

文章编号: 0258-7025(2005)02-0167-03

硬 X 射线相位衬度成像的实验研究

高鸿奕¹, 谢红兰¹, 陈建文¹, 李儒新¹, 徐至展¹, 田玉莲², 朱佩平², 洗鼎昌²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院高能物理所, 北京 100080)

摘要 介绍了硬 X 射线(类同轴)相位衬度成像的工作原理及其实验研究结果。X 射线波长为 0.08860 nm, 样品为未经任何处理的飞蛾, 记录介质为 X 射线胶片。胶片经处理以后, 用光学显微镜读出, 可以看出样品的许多细节, 尤其在折射率突变处。而同样条件下基于吸收衬度机制的硬 X 射线吸收成像, 由于是弱吸收样品, 没有观察到任何图像。

关键词 X 射线光学; 相衬成像; 同步辐射

中图分类号 O 434.19 **文献标识码** A

Experimental Research on Hard X-Ray Phase-Contrast Imaging

GAO Hong-yi¹, XIE Hong-lan¹, CHEN Jian-wen¹, LI Ru-xin¹,

XU Zhi-zhan¹, TIAN Yu-lian², ZHU Pei-ping², XIAN Ding-chang²

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The principle and experimental results of hard X-ray phase-contrast imaging are presented in the paper. The wavelength of the X-ray is 0.08860 nm and the specimen is a natural moth. The obtained image was readout by optical microscope, using Kodak high-resolution X-ray films as recording medium. It is demonstrated that some fine structures of the moth were recognized, especially in the boundary areas of the specimen. Contrarily, no absorption-contrast images were observed under the same conditions.

Key words X-ray optics; phase-contrast imaging; synchrotron radiation

1 引言

自伦琴 1895 年发现 X 射线, 并拍摄了第一张人体骨骼的 X 光照片以来, 人们已发展了多种 X 射线成像技术, 如: X 射线 CT, X 射线显微和全息显微, X 射线全息层析, X 射线衍射成像技术等。这些已成为医学、材料分析及航空航天技术中不可或缺的诊断工具。早期的 X 射线成像技术是根据样品的密度分布、组成以及厚度的差别产生对 X 射线的吸收差异来获得图像的衬度的, 被称之为吸收衬度成像。但是在一些生物软组织、聚合物及碳纤维等以轻元素为基的物体中, 它们对硬 X 射线的吸收极小, 硬 X 射线对它们来说几乎是“透明”的。

1935 年, 德国科学家 Zenike 在可见光波段发明了“相衬法”, 能将物体的相位分布转换成强度分布再加以观察。随着高亮度同步辐射光源及 X 射线激光器的发展, 人们将相衬成像方法逐步发展到 X 射线领域, 如今国际上已进入探索相衬成像的实际应用阶段, 我国在这方面的研究近年也在逐步开展。

目前, X 射线相衬成像方法主要分为三类^[1]: 干涉法^[2]、衍射增强法^[3,4]及类同轴全息法^[5,6]。它们的测量对象分别是相位及其一阶和二阶导数。其中, Wilkins 等^[6]给出的一种基于菲涅耳衍射的 X 射线相位成像方法特别引人注目, 它无需重构即可

收稿日期: 2003-09-17; 收到修改稿日期: 2004-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(60278030)和上海市光科技基金(036105028)资助项目。

作者简介: 高鸿奕(1965—), 女, 中国科学院上海光学精密机械研究所副研究员, 主要从事 X 射线与激光的成像及其应用研究。E-mail: gaohy@mail.shcnc.ac.cn

形成衬度像,因而称之为 X 射线相位直接成像;由于只是在样品内电子密度有突变的位置形成衬度,该方法实际上得到的是一个密度变化轮廓图,故而也称为同轴轮廓成像。

本文介绍了利用硬 X 射线同轴轮廓成像法进行的相衬成像工作原理以及初步实验结果。

2 工作原理

当 X 射线通过一弱吸收截面的非均匀物体时,部分波面将发生畸变。这部分畸变的波面在传播一定距离后,和非畸变的波面之间产生干涉;而 X 射线同轴全息图的形成过程,也是被物体散射的部分和非散射的部分形成了干涉,从干涉图形的强度变化,获得相位变化的信息。二者的区别在于:同轴全息需要相干光进行重构^[7],而相衬成像只要满足特定的条件,便可直接观察到相位图像。

假定一薄层物体,在 $z = 0$ 的平面上,被沿 z 方向传播的波长为 λ 的 X 射线平面波 $U_0(x, y)$ 照明,经过物体以后在物平面上位于 (x_1, y_1) 点的光场分布为

$$U(x_1, y_1) = F(x, y)U_0(x, y), \quad (1)$$

其中 $F(x, y) = M(x, y)e^{i\varphi(x, y)}$, 为光学复传递函数; $M(x, y) = \exp\left[-\frac{1}{2}\int\mu(x, y, z)dz\right]$ 代表吸收项, μ 为吸收系数; $\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda}\int[n(x, y, z) - 1]dz$ 代表相位变化, n 为物体折射率。

对于 $\mu(x, y, z) = 0$ 的纯相位物体,在 X 射线区域有

$$\varphi(x, y) = r_e\lambda\rho(x, y), \quad (2)$$

其中 r_e 为电子经典半径, $\rho(x, y)$ 为沿 X 射线传播方向的物体电子密度分布。

如果将入射 X 射线穿过样品视为通过一滤波器,其后的空间传播都采用傅里叶光学的方法分析,考虑一弱吸收物体,在一定的条件下,得到像平面的强度分布可直接反映出相位分布^[8]。这一特定条件就是,源到样品和探测器的距离必须满足下列式子^[9]

$$\sqrt{\lambda zu} \approx 0.7, \quad (3)$$

式中 u 为待测样品的空间频率, z 为等效距离

$$z = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}, \quad (4)$$

式中 z_1 为源到样品的距离, z_2 为样品到探测器的距

离。对于同步辐射光源,由于 $z_1 \gg z_2$, 因此,有效距离 z 近似等于 z_2 。当 λ 和 u 确定以后, z 便有确定的值。

3 实验条件与结果

实验是在北京同步辐射实验室形貌站 4W1A 上完成的,实验装置如图 1 所示。

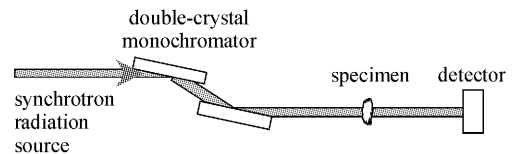


图 1 同步辐射硬 X 射线相衬成像实验装置图

Fig. 1 Schematic optical layout for hard X-ray phase-contrast imaging at Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF)



图 2 同步辐射 X 射线对飞蛾的相衬显微图像

Fig. 2 Hard X-ray phase-contrast micrograph for a natural moth at BSRF

储存环电子能量为 2.2 GeV,束流为 100 mA。从同步辐射源出射的 X 射线经双晶单色器选择的 X 射线波长为 0.08860 nm(14 keV),光斑尺寸为 18 mm×8 mm。样品为未经任何处理的飞蛾,平均厚度约为 3 mm。当样品距探测器的距离为 20 cm 时,可得到较好的同轴轮廓相衬图像。记录介质为 X 射线胶片,曝光时间为 10 min,胶片经暗室处理以后,用光学显微镜读出,其结果如图 2 所示。

图 2 中,飞蛾的腿部、翅膀和嘴巴的轮廓和体内的许多线条都清晰可辨,尤其是组织改变的交界处,也就是折射率突变处。作为对照,将探测器紧贴样品,在同样的实验条件下拍摄基于吸收衬度机制的硬 X 射线照片,没有观察到任何图像。显然,硬 X 射线通过物体后,产生的相位衬度像比吸收衬度像有更好的衬度反差,对含轻元素的生物样品,能提供更多的边界信息。

4 结 论

与 X 射线全息显微成像技术相比,硬 X 射线相位衬度成像不需要重构技术,能直接从拍摄到的图像获取物体的信息,实现实时观察;尤其是它对光源的单色性要求低,可以在 X 射线管上得到很好的结果,这对于将来发展到临床应用是非常有意义的。

参 考 文 献

- 1 C. David, B. Nohammer, H. H. Solak *et al.*. Differential X-ray phase contrast imaging using a shearing interferometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(17):3287~3289
- 2 U. Bonse, M. Hart. An X-ray interferometer (Si) (E/T)[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **6**(8):155~156
- 3 V. N. Ingal, E. A. Beliaevskaya. X-ray plane-wave topography observation of the phase contrast from a non-crystalline object [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1995, **28**(11):2314~2317
- 4 T. J. Davis, T. E. Gureyer, D. Gao *et al.*. X-ray image contrast from a simple phase object [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(16):3173~3176
- 5 G. Schmahl, D. Rudolph, P. Guttman *et al.*. Phase contrast studies of biological specimens with the x-ray microscope at BESSY(invited) [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(2):1282~1286
- 6 S. W. Wilkins, T. E. Gureyev, D. Gao *et al.*. Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays [J]. *Nature*, 1996, **384**(6607):335~338
- 7 Chen Jianwen, Xu Zhizhan, Zhu Peiping *et al.*. X-ray holography [J]. *Advance in Physics*, 1995, **15**(2):125~147
陈建文,徐至展,朱佩平等. X 射线全息术[J]. *物理学进展*, 1995, **15**(2):125~147
- 8 A. Pogany, D. Gao, S. W. Wilkins. Contrast and resolution in imaging with a microfocus x-ray source [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(7):2774~2782
- 9 D. C. Gao, A. Pogany, A. W. Stevenson *et al.*. Hard X-ray phase-contrast imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(12):2357~2367
高大超, A. Pogany, A. W. Stevenson 等. 硬 X 射线位相衬度成像[J]. *物理学报*, 2000, **49**(12):2357~2367