate fabrication used for X-ray imaging. The parameters of X-ray zone plate, to be used in beam line of Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory of China, and the configuration of an aplanatic system for making high power X-ray zone plate are also presented.

Key Words: zone plate; X-ray imaging; holographic interference; optical design.