

# 上海光源 X 射线成像实验站相位衬度 CT 初步结果

陈荣昌<sup>1,2</sup> 杜国浩<sup>1</sup> 谢红兰<sup>1</sup> 邓彪<sup>1</sup> 朱佩平<sup>3</sup> 佟亚军<sup>1</sup> 胡雯<sup>1</sup>  
薛艳玲<sup>1</sup> 陈灿<sup>1</sup> 任玉琦<sup>1</sup> 周光照<sup>1</sup> 王玉丹<sup>1</sup> 肖体乔<sup>1</sup> 徐洪杰<sup>1</sup>

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (Dipartimento di Fisica, Universita di Trieste e INFN, Sezione di Trieste, Italy)

3 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** X 射线相位衬度 CT 能获得样品内部结构的边缘增强图像,可观察到传统 X 射线吸收 CT 无法观察到的生物软组织内部微细结构,具有巨大发展潜力。经初步调试,上海光源 X 射线成像实验站的 8-72.5 keV 单色 X 射线输出已能用于实验研究。本文在 X 射线成像实验站上开展生物样品(蝗虫)同轴 X 射线相位衬度 CT 研究,获得蝗虫样品的切片重构图像和三维重建图像。结果图像中,蝗虫样品的翅膀、表面纹理和内部组织分布情况清晰可见。

**关键词** CT, 相位衬度成像, X 射线, 同步辐射

**中图分类号** O434.1, O436.1

X 射线相位衬度成像(X-ray Phase Contrast Imaging, XPCI)技术,是利用 X 射线透过样品后携带的位相信息对样品内部结构成像,对生物软组织、聚合物、纤维混合物等弱吸收样品,具有很好的衬度<sup>[1]</sup>。XPCI 已成为成像领域的研究热点,但其为平面成像,即将样品的三维结构投影到二维平面上显示,有图像重叠、观察困难等问题。XPCI 与 CT 理论相结合,即 XPCT—X 射线相位衬度 CT (X-ray Phase Contrast Computed Tomography)—能获得弱吸收样品内部结构的二维或三维图像,是研究弱吸收样品的强有力工具。

迄今,XPCT 方法主要有干涉仪法<sup>[2]</sup>、衍射增强法<sup>[3]</sup>、光栅微分法<sup>[4]</sup>和同轴法<sup>[5]</sup>。它们对信息记录、实验平台及光源有不同要求。干涉法和衍射增强法的成像光路中须用完美晶体元件,要求光源具有很高的空间相干性和时间相干性,对实验平台的调校和稳定性也要求很高。光栅微分法成像光路中须用光栅元件,对光源的空间相干性和时间相干性要求较低,但对光栅的要求很高,如分析吸收光栅的光栅周期约为 2 μm,加工难度大<sup>[6]</sup>。同轴法采用菲涅耳衍射原理,成像光路无需借助光学元器件,装置简单、操作方便,且对光源的时间相干性要求较低,具有广阔的应用前景。我国各科研组开展了 XPCI 和 XPCT 的相关研究<sup>[7-12]</sup>。

本文简要介绍 IL-XPCT(In-Line XPCT, 同轴 X 射线相位衬度 CT)原理和上海光源 X 射线成像光束线站,以及在其上开展的生物样品 IL-XPCT 研究。

## 1 IL-XPCT 原理

如图 1 所示,当波长为 λ 的平行相干光垂直照射样品时,根据菲涅耳衍射理论,距离样品 z 处的成像平面光强分布可写作<sup>[13]</sup>:

$$I_{\theta}^z(x,y)=|h_z ** U_{\theta}^z|^2 \quad (1)$$

式中,符号 \*\* 表示卷积, (0 ≤ θ ≤ π) 表示不同的 IL-XPCT 旋转角度, U<sub>θ</sub><sup>z</sup> 表示旋转角度为 θ 时紧邻样品后的光波复振幅分布, h<sub>z</sub> 为非涅耳传播因子:

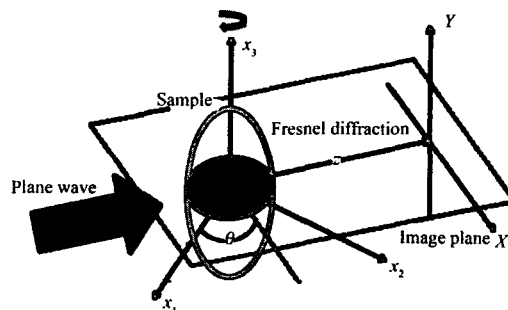


图 1 IL-XPCT 样品和像面坐标系统  
Fig.1 Coordinate system for sample and imaging plane of IL-XPCT.

国家自然科学基金(10505028, 10805071, 10705020)、上海市基础重点基金(3107JC14062, 08JC1411900)、ICTP TRIL 项目资助

第一作者: 陈荣昌, 男, 1983 年出生, 2005 年毕业于长春理工大学, 现为中国科学院上海应用物理研究所博士研究生, 研究方向为 X 射线成像  
通讯作者: 肖体乔

收稿日期: 2008-11-18, 修回日期: 2009-03-02

$$h_z(x, y) = [\exp(ikz)/i\lambda z]\exp[i\pi(x^2+y^2)/\lambda z] \quad (2)$$

对 IL-XPCT 实验，当物像距  $z$  达一定要求时，探测器采集得到的投影图像是样品吸收像与相位衬度像的混合像。对诸如生物软组织等弱吸收样品，在硬 X 射线(10–100 keV)下，样品的折射率系数( $10^{-6}$ – $10^{-8}$ )约为吸收系数( $10^{-9}$ – $10^{-11}$ )的 1000 倍<sup>[14]</sup>，在投影图像中相位衬度像占主导优势，具体表现形式为边缘增强效应。

旋转样品，在旋转角  $\theta=0^\circ$ – $180^\circ$  采集样品的 IL-XPCT 投影数据，用式(3)滤波反投影方法进行 IL-XPCT 切片重构，得到样品内部结构的边缘增强图像：

$$f(x_1, x_2, x_3) = \int_0^\pi I_\theta^z ** v d\theta \quad (3)$$

式中，符号\*\*表示卷积， $v$  为 IL-XPCT 切片重构滤波因子， $f(x_1, x_2, x_3)$  为样品的分布函数。

## 2 实验装置与方法

本实验在上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站(BL13W1)实验站(图 2)上采集投影数据。BL13W1 为 Wiggler 插入件光束线站，用滤波器组件滤去不必要的低能 X 射线，通过改变滤波片材料及厚度以选择不同的光子能量范围。采用液氮冷却双平晶单色仪，提供 8–72.5 keV 的不聚焦高相干单色光束。图 3(a–d)依次是 9、30、55 和 65 keV 时的双平晶单色仪摇摆曲线，摇摆曲线的半高宽(FWHM)分别为 7.65、2.91、1.12 和 1.09 秒弧。

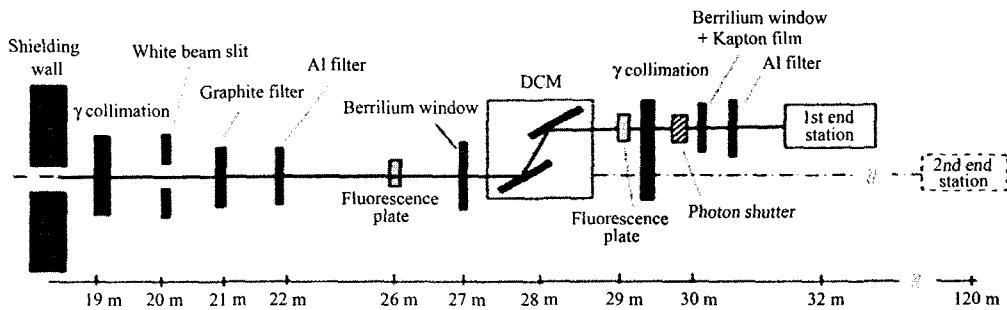


图 2 上海光源 BL13W1 束线布局示意图  
Fig.2 Schematic diagram of the BL13W1 beamline at SSRF.

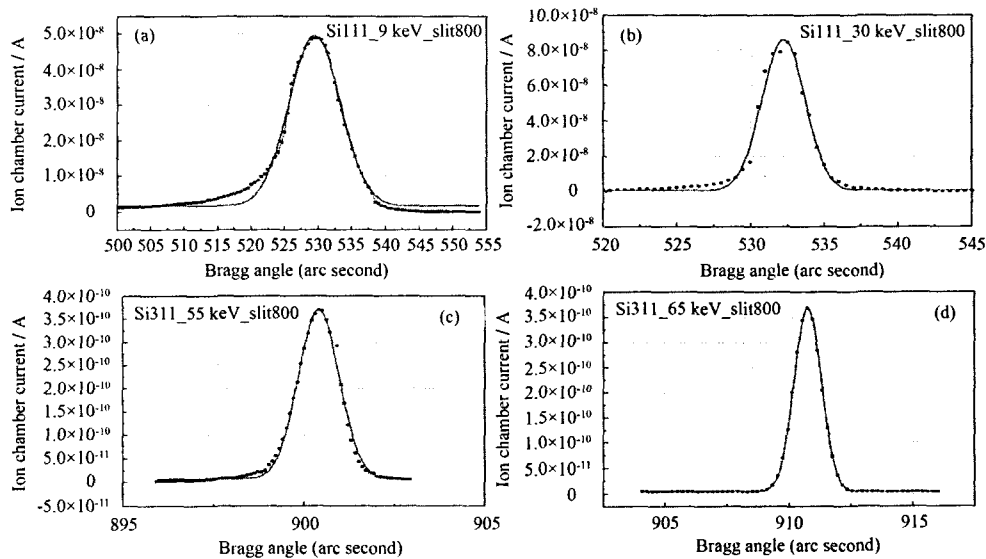


图 3 BL13W1 单色仪摇摆曲线  
Fig.3 Rocking curve of the BL13W1 monochromator.  
(a) 9 keV, (b) 30 keV, (c) 55 keV, (d) 65 keV

BL13W1 实验站的相关实验设备置于大理石隔震平台上，以减少震动对实验的影响。样品平台距离光源约 34 m，配有多维运动平台、精密导轨、不

同分辨率的数字和胶片探测器等设备。可实现样品的 IL-XPCT 投影数据采集、IL-XPCT 切片重构和三维图像重建，以进行样品的三维分析研究。

图 4 为该实验站的示意图和 IL-XPCT 实验装置照片。

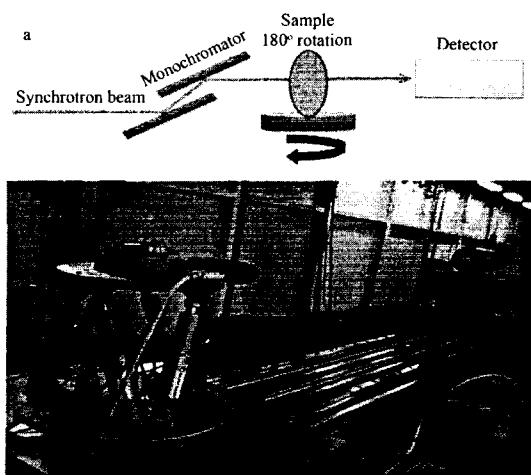


图 4 BL13W1 实验站示意图(a)和 IL-XPCT 实验装置(b)  
Fig.4 Schematics of the BL13W1 experimental station (a) and photograph of the IL-XPCT system (b).

我们用 BL13W1 实验站调束成功获得的单色光开展 IL-XPCT 实验，实验过程如下：

(1) 根据实验参数选择合适的 IL-XPCT 成像距离  $z$ ，使相位衬度像最佳。

(2) 样品旋转平台转轴校正。严格校正样品旋转平台转轴与 CCD 探测平面的相对位置，使两者尽量平行，以尽量减小两者不平行而产生的 CT 重构伪影。

(3) 采集 IL-XPCT 投影数据，同时采集白场像和暗场像(分别为光束线站有光但样品不在光路中和光束线站无光时探测器采集的图像)。

(4) 图像处理和 CT 重构。对 IL-XPCT 投影数据用 BL13W1 实验站编写的 CT 重构软件进行 CT 重构。CT 重构中包含对各个投影数据的背景噪声校正、样品旋转平台转轴轴心位置校正、环形伪影校正等。

### 3 实验结果

为测试 BL13W1 实验站 IL-XPCT 实验效果，先采用弱吸收样品测试，样品为饮料吸管(约  $\phi 5.5$  mm)，吸管内放置 5 根橡胶管(导线绝缘套，约  $\phi 1$  mm)。实验参数为：光子能量 15 keV；流强 10 mA；成像距离 1.2 m；CCD 探测器有效像素尺寸为  $9 \mu\text{m}$ 。

图 5(a、b)分别为测试样品的 IL-XPCT 重构切片和三维重建俯视图，图中各个管子都得到很好的重建，证明 BL13W1 实验站 IL-XPCT 实验能得到很好的结果。

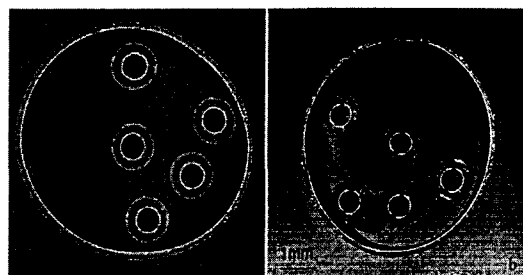


图 5 测试样品的 IL-XPCT 重构切片(a)和三维重建俯视图(b)  
Fig.5 IL-XPCT reconstructed slice (a) and top view (b) of three dimensional rendering image of test sample.

在此基础上，开展了生物样品 IL-XPCT 实验。实验样品为未经任何处理的新鲜蝗虫，放在约  $\phi 4.7$  mm 的塑料试管中进行 IL-XPCT 投影数据采集。实验参数为：光子能量 10 keV；流强 10 mA；成像距离 1.2 m；投影图像数量 600，即以步长  $0.3^\circ$  在  $0^\circ-180^\circ$  范围内旋转样品采集投影图像；每幅投影图像的曝光时间为 200 ms；CCD 探测器有效像素尺寸为  $9 \mu\text{m}$ 。

图 6(a)为蝗虫 X 射线相位衬度投影图像，图中蝗虫内部不同组织的轮廓明显，有很强的边缘增强效应，如图 6(b)。但图 6(a)是样品三维结构在二维平面投影的相位衬度像，图像重叠严重，难以分辨样品的不同组织。

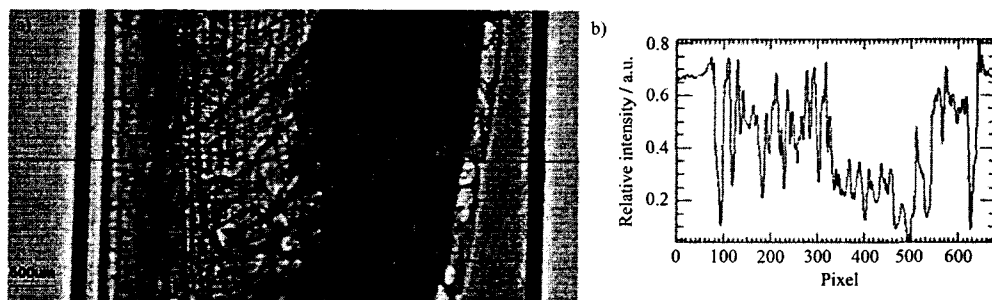


图 6 蝗虫样品 X 射线相位衬度投影图像(a)和图 6(a)黑线位置的横截面强度分布(b)  
Fig.6 XPCI projection image of a locust sample (a) and profile of image (b) at the dark line in Fig.6 (a).

图 7(a)为蝗虫 IL-XPCT 重构切片, 图中蝗虫内部不同组织层次分明, 且不同的细节信息(如翅膀)清晰可见、外形轮廓明显。图 8 为不同视角的样品

三维重建图, 图中正视图清楚的看到蝗虫样品表面纹理, 俯视图看到蝗虫样品内部组织分布情况。

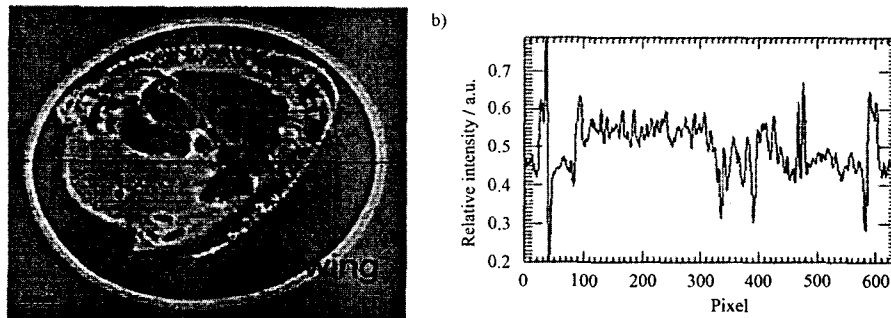


图 7 蝗虫样品 IL-XPCT 重构切片(a)和图 6(a)黑线位置的横截面强度分布(b)  
Fig.7 IL-XPCT reconstructed slice of locust sample (a) and profile of image (b) at the dark line in Fig.6 (a).

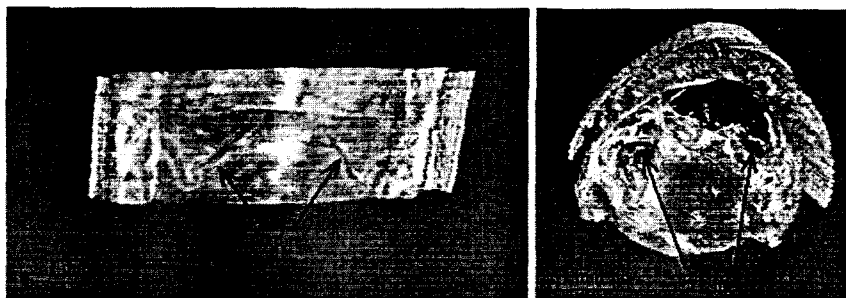


图 8 蝗虫样品三维重建正视图(a)和俯视图(b)  
Fig.8 Three dimensional rendering image of a locust sample. (a) Front view, (b) Top view

#### 4 结论

用上海光源 BL13W1 实验站调束获得的单色光开展 IL-XPCT 研究。对测试样品(塑料管和橡胶管混合样品)和未经任何处理的新鲜蝗虫样品, IL-XPCT 实验取得很好的结果, 为 BL13W1 实验站开展生物医学、化学、材料学、考古学等方面研究奠定了基础。

**致谢** 感谢意大利 ELETTRA 光源 SYRMEP 束线工作人员在 CT 重构软件编写过程中提供的帮助; 感谢上海光源杨群、郭荣怡、张晓琳在实验工作中的帮助。

#### 参考文献

- 1 Fitzgerald R. Phys Today, 2000, 53(7): 23-26
- 2 Momose A. Nucl Instrum Meth A, 1995, 352(3): 622-628
- 3 Dilmanian F A, Zhong Z, Ren B, *et al.* Phys Med Biol, 2000, 45(4): 933-946
- 4 Pfeiffer F, Kottler C, Bunk O, *et al.* Phys Rev Lett, 2007, 98(10): 108105
- 5 Raven C, Snigirev A, Snigireva I, *et al.* Appl Phys Lett, 1996, 69(13): 1826-1828
- 6 David C, Bruder J, Rohbeck T, *et al.* Microelectron Eng, 2007, 84(5-8): 1172-1177
- 7 肖体乔, 徐洪杰, 陈敏, 等. 核技术, 2003, 26(10): 743-747  
XIAO Tiqiao, XU Hongjie, CHEN Min, *et al.* Nucl Tech, 2003, 26(10): 743-747
- 8 Xiao T Q, Bergamaschi A, Dreossi D, *et al.* Nucl Instrum Meth A, 2004, 548(1-2): 155-162
- 9 Wei X, Xiao T Q, Liu L X, *et al.* Phys Med Biol, 2005, 50(18): 4277-4286
- 10 刘丽想, 杜国浩, 胡雯, 等. 物理学报, 2007, 56(8): 4556-4564  
LIU Lixiang, DU Guohao, HU Wen, *et al.* Acta Phys Sin-ch Ed, 2007, 56(8): 4556-4564
- 11 师绍猛, 陈荣昌, 薛艳玲, 等. 核技术, 2008, 31(7):

- 524–528  
SHI Shaomeng, CHEN Rongchang, XUE Yanling, *et al.*  
Nucl Tech, 2008, 31(7): 524–528
- 12 Zhu P P, Wang J Y, Yuan Q X, *et al.* Appl Phys Lett, 2005, 87(26): 264101
- 13 Born M, Wolf E. Principles of Optics. 7th Edition. New York: Cambridge University Press, 1999
- 14 Henke B L, Gullikson E M, Davis J C. Atom Data Nucl Data, 1993, 54(2): 181–342

### Preliminary results for X-ray phase contrast micro-tomography on the biomedical imaging beamline at SSRF

CHEN Rongchang<sup>1,2</sup> DU Guohao<sup>1</sup> XIE Honglan<sup>1</sup> DENG Biao<sup>1</sup> ZHU Peiping<sup>3</sup> TONG Yajun<sup>1</sup>  
HU Wen<sup>1</sup> XUE Yanling<sup>1</sup> CHEN Can<sup>1</sup> REN Yuqi<sup>1</sup> ZHOU Guangzhao<sup>1</sup>  
WANG Yudan<sup>1</sup> XIAO Tiqiao<sup>1</sup> XU Hongjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

<sup>2</sup>(Dipartimento di Fisica, Universita di Trieste e INFN, Sezione di Trieste, Italy)

<sup>3</sup>(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** With X-ray phase contrast micro-tomography (CT), one is able to obtain edge-enhanced image of internal structure of the samples. This allows visualization of the fine internal features for biology tissues, which is not able to resolve by conventional absorption CT. After preliminary modulation, monochromatic X-rays (8–72.5 keV) are available for experiments on the experimental station of the biomedical imaging beamline at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). In this paper, we report the in line phase contrast micro-tomography (IL-XPCT) of biology sample (locust) on the beamline. The reconstruct slice images and three dimensional rendering images of the locust were obtained, with clearly visible images of locus's wing, surface texture and internal tissue distribution.

**Key words** CT, Phase contrast imaging, X-ray, Synchrotron radiation

**CLC** O434.1, O436.1