

同步辐射硬 X 射线衍射增强峰位成像 CT 研究*

袁清习 王嵩越 朱佩平 黄万霞 舒航 胡天斗 吴自玉¹⁾

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 对于主要由轻元素组成的生物、医学样品,利用衍射增强成像技术可以观察到常规吸收成像无法观察到的内部微观结构,因而衍射增强成像具有较高的衬度和空间分辨率.选用苍蝇作为实验样品,在北京同步辐射装置上首次开展了衍射增强峰位成像 CT 实验.重建出的样品断层像显示其分辨率达到了几十 μm 水平.对于将衍射增强成像技术应用于生物和医学等领域具有重要意义.

关键词 衍射增强成像 同步辐射 CT

1 引言

硬 X 射线相位衬度成像是 20 世纪末逐渐发展起来的成像技术,主要应用于研究由轻元素组成的生物软组织的内部结构.与传统 X 射线吸收成像相比,相位衬度成像由于具有更高的衬度和空间分辨率(在硬 X 射线波段,轻元素折射率中的相位项比吸收项高 1000 倍以上)而成为国际上研究热点之一.在硬 X 射线相位衬度成像方法中,衍射增强成像(Diffraction enhanced imaging 简称 DEI)方法由于对装置的要求相对较低以及无需调整物像距离等特点,而在国外同步辐射装置上已有较多的研究工作开展^[1-4].在国内,依托北京同步辐射装置 4W1A 光束线,也开展了衍射增强成像实验及方法的研究工作^[5-8].

虽然衍射增强成像所获得的图像具有较高的衬度和空间分辨率,但是二维成像只能获得样品厚度方向上重叠的结构信息.对于生物软组织的成像而言,结构信息的重叠将使该方法的实际应用受到限制.传统的基于吸收衬度的 CT 成像虽然可以获得样品的三维像,但是其对生物软组织成像的衬度和空间分辨率都不高.因此,如何将具有高衬度和高分辨率的衍射增强成像应用于生物软组织三维成像是一个迫切需要解决的问题.根据对衍射增强成像物理过程的理论分析,我们在北京同步辐射装置上首次开展了衍射增强峰位成像 CT 实验,成功重建出分辨率达到几十 μm 的

断层像.

在对生物软组织成像的过程中,降低 X 射线的辐照剂量是一个不容忽视的问题.在衍射增强峰位成像中,直接透过样品的 X 射线反射率最大,所需曝光时间最短,因而峰位成像 CT 可以有效减少样品所受辐射的剂量.因此,本研究工作对于扩展衍射增强成像技术的实际应用具有重要的意义.

2 衍射增强峰位成像 CT 的物理基础

摇摆曲线峰位成像是衍射增强成像的主要方法之一.在峰位成像中,分析晶体与单色器晶体的衍射面完全平行,通过样品的透射光处于摇摆曲线的峰位,其反射率最大;对于偏离入射光方向的 X 射线,其反射率随着偏离角度增大而急剧下降(图 1).

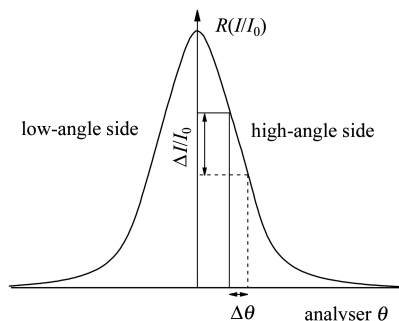


图 1 双晶摇摆曲线示意图

2005-03-04 收稿

* 国家自然科学基金重大项目(10490194), 国家杰出青年基金(10125523)和中国科学院高能物理研究所科技创新课题(U-540)资助
1) E-mail: wuzy@mail.ihep.ac.cn

X射线与物质的相互作用包括透射、吸收、非相干散射、小角散射和折射(小角散射和折射都是相干散射的集体效应)等. 在衍射增强成像中, 由于分析晶体的接收角在 10^{-6} 弧度量级, 而很多样品的小角散射角宽度可达 10^{-3} 弧度量级. 因此, 衍射增强成像中, 只有散射角度在分析晶体接收角范围内的部分能够到达探测器, 而散射角度在分析晶体接收角范围外的部分被分析晶体滤除而形成所谓的消光衬度, 因此衍射增强峰位成像是吸收衬度和消光衬度的共同贡献. 常规吸收成像不能滤除小角散射的干扰, 而衍射增强峰位成像恰恰可以滤除大部分小角散射的干扰. 因此, 虽然峰位成像看似吸收成像, 却比常规吸收成像清晰得多.

在传统吸收CT成像中, 到达探测器的光强为

$$I_{\text{探测器}}(x, y) = I_{\text{入射}} \exp \left[- \int_{\text{样品}} \mu_{\text{吸收衰减}}(x, y, z) dz \right]. \quad (1)$$

根据对衍射增强成像物理原理的分析^[9], 在峰位成像中到达探测器的光强为

$$I_{\text{探测器}}(x, y) = I_{\text{入射}} \exp \left\{ - \int_{\text{样品}} [\mu_{\text{吸收衰减}}(x, y, z) + \chi_{\text{滤除小角散射}}(x, y, z)] dz \right\}, \quad (2)$$

式(2)中, 吸收衰减直接来自于样品对入射X射线的光电吸收, 而滤除小角散射的形成过程是, 入射X射线首先被样品局部组织散射偏转, 然后再被分析晶体滤除. 小角散射来自于被测物内部微观结构对X射线相干散射之间的干涉, 小角散射不但与被测物的密度分布有关, 而且与其内部微观结构对X射线的相干散射强度有关. 虽然 $\mu_{\text{吸收衰减}}(x, y, z)$ 正比于密度分布, 但是传统的X射线成像并不能得到纯的吸收衬度像, 而是得到受到小角散射干扰的吸收衬度像(即包括小角散射贡献). 衍射增强峰位成像方法不仅能滤除小角散射干扰, 得到不受小角散射干扰的吸收衬度像, 而且滤除小角散射本身提供了新的成像衬度机制, 得到所谓的消光衬度像. 也就是说, 消光衬度可以为吸收弱但散射强的生物样品(例如弥散分布的肿瘤, 肌肉纤维和昆虫的毛须等)进行成像. 由此可见, 衍射增强峰位成像方法为我们观察物质微观结构提供了新的信息通道, 消光衬度是表示被测物微观结构的一种新的信息量.

虽然吸收衬度来自光电效应, 消光衬度来自样品的小角散射和分析晶体的吸收, 但是这两种衬度都来自于光强衰减. 因此, 可以用类似描述吸收衬度的数学来描述消光衬度.

式(1)和(2)在数学表达上一致, 因此可以用传统CT的算法来重建衍射增强峰位成像CT, 这是衍射增强成像峰位CT的物理基础.

3 实验方法及结果

衍射增强峰位成像实验是在北京同步辐射装置4W1A光束线形貌学实验站上进行的, 采用的实验装置如图2所示. 其中晶体衍射面与同步辐射X射线的偏振面垂直, 单色器晶体和分析晶体分别放置在BEDE300型双轴衍射仪(Bede Scientific Instruments Ltd.)的两轴上, 通过选择单色器晶体与入射X射线的夹角(布拉格角)可以选择入射光的能量. 在布拉格角附近, 分析晶体衍射面围绕转轴相对单色器晶体衍射面转动可得到双晶的摇摆曲线. 这套装置中, 分析晶体转动的角度分辨率为0.05s, 可用于成像的有效光斑尺寸为 $20\text{mm} \times 10\text{mm}$ ^[5].

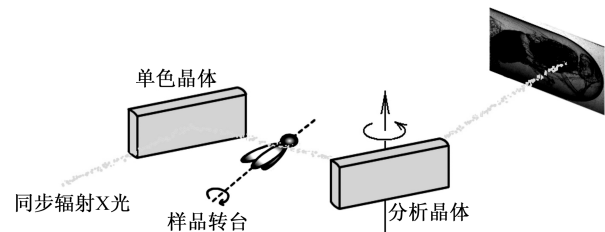


图 2 衍射增强成像CT实验装置示意图

实验中, 单色器晶体和分析晶体均采用Si(111)单晶; 经单色器出射的X射线能量选为8keV; 分析晶体角度调在双晶摇摆曲线的峰位; 探测器为Photonic Science公司的X射线CCD (X-ray FDI-18mm camera), 其分辨率为 $10.9\mu\text{m}$.

在进行衍射增强峰位CT成像的实验过程中, 选用苍蝇作为生物样品的标样. 实验时, 样品每旋转 0.4° 探测器拍摄一张二维像, 样品共旋转 180° , 这样共得到450张苍蝇的二维衍射增强峰位像. 为了既保证X射线的穿透性又保证旋转时样品没有相对运动, 将苍蝇放入圆柱形胶囊容器中并用软支撑材料将苍蝇固定住. 由于胶囊在圆周方向上为壁厚相等的均匀材料, 且其组分为轻元素, 这样既保证了X射线的良好穿透性又有效避免了样品容器与X射线相互作用对成像带来的影响.

图3(a)是拍摄的苍蝇衍射增强峰位像, (b)是按常规吸收方法拍摄的苍蝇的X射线吸收像, 对比可以看出衍射增强峰位成像确实获得了比较高的衬度和空间分辨率.

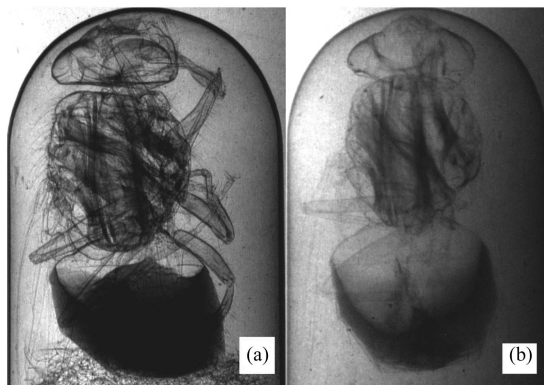


图 3 苍蝇的衍射增强峰位像(a)和常规吸收像(b)
图中圆柱形容器为胶囊.

利用所拍摄的二维像, 初步采用滤波反投影算法重建得到的苍蝇断层像(CT像)如图4所示, 从图4中可以清楚地看见苍蝇的翅膀和腿上的须毛. 利用显微镜直接观察, 结果显示苍蝇腿上须毛的尺寸在几 μm 到几十 μm 量级. 据此可以判定衍射增强峰位CT断层像具有较高的衬度, 空间分辨率已经达到几十 μm 量级.

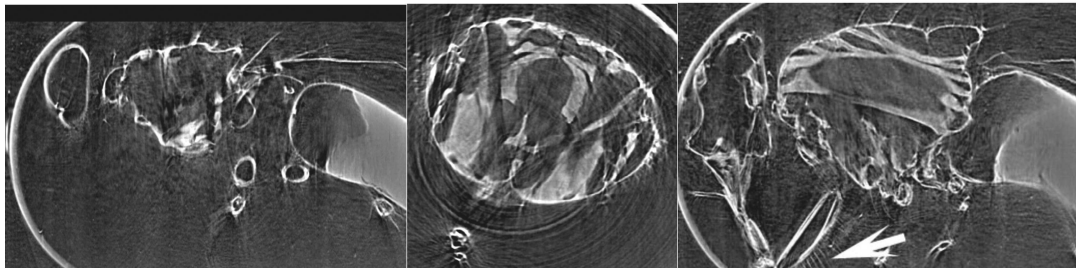


图 4 苍蝇样品的横向断层像和纵向断层像
右图中箭头处可清楚看见苍蝇腿上的须毛.

4 结论

本文介绍了在北京同步辐射装置上首次利用衍射增强峰位成像技术进行的计算机断层成像(CT)实验, 实验结果表明: 对于主要由轻元素(C, H, O)组成的苍蝇样品, 计算机断层像的空间分辨率可达到几十 μm

的水平; 与传统的基于吸收衬度的CT相比, 衍射增强CT技术具有衬度和空间分辨率高的优势, 有望成为研究主要由轻元素组成的生物和医学样品的有力手段. 此外, 能够获得样品纯的吸收衬度像和纯的消光衬度像, 即将样品的吸收信息和小角散射信息进行分离的新的研究方法和研究结果, 将在后续工作中给出.

参考文献(References)

- 1 Chapman L D, Thomlinson W C, Johnston R E et al. *Phys. Med. Biol.*, 1997, **42**: 2015—2025
- 2 ZHONG Z, Thomlinson W, Chapman D et al. *Nucl. Instrum. Methods*, 2000, **A450**: 556—567
- 3 Hasnah M, Oltulu O, ZHONG Z et al. *Nucl. Instrum. Methods*, 2002, **A492**: 236—240
- 4 Oltulu O, ZHONG Z, Hasnah M et al. *J. Phys.D: Appl. Phys.*, 2003, **36**: 2152—2156
- 5 YUAN Qing-Xi et al. *Nuclear Techniques*, 2004, **27**(10): 725—728 (in Chinese)
(袁清习等. *核技术*, **27**(10): 725—728)
- 6 LI Gang, WANG Nan, WU Zi-Yu. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**: 2120—2125
- 7 ZHU Pei-Ping et al. *Acta. Phys. Sin.*, 2005, **54**(1): 58—63 (in Chinese)
(朱佩平等. *物理学报*, 2005, **54**(1): 58—63)
- 8 HUANG Wan-Xia et al. *Acta. Phys. Sin.*, 2005, **54**(2): 677—681 (in Chinese)
(黄万霞等. *物理学报*, 2005, **54**(2): 677—681)
- 9 Oral Oltulu. *A Unified Approach to X-Ray Absorption-Refractive-Extinction Contrast with Diffraction Enhanced Imaging*. Ph. D. Thesis (UMI Number: 3087854). Illinois Institute of Technology, 2003

Computerized Tomography Using Peak-Position Image of Diffraction Enhanced Imaging^{*}

YUAN Qing-Xi WANG Jun-Yue ZHU Pei-Ping HUANG Wan-Xia
SHU Hang HU Tian-Dou WU Zi-Yu¹⁾

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Using diffraction enhanced imaging (DEI), high contrast and high spatial resolution can be obtained on biological and medical samples, which are mainly composed by light atoms such as C, H, O, etc. Experiments show that the crystal reflectivity is the highest at the peak position of the rocking curve, determining shortest collection time for imaging. Therefore, using the DEI technique at the peak position of the rocking curve results in a reduced dose delivered to the sample. Although planar images of DEI exhibit high contrast and spatial resolution, the problem of the superposition of structural information contained in thick samples can not be easily resolved. As a consequence it is mandatory to combine DEI with a computerized tomography (CT) method. At the Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) we selected a fly as a test sample to carry out CT experiments for the first time using the peak-position images of DEI. Experimental data show a spatial resolution of the CT images of about tens of micrometers, which implies possible applications of the DEI technique to image processes on biological and medical samples expanding the fields of application of the technique such as early diagnosis of specific diseases on cells or tissues.

Key words diffraction enhanced imaging, synchrotron radiation, computerized tomography

Received 4 March 2005

^{*}Supported by Major Program of National Natural Science Foundation of China (10490194), State Outstanding Youth Fund (10125523) and IHEP Science & Technology Innovation Fund (U-540)

1) E-mail: wuzy@mail.ihep.ac.cn