

文章编号: 0253-2239(2007)04-0749-6

X 射线衍射增强成像中吸收、折射以及散射衬度的计算层析

孙 怡¹ 朱佩平² 于 健¹ 陈 欣¹

(¹ 大连理工大学电子与信息工程学院, 大连 116023)
(² 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: X 射线相位衬度成像是一种新型的 X 射线成像技术, 通过记录射线穿过物体后相位的改变对物体进行成像, 可以提供比传统的 X 射线吸收成像更高的图像衬度以及空间分辨力。衍射增强成像方法(Diffraction enhanced imaging, DEI)是 X 射线相位衬度成像方法之一, 利用一块放置在物体和探测器之间的分析晶体提取物体的吸收、折射以及散射信息并进行成像。将衍射增强成像方法与计算机断层成像技术(Computerized Tomography)进行结合, 利用吸收、散射以及折射信息, 分别采用滤波反投影以及雷登(Radon)变换, 对昆虫样品——蜜蜂进行计算层析重建, 获得了好于 X 射线吸收计算层析的重建结果, 验证了衍射增强成像信息分离计算层析的优越性。

关键词: X 射线光学; 相敏成像; 衍射增强成像; 计算层析

中图分类号: O434.19 文献标识码: A

Absorption, Refraction and Extinction Contrast Computerized Tomography of X-Ray Diffraction Enhanced Imaging Method

Sun Yi¹ Zhu Peiping² Yu Jian¹ Chen Xin¹

(¹ Institute of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023)
(² Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The X-ray phase-contrast imaging method, which images the object by recording the phase change after X-ray passing through the object, is a new X-ray imaging technique. This new imaging method can provide higher contrast and spatial resolution than the conventional X-ray absorption imaging method. Diffraction enhanced imaging (DEI) method is one of the four phase-contrast X-ray imaging techniques. DEI method can extract the absorption, refraction and extinction information of the object with an analyzer crystal placed between the object and detector. DEI method is combined with the computed tomography (CT), EDI-CT, to construct the insect sample—a bee with its absorption, extinction and refraction information with filtered back algorithm and Radon transform method. The results obtained by DEI-CT are better than the absorption CT, and proves that the DEI-CT is superior to the conventional CT.

Key words: X-ray optics; phase-sensitive imaging; diffraction enhanced imaging; computed tomography

1 引 言

X 射线在物体中的折射率可以表示为: $n = 1 - \delta + i\beta$ ^[1], 其中 δ 和 β 分别代表相位项和吸收项, 它们的大小是由物体内部结构(电子云密度等)决定的。传统的 X 射线成像是根据吸收原理成像的, 然而一些由轻元素组成的物质(例如生物软组织)对 X 射线的吸收很弱, 因此, 传统成像技术不能提供所需的

图像衬度(即对比度)。X 射线相位衬度成像是通过记录射线穿过物体后相位的改变量而进行成像的。对于轻元素, 相位项 δ 通常是吸收项 β 的 1000~10000 倍, 因此 X 射线相位衬度成像可以提供比传统吸收成像更高的图像衬度。

至今, 已经有四种比较成熟的 X 射线相位衬度成像方法: 干涉成像法^[2]、光栅剪切成像法^[3]、衍射

作者简介: 孙 怡(1964—), 女, 上海人, 教授, 博士生导师, 主要从事光电信息检测、图像处理与模式识别方面的研究。
E-mail: lslwf@dlut.edu.cn

收稿日期: 2006-06-01; 收到修改稿日期: 2006-09-12

增强成像方法^[4]、同轴成像法^[5]。目前国内学者已经开展了 X 射线相位衬度成像的研究工作^[6~9],并将其用于医学、生物等研究领域。衍射增强成像方法(DEI)在 1997 年经 Chapman 等^[4]提出了简洁的数学描述后,得到了很大发展。在 2003 年, Oral Oltulu 等^[10]以及 Miles N. Wernick 等^[11]又分别提出了基于衍射增强成像(DEI)的信息分离方法, 2000 年 Dilmanian^[12]提出重建与样品转轴平行的折射率导数的计算层析(CT)方法、2005 年朱佩平^[13]提出重建与样品转轴垂直的两个折射率导数的计算层析方法,使衍射增强成像成像研究进入了一个新的发展阶段。根据射线理论,当 X 射线穿过物体时,会发生吸收、折射及散射现象。本文基于衍射增强成像信息分离方法,利用在北京同步辐射装置上获取的实验数据,分离出昆虫样品——蜜蜂的吸收、折射及散射信息。同时结合计算层析技术,利用滤波反投影以及雷登(Radon)变换对蜜蜂进行基于这三种信息的计算层析重建。

2 衍射增强成像分离折射、吸收和散射信号的原理和方法

衍射增强成像成像光路图如图 1 所示, xyz 为固定坐标系。平行的同步辐射 X 射线束经过单色晶体后变为单色光。样品放在单色晶体和分析晶体之间,晶体的子午面与 xy 平面平行,根据晶体衍射性质,晶体衍射只对平行于子午面的 X 射线角度变化敏感,而对垂直于子午面的角度变化不敏感。单块晶体对 X 射线的反射率近似为晶体达尔文宽度 θ_D 的矩形函数, θ_D 又被称为晶体的接收角,为 10^{-5} rad 弧度量级。无样品时,两块晶体对 X 射线的反射率 $R_{int}(\theta)$ 是两块晶体夹角 θ 的函数。反射率曲线又被称为摇摆曲线,如图 2 所示,反射率曲线可以随着分析晶体摇摆而测得。在数学上,摇摆曲线可以表示为两块晶体各自对 X 射线反射率的互相关函数,其表达式如下^[7]

$$R_{int}(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_0} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} r(\alpha)r(\alpha-\theta)d\alpha}{\int_{-\infty}^{+\infty} r(\alpha)d\alpha}, \quad (1)$$

其中 θ 是两块晶体间的夹角, I_0 为单色晶体的出射光强, $I(\theta)$ 为分析晶体的出射光强, $r(\alpha)$ 是单个晶体的反射率, α 是 X 射线偏离布拉格角的角度。当两块晶体相同时,两块晶体的互相关函数就变为单

块晶体的自相关函数。

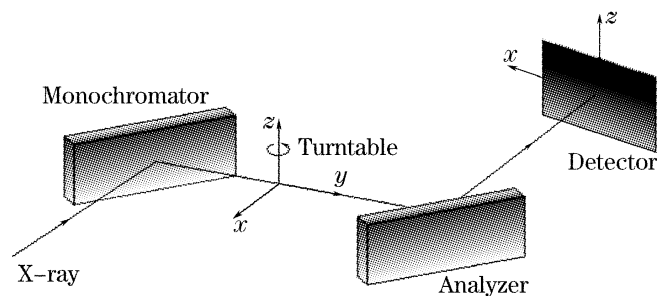


图 1 衍射增强成像光路图

Fig. 1 DEI experimental set-up

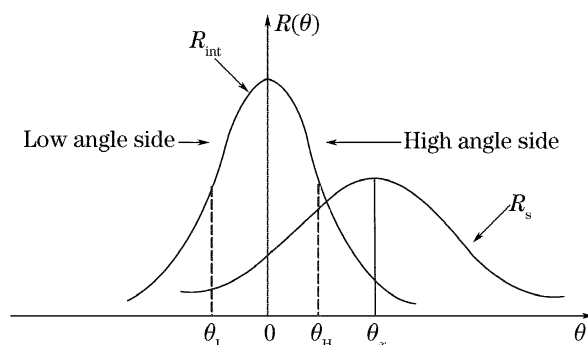


图 2 有样品和无样品时两块晶体的理想摇摆曲线

Fig. 2 Ideal rocking curves of two crystals with and without the object

实验前,要根据成像对 X 射线的能量要求,选择单色晶体的布拉格角,放置样品之前,需要测摇摆曲线。同步辐射宽带 X 射线入射到单色晶体上,只有布拉格角 θ_B 附近的 X 射线才会被单色晶体反射,产生单色 X 射线,分析晶体再将满足布拉格角 θ_B 的单色 X 射线反射到探测器,旋转分析晶体,可以测得摇摆曲线。当 $\theta=0$ 时,分析晶体对射线的反射率最大,近似为 100%,这一位置称为摇摆曲线的峰位。

在单色晶体和分析晶体之间放置样品后, X 射线穿过样品时会发生吸收、折射及散射现象,其中散射包括弹性散射和非弹性散射。在此做三点说明: 1) 本文将透射光作为折射角为零的折射光处理; 2) 根据晶体衍射性质,晶体仅对子午面内的折射角敏感,而对弧矢面的折射角不敏感,因此本文只讨论子午面内的折射角; 3) 因为非弹性散射会被分析晶体滤除,不能到达探测器,所以本文将分析晶体滤除非弹性散射归到样品的吸收效应中,因而以后提到的散射,仅指弹性散射。物质对 X 射线的吸收可以理解为光电效应,本节用 μ_T 来表示物质的吸收衰减系数。折射不改变射线的光强,只是改变射线的方向,通常在 10^{-5} rad 量级。在本文中,晶体的子午面平行于 xy 平面,因此只讨论子午面内的折射角,用 θ_x 表示。根据对散射的分析,可知散射是以入射方

向为中心的高斯分布,角分布的宽度为 10^{-2} rad 量级(因而称之为小角散射)。大部分到达分析晶体的散射光都不满足布拉格衍射条件,因而产生消光现象;只有进入分析晶体接收角的小部分散射光才会通过分析晶体而被探测器接收到。由于分析晶体的接收角为 10^{-5} rad 量级,而散射为 10^{-2} rad 量级,因而大部分散射被滤除,只有大约千分之一的散射通过分析晶体反射到探测器。当折射和散射共同作用时,散射是以折射角为中心的高斯分布。用 χ_s 来表示分析晶体对散射的消光系数。

由于分析晶体具有角度选择性,所以在成像过程中,通过旋转分析晶体,会得到一系列分析晶体处于不同位置的样品投影图像。这些图像含有样品在不同方向上的吸收、折射和散射信息,通过信息分离

的处理方法可以分别获得样品的吸收、折射及散射性质形成的图像。下面介绍我们根据文献[10]提出的信息分离方法所做的工作。

当没有样品时,二维物平面上各点的性质都相同,探测器测得的各物点的摇摆曲线是相同的,即摇摆曲线不随二维物平面上点的变化而变化,如(1)式定义。当在单色晶体和分析晶体之间放入样品后,物平面各点与 X 射线的相互作用(如吸收、散射和折射)各不相同,因而探测器测得的各物点的摇摆曲线是不同的。在样品所在的二维物平面上选择任意一点 (x, y) , 这一点是有大小的,其尺寸与探测器上一个像素尺寸相对应,然后定义样品存在时,该二维物点 (x, y) 的摇摆曲线为 $R_s(\theta)$, 其表达式如下^[10]:

$$R_s(\theta) = \exp(-\mu_T t) \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp(-\chi_s t) \delta(\theta_1) + \frac{1}{\sqrt{2\pi\omega_s}} [1 - \exp(-\chi_s t)] \exp\left(-\frac{\theta_1^2}{2\omega_s^2}\right) \right\} \times R_{\text{int}}[\theta_1 - (\theta - \theta_x)] d\theta_1, \quad (2)$$

其中 θ 为分析晶体和单色晶体的夹角, θ_1 为散射角, θ_x 为子午面内的折射角, ω_s 为散射高斯分布的角宽度, t 为样品的厚度。

由(2)式知, $\exp(-\mu_T t)$ 代表二维物点对入射光强的吸收衰减, $\frac{1}{\sqrt{2\pi\omega_s}} \exp\left(-\frac{\theta_1^2}{2\omega_s^2}\right)$ 则为散射光强的角分布, $\exp[-\chi_s t \delta(\theta_1)]$ 代表二维物点对散射光强在传播方向 $\delta(\theta_1)$ 上的消光衰减[即偏离 $\delta(\theta_1)$ 方向的散射光被分析晶体滤除]。分析晶体的接收角是一个常量,所以物点的散射能力越强,散射分布角度越宽,分析晶体滤除的散射光越多,消光效应越明显。散射消光系数 χ_s 是衡量物点散射能力的量度。

根据一系列不同位置的投影图像可以得到各个物点的 R_s 摇摆曲线。对于某个物点而言,由于折射作用, $R_s(\theta)$ 的峰位会偏离 $R_{\text{int}}(\theta)$ 的峰位,利用求质心的方法计算出两摇摆曲线各自的峰位角度,其角度差就是该物点的折射角。因此,可以计算出各个物点的折射角,求得样品的折射角像。

为了把分析晶体对散射的消光和样品的吸收衰减分离开来,可以通过旋转分析晶体,收集到各个角度下的折射光和散射光,将各个角度下的光强进行累加,即对某一二维物点的摇摆曲线进行角度积分,可计算得到该二维物点的总折射和散射光强。同理,对样品不存在时的摇摆曲线进行角度积分,可以计算得到该二维物点的入射光强。将任一二维物点的总折射和散射光强与入射光强相除并取对数,就

可求得该物点的吸收衰减。这样,又可以得到样品的吸收衰减像。根据以上论述,可以得到计算任一二维物点的吸收衰减系数 μ_T 公式如下^[10]:

$$\mu_T t = -\ln(\Omega/\omega_{\text{int}}), \quad (3)$$

其中 t 代表样品的厚度,

$$\Omega = \int R_s(\theta) d\theta,$$

代表有样品时该二维物点的总折射和散射光强,

$$\omega_{\text{int}} = \int R_{\text{int}}(\theta) d\theta,$$

代表该二维物点的入射光强。

在求得样品各点的吸收衰减系数 μ_T 后,便可以求解分析晶体对样品各点散射的消光系数 χ_s 。根据(2)式,可知在 $R_s(\theta)$ 的峰位处(即 $\theta = \theta_x$) 折射光全部被探测器接收(晶体对折射光的反射率为 1),和折射光强相比,进入分析晶体接收角内的散射光强可忽略不计。在这种情况下,(2)式可简化为^[10]:

$$R_s(\theta_x) \cong \exp(-\mu_T t - \chi_s t), \quad (4)$$

其中 $R_s(\theta_x) = I_{\text{peak}}/I_0$, θ_x 为射线的折射角, I_{peak} 为样品摇摆曲线峰位的光强值, I_0 为入射样品时的初始光强。将根据(3)式求得的吸收衰减系数 μ_T 代入(4)式,便可分离出散射消光系数 χ_s 。

综上所述,利用衍射增强成像方法,测得样品各点的摇摆曲线,可以分别计算出样品的折射角像、吸收衰减像和散射消光像。

3 散射、吸收和折射信号的计算层析重建原理

根据衍射增强成像原理,可知每一个二维物点实际上都与 X 射线穿越样品的一段路程相对应,因而(4)式的散射消光系数 χ_s 在形式上可以象吸收衰减系数 μ_T 一样,写成一个路径积分,有

$$\chi_s t = \int_0^t \chi(x, y, z) dy, \quad (5)$$

$$\mu_T t = \int_0^t \mu(x, y, z) dy, \quad (6)$$

式中 $\chi(x, y, z)$ 为线性散射消光系数, $\mu(x, y, z)$ 为线性吸收衰减系数。相对于样品的投影厚度, χ_s 和 μ_T 应该分别是平均散射消光系数和平均吸收衰减系数。因此,可以将求得的散射消光信号 $\chi_s t$ 和吸收衰减信号 $\mu_T t$, 分别看作 $\chi(x, y, z)$ 和 $\mu(x, y, z)$ 的投影积分,并利用滤波反投影方法重建 $\chi(x, y, z)$ 和 $\mu(x, y, z)$ 。

下面讨论如何利用样品的折射角信号重建折射率。根据图 1 所示,计算层析转轴平行于 z 轴,则有如下公式^[7]:

$$\theta_x = \int_0^t \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dy, \quad (7)$$

其中 $n(x, y, z)$ 为折射率。子午面内的折射角 θ_x , 是子午面内垂直于投影方向的导数沿投影方向的积分。

在计算层析重建理论中,利用雷登反变换进行重建的公式如下^[14]:

$$a(r, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\partial p(x_r, \phi)}{\partial x_r} * \frac{1}{\pi x_r} \right]_{x_r = r \cos(\theta - \phi)} d\phi, \quad (8)$$

其中 $a(r, \theta)$ 为待重建图像的极坐标形式, $p(x_r, \phi)$ 为投影数据, ϕ 为旋转角, x_r 垂直于投影方向(在本文中即为 x 轴方向), $\partial p(x_r, \phi) / \partial x_r$ 为投影数据在 x_r

方向上的导数,“*”表示一维卷积。根据积分和微分的可交换性,将(7)式变形为

$$\theta_x = \frac{\partial}{\partial x} \int_0^t n(x, y, z) dy, \quad (9)$$

其中 $\int_0^t n(x, y, z) dy$ 为 $n(x, y, z)$ 的投影,可以看出 θ_x 相当于(8)式中的 $\partial p(x_r, \phi) / \partial x_r$, 因而可以写出折射率的重建公式

$$n(r, \theta, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\theta_x * \frac{1}{\pi x} \right)_{x=r \cos(\theta - \phi)} d\phi, \quad (10)$$

文献[15]根据折射率方向导数,推导出了与(10)式相同的公式,而根据折射角和传统计算层析理论中投影导数的相似性,更简捷地得到了这一结果。

4 实验环境及结果分析

实验是在北京同步辐射装置 4W1A 束线形貌站完成的,两块晶体为 Si[111]晶体, X 射线能量为 10 keV,探测器像素大小为 11 μm 。实验中,通过旋转分析晶体,在 9 个不同角度位置对昆虫样品——蜜蜂进行成像。其中,在每个不同的位置都对蜜蜂进行 180°的计算层析扫描,扫描间隔为 0.5°,共获得 9×360 个投影,每个投影图像的大小为 1030×1300。在实验中,为了将蜜蜂更好的固定,将其放入一个密封的胶囊中。图 3(a)是分析晶体和单色晶体夹角为 1.38 rad 时的蜜蜂投影像。图 3(b)是图 3(a)中点 A 的 $R_{\text{int}}(\theta)$ 曲线(蓝色)和 $R_s(\theta)$ 曲线(绿色)。从图 3(b)可以看出,由于折射的作用, $R_s(\theta)$ 峰位位置明显偏离 $R_{\text{int}}(\theta)$ 的峰位位置,而且在吸收和散射的影响下,使得 $R_s(\theta)$ 峰值小于 $R_{\text{int}}(\theta)$ 的峰值。图 4 给出了获得的蜜蜂实际投影像,以及计算分离出来的吸收“投影”像、消光“投影”像和折射“投影”像。

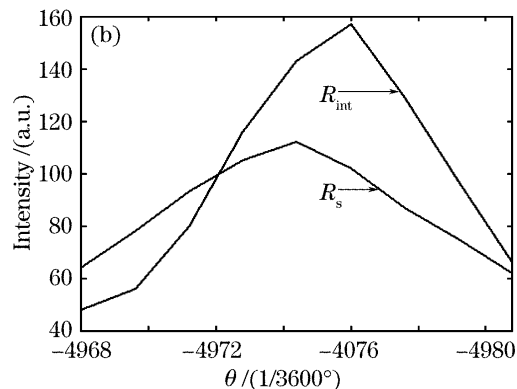
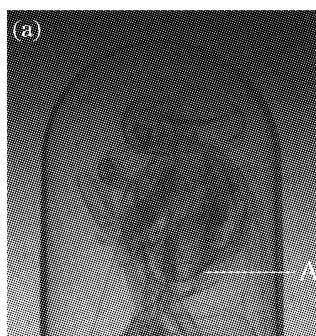


图 3 蜜蜂实际投影像(a)及 A 的 R_{int} 和 R_s 摇摆曲线(b)

Fig. 3 Actual projection of the bee (a), R_{int} and R_s of point A (b)

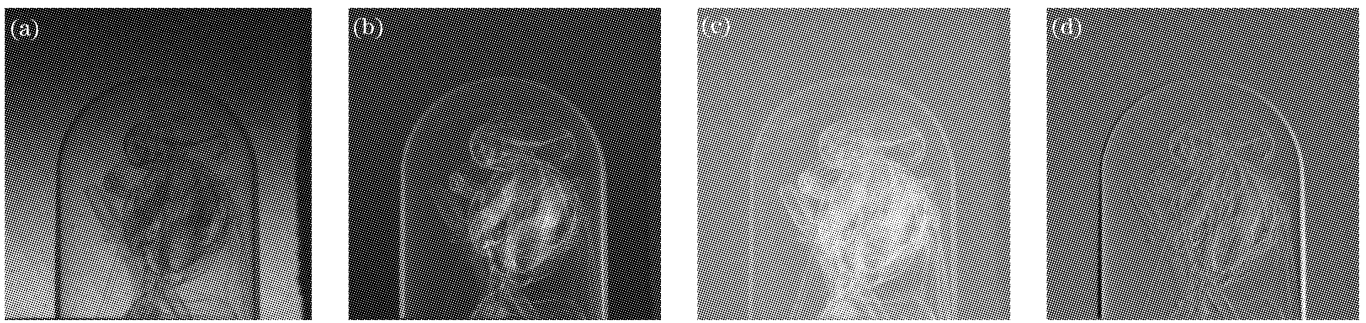


图 4 蜜蜂投影图片以及信息分离结果。(a)实际投影像, (b)吸收“投影”像, (c)消光“投影”像, (d)折射“投影”像
Fig. 4 Actual projection image and DEI-CT results of the bee. (a) Actual projection image, (b) absorption information μ_T , (c) extinction information χ_s , (d) refraction information θ_x

采用平行束滤波反投影方法重建 $\chi(x, y, z)$ 和 $\mu(x, y, z)$, 重建结果如图 5(a) 和图 5(b) 所示。利用雷登反变换方法重建折射率重建结果如图 5(c)。

从图 5(a) 可以看出, 吸收信息已经可以反映出蜜蜂头部的整体结构, 但是头部的细微结构在吸收

衰减系数计算层析图像中则不是很明显, 而散射消光系数计算层析图像和折射率计算层析图像则可以提供更多蜜蜂的头部细节。在图 5(b) 中可以清楚地观察到蜜蜂头部的须毛, 图 5(c) 中 A 和 B 两区域也呈现出在图 5(a) 中观察不到的结构信息。

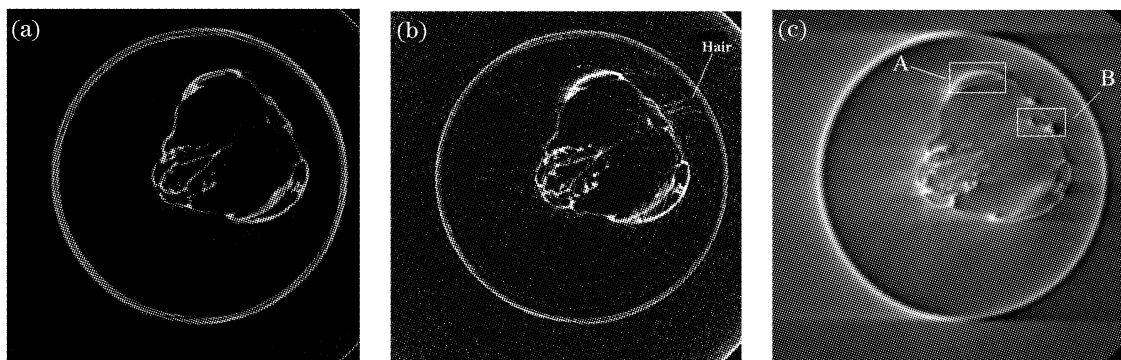


图 5 蜜蜂头部信息分离计算层析重建结果。(a) $\mu(x, y, z)$ 的断层像, (b) $\chi(x, y, z)$ 的断层像, (c) $n(x, y, z)$ 的断层像
Fig. 5 DEI-CT results of the bee's head. (a) CT image of the absorption information, (b) CT image of the extinction information, (c) CT image of the phase term δ

5 结 论

分析了吸收、折射以及散射信息与计算层析技术相结合的原理。对于利用衍射增强成像分离出来的吸收“投影”像和散射消光“投影”像, 可以利用现有的计算层析重建算法重建样品的吸收衰减系数和散射消光系数。对于折射“投影”像, 可以利用雷登反变换的方法重建折射率。利用在北京同步辐射装置上获得的实验数据, 对昆虫样品——蜜蜂进行三种信息的计算层析重建。经过对重建结果的分析。可以看出, 利用衍射增强成像信息分离计算层析技术可以更全面地再现物体的内部结构; 相对于吸收衬度计算层析, 散射消光衬度计算层析和折射衬度计算层析可以重建出更多的物体细微结构。

参 考 文 献

1 D. Atwood. *Soft X-Ray and Extreme Ultraviolet Radiation*;

Principles and Applications [M]. Zhang Jie *et al.* transl., Beijing: Science Press, 2003, Chapter 2. 46 (in Chinese)

D. 阿特伍德. 软 X 射线与极紫外辐射的原理与应用 [M]. 张杰等译, 北京: 科学出版社, 2003. 46

2 Atsushi Momose, Jun Fukuda. Phase-contrast radiographs of nonstained rat cerebellar specimen [J]. *Medical Physics*, 1995, **22**(4): 375~380

3 Franz Pfeiffer, Timm Weitkamp, Oliver Bunk *et al.*. Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources [J]. *Nature Physics*, 2006, **265**: 258~261

4 D. Chapman, W. Thomlinson, R. E. Johnston *et al.*. Diffraction enhanced X-ray imaging [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1997, **42**(11): 2015~2025

5 S. W. Wilkins, T. E. Gureyev, D. Gao *et al.*. Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays [J]. *Nature*, 1996, **384**: 335~338

6 Gao Hongyi, Chen Jianwen, Xie Honglan *et al.*. Experimental results of X-ray diffraction enhanced phase contrast imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1151~1152 (in Chinese)

高鸿奕, 陈建文, 谢红兰. X 射线衍射增强相衬成像的实验结果 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1151~1152

7 Zhu Peiping, Wang Junyue, Yuan Qingxi *et al.*. Study on the

methods for diffraction enhanced imaging with two crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1): 58~63 (in Chinese)
 朱佩平,王嵩越,袁清习等. 两块晶体衍射增强成像方法研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(1): 58~63

8 Gao Hongyi, Xie Honglan, Chen Jianwen *et al.*. Experimental research on hard X-ray phase contrast imaging[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 167~169 (in Chinese)
 高鸿奕,谢红兰,陈建文. 硬 X 射线相位衬度成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 167~169

9 Yu Hong, Zhu Pinpin, Han Shensheng. A study of diffractive phase imaging and phase restoration with partially coherent X-ray [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 390~397 (in Chinese)
 喻虹,朱频频,韩申生. 部分相干 X 射线衍射相位成像与相位复原的模拟研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 390~397

10 Oral Oltulu, Zhong Zhong, Moumen Hasnah *et al.*. Extraction of extinction, refraction and absorption properties in diffraction enhanced imaging[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, **36**: 2152~2156

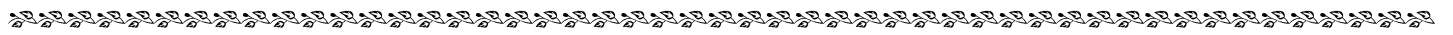
11 Miles N. Wernick, Oliver Wirjadi, Dean Chapman *et al.*. Multiple-image radiography[J]. *Phys. Med. Biol.*, 2003, **48**: 3875~3895

12 F. A. Dilmanian, Z. Zhong, B. Ren *et al.*. Computed tomography of X-ray index of refraction using the diffraction enhanced imaging method [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2000, **45**: 933~946

13 P. P. Zhu, J. Y. Wang, Q. X. Yuan *et al.*. Computed tomography algorithm based on diffraction-enhanced imaging setup[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**: 264101~264103

14 Zhuang Tiange. *Computed Tomography Theory and Algorithm* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992. 37 (in Chinese)
 庄天戈. *CT 原理与算法* [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 37

15 Zhi-feng Huang, Ke-jun Kang, Zheng Li *et al.*. Direct computed tomographic reconstruction for directional-derivative projections of computed tomography of diffraction enhanced imaging [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 041124~041126



· 广 告 ·



www.HRTlaser.com

专业的激光全息解决方案提供商和系统集成商

条纹相机

可至2ps的时间分辨率
 8-35mm的光阳极
 高至4MHz的触发扫描
 高至250MHz的同步扫描

全息干板

单色和全色全息材料可选
 分辨率大于3000线对/毫米
 45%-75%的衍射效率
 乳胶颗粒大小8-40纳米

激光器

可同时输出多段波长
 TEM00基模辐射
 低至20ps的脉冲宽度
 最大输出能量120毫焦

主要提供: 条纹相机、全息干板、科研级皮秒激光器、超高速CCD相机、光电子设备、全息3D打印机等

代理品牌: Optronis MELLES GRIOU Newport. LASERVISION



HRT — 卓越创新 高效规范

Tel: +86-755-83460 457/597
 Fax: +86-755-83460 401
 E-mail: sales@hrtlaser.com
 www.hrtlaser.com