

# X射线衍射增强成像中的信息分离和信息处理\*

陈博<sup>1,2</sup> 舒航<sup>2</sup> 朱佩平<sup>2</sup> 陈春舛<sup>1</sup> 王寓越<sup>2</sup> 袁清习<sup>2</sup>

江帆<sup>1</sup> 陈捷<sup>1</sup> 吴自玉<sup>2;1)</sup> 明海<sup>1</sup>

1 (中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 人们已经利用X射线的高穿透性,发展了较为成熟的X射线成像理论和技术. X射线成像已经广泛应用于众多领域. 传统X射线成像受生物样品中组织间吸收系数差别较小和散射噪声较大两个因素的限制,不易利用这种方法获得生物组织的信息. 衍射增强成像方法不但能将有害的散射噪声滤除,而且能利用样品的折射信息,是一种具有发展潜力的新成像方法. 本文利用衍射增强成像,通过在摇摆曲线不同部位成像,然后对信息处理,得到了清晰的吸收像、消光(小角散射滤除)像、小角散射(角)宽度像和折射像,最后通过一定的算法将各种成分的像合成,形成细节部位清晰的合成伪彩色像.

**关键词** 衍射增强 相位衬度 信息分离

## 1 引言

自从伦琴发现X射线一百年来,人们已经利用X射线的高穿透性,发展了较为成熟的X射线成像理论和技术. 直到今天, X射线成像的理论和技术依然在不断发展和完善. X射线成像已经广泛应用于临床医学、生命科学以及材料科学、工业检测等众多领域<sup>[1]</sup>. 传统X射线成像的工作原理主要是依赖于物体的吸收. 也就是说,当入射光经过物体时,光强一部分会被物体吸收,由于物体不同部分对光吸收不同,出射光强就携带了物体的吸收信息. 探测器就能获得描述物体吸收信息的光强分布图像.

尽管X射线吸收成像现在被广泛的使用,但它仍然存在明显的缺点. 一方面这种方法得到的图像的对比度依赖于物体与周围环境、物体中不同部位之间吸收系数的对比,吸收系数的差别越大,得到的图像越好. 因此吸收成像方法有利于重元素样品的成像,而不利于轻元素构成的生物样品的成像. 因为对于生物组织,其吸收系数非常小,不同组织之间吸收系数的差别更小,不易利用这种方法来得到组织的信息;另一方面,生物组织中的纤维结构等是X射线的小角散

射源,它们是造成图像模糊的主要原因之一. 近几年发展起来的相衬成像技术,正在试图解决这些问题. 相衬成像有很多方法,目前已经发展相对比较成熟的方法有干涉成像法、衍射增强成像法(Diffraction Enhanced Imaging, DEI)和同轴相衬成像法. 其中,衍射增强方法不但能将有害的散射噪声滤除,而且可以调整分析晶体角度,在摇摆曲线的不同部分成像,从而可以对物体的不同信息进行选择,因而得到广泛的应用<sup>[2,3]</sup>.

## 2 衍射增强成像装置和原理

衍射增强成像装置如图1所示,样品前的晶体为单色器晶体,其作用是将入射的白光X射线单色化,样品后的晶体为分析晶体,其作用是对从样品出射的单色X射线进行角度滤波. 当不放置样品时,衍射增强成像装置与双晶单色器完全相同. 光源出来的白光经过单色器晶体以后,变成了单色性较好的X光,转动分析晶体,可以测得反射光强随分析晶体转角而变,这种反射率随分析晶体和单色器晶体夹角而变的函数曲线,称为双晶摇摆曲线,如图2所示.

2005-08-22 收稿

\*国家自然科学基金重大项目(10490194)和国家自然科学基金面上项目(60477006)资助

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

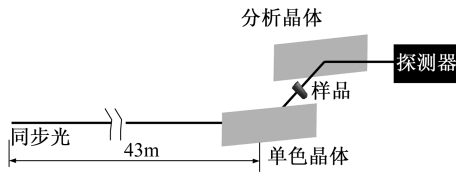


图1 DEI实验装置示意图

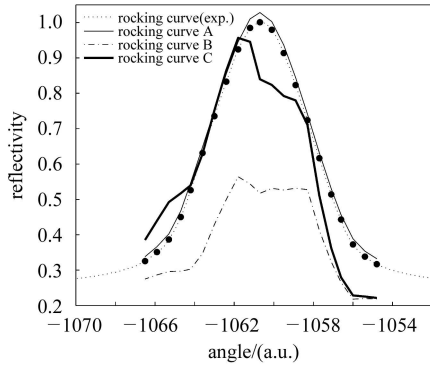


图2 摇摆曲线及其离散化

图中黑色的圆点表示实验中在本征摇摆曲线上取的21个点的位置, A, B, C表示的是从实验中的图像中取出的3个典型的点的摇摆曲线. A, B, C在样品中所表示的位置标在图3(a)中.

当放置样品时, X射线将和样品发生相互作用, 因而从样品出射的X射线就携带了样品信息. 根据X射线和样品的3种相互作用, 利用衍射增强成像方法可以提取4种样品信息, 它们是: (1) 经过样品吸收, 出射X射线携带着样品的吸收信息; (2) 样品中的细微结构会引起X射线小角散射, 细微结构的空间频率不同, 小角散射的角宽度不同, 因此出射X射线携带着小角散射角宽度信息; (3) 小角散射角宽度一般为毫弧度量级, 而分析晶体接收角只有散射角宽的几十分之一, 从样品出射的X射线经过分析晶体反射后, 大部分散射光被滤除, 不能到达探测器, 其效果和吸收相同, 因而经过分析晶体反射后的X射线携带着小角散射滤除信息, 简称为消光信息; (4) 因为样品内部密度梯度会引起X射线的折射, 所以从样品出射的X射线还携带着折射信息.

从以上叙述可知, 衍射增强成像过程是双晶单色器和X射线与样品相互作用两个物理过程的组合. 衍射增强成像区别于其他成像方法特征在于: 样品前后分别放置一块单色器晶体和分析晶体, 因为这两块晶体的存在, 这种成像方法具有非常高的角度分辨率, 它能滤除小角散射干扰, 测量小角散射角度谱, 选择增强或抑制某个折射角的成像衬度, 把这些功能组合起来, 就能将从样品出射的X射线中携带的4种样品信息分离出来.

### 3 4种信息分离理论

根据Oltulu等人的论文<sup>[4]</sup>, 各种信息提取的公式如下. 物体的吸收 $\mu_T t(x, y)$ :

$$\mu_T t(x, y) = \ln \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} R_{\text{int}}(\theta_A) d\theta_A}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(\theta_A; x, y) d\theta_A}, \quad (1)$$

这里 $\mu_T$ 是样品的吸收系数,  $t(x, y)$ 是样品的厚度分布函数,  $R_{\text{int}}(\theta_A)$ 是双晶单色器系统的本征摇摆曲线,  $I(\theta_A; x, y)$ 是有样品时样品不同点对应的摇摆曲线,  $\theta_A$ 是两块晶体之间的相对角度.

子午面内物体的折射角 $\theta_Z(x, y)$ :

$$\theta_Z(x, y) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} R_{\text{int}}(\theta_A) \theta_A d\theta_A}{\int_{-\infty}^{+\infty} R_{\text{int}}(\theta_A) d\theta_A} - \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, \theta_A) \theta_A d\theta_A}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y, \theta_A) d\theta_A}. \quad (2)$$

物体散射引起的消光 $\chi t(x, y)$ :

$$\chi t(x, y) = \ln \left[ \frac{I_0}{I_{\text{peak}}(x, y)} \right] - \mu_T t(x, y), \quad (3)$$

这里 $\chi$ 是消光系数,  $I_0$ 是本征摇摆曲线的最大值,  $I_{\text{peak}}(x, y)$ 是样品上各点摇摆曲线的最大值.

物体小角散射的散射角宽度 $\omega_S$ :

$$\omega_S = \sqrt{\omega_R^2(x, y) - \omega_{\text{int}}^2}, \quad (4)$$

这里 $\omega_R(x, y)$ 是样品上各点对应的摇摆曲线的半宽值,  $\omega_{\text{int}}$ 是本征摇摆曲线对应的半宽值. 这些公式的具体推导可以参考文献[4].

### 4 信息分离实验以及数据处理

实验是在北京同步辐射装置的4W1-A实验站完成的. X射线的能量是14keV, 样品是一只幼鼠的爪子. 实验光路如图1所示. 由于样品是泡在福尔马林溶液中的, 而福尔马林溶液对X射线的吸收很强, 不利于实验的进行, 所以实验之前先把样品从福尔马林溶液中捞出, 放在白炽灯下烘烤1—2个小时, 直到福尔马林溶液全部挥发, 此时样品就可以使用了.

调整好光路以后, 先不放样品, 测得系统的摇摆曲线, 如图2所示. 根据摇摆曲线, 以峰位所在的角度为中心, 以 $2\omega_D$ 为宽度( $\omega_D$ 是达尔文宽度), 这个区间就是进行信息分离实验所需要扫描的角度区间. 在这个区间内, 均匀的取出21个坐标点作为需要扫描的角

度值. 对于每一个角度, 为了减少随机噪声对图像的影响, 取10幅图像作平均, 得到经过平滑后的原始数据.

由于本实验数据量不是很大, 利用Matlab的强大的矩阵运算功能和Image Toolbox来处理是很方便的. 在实验的过程中, 由于储存环的流强随着时间的变化而减弱, 而且在摇摆曲线的底部时, 由于探测器探测的光强较弱, 为了使探测器有足够的感光, 曝光时间比在峰位上要长很多, 从而造成原始数据曝光的非均匀性. 为了消除这种影响, 需要对原始数据进行归一化处理. 采用的方法是如下.

首先把摇摆曲线的值乘以一个系数  $f$ , 使得峰位的值是255, 其余角度对应的透过率为  $R_k$ , 然后在测得的21幅图像中, 在同一位置取出一小块空白区域  $D_k$ , 假设  $D_k$  的面积是  $m \times n$  个像素, 则该区域的平均灰度值

$$H_k = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_k(i, j)}{m \times n}, \quad k = 1, 2, \dots, 21, \quad (5)$$

则每一副图像对应光强  $I_k$  可以归一化为

$$I_k' = I_k \times R_k / H_k, \quad (6)$$

经过以上处理, 就可认为所有的图片都是均匀照明了.

利用以上经过处理的数据, 根据前述理论, 吸收、消光和折射信息都很容易分离, 需要注意的是, Matlab对与矩阵的运算速度很快, 而对于单个元素的操作比较慢, 所以在处理这3种信息时, 尽量对整体数据进行操作与运算, 从而达到快速计算的目的. 散射宽度信息的计算相对比较麻烦, 为了分离散射宽度信息, 需要知道放上样品以后各像素的摇摆曲线以及相应的达尔文宽度. 设放上物的离散的摇摆曲线为  $R_{mn}(\theta)$ , 其半腰值为  $C_{mn}$ , 其中  $m, n$  分别表示图像的第  $m$  行和第  $n$  列, 那么方程

$$R_{mn}(\theta) - C_{mn} = 0, \quad (7)$$

一定有两个解  $\theta_1, \theta_2$ , 为了讨论方便, 令  $\theta_1 < \theta_2$ , 物点  $(m, n)$  对应的达尔文宽度  $\omega_D(m, n) = \theta_2 - \theta_1$ . 问题的关键在于, 方程(7)中,  $R_{mn}(\theta)$  不是一个解析函数, 而是由已知的摇摆曲线上的点通过插值得到的分段多项式. 为了加快运算速度, 在  $2\omega_D$  的范围内通过插值, 以0.01为间隔, 得到离散化的  $R_{mn}(k)$ , 经过分析知道,  $\theta_1$  在  $R_{mn}(k) - C_{mn} > 0$  的解的左边界附近,  $\theta_2$  在上述不等式的解的右边界处. 利用Matlab内建的函数 `find()` 以及 `max()` 和 `min()` 函数, 很容易求得上述解. 即: 左右边界分别满足  $\min(R_{mn}(k) - C > 0)$

和  $\max(R_{mn}(k) - C > 0)$ , 其解分别是  $R_{mn}(k_1)$  和  $R_{mn}(k_2)$ , 最后的散射宽度为

$$\omega_R = \frac{R_{mn}(k_2) + R_{mn}(k_2 + 1)}{2} - \frac{R_{mn}(k_1) + R_{mn}(k_1 - 1)}{2}, \quad (8)$$

需要注意的是, 由于摇摆曲线选取的范围是在  $2\omega_D$  范围内, 可能有部分散射信息大于这个范围. 由于分析晶体转角范围有限, 所以散射角度大于分析晶体接收范围的散射光不可能被分析晶体采集到. 这时, 成像系统是分辨不清被样品大角散射和被样品吸收有什么区别, 也就是说, 在4种信息分离方法中, 被样品大角散射和被样品吸收是一样的. 最后处理的结果见图3. 从图中可以看出, 散射信息有很多亮点, 这是由于固定样品时用的是透明胶带, 上面很多很细小的透明胶颗粒对X射线的散射比较严重, 所以可以看到很多亮点.

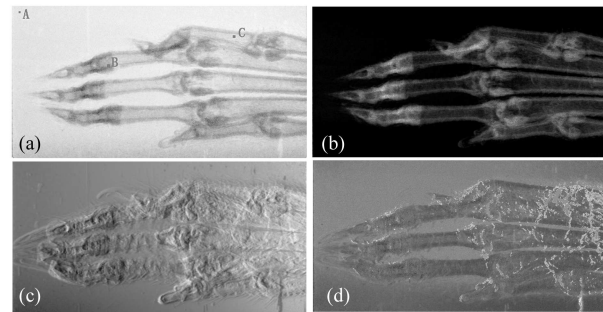


图3 4种信息分离的结果

(a) 吸收信息; (b) 消光信息; (c) 折射信息; (d) 散射宽度信息.

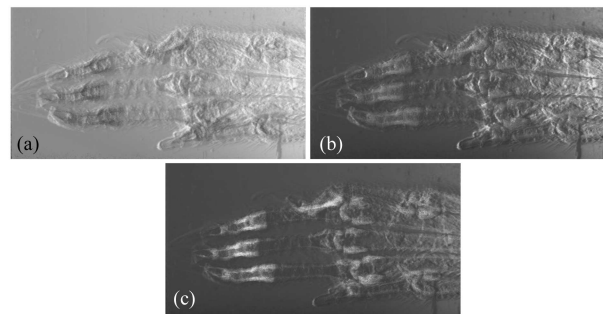


图4 4种信息的合成(彩色)

(a), (b), (c) 是不同的RGB比例合成的结果.

从结果可以看出, 利用4种信息分离, 可以得出物体内部更多的细节. 从折射信息中可以看到爪子上面的很细的毛, 由于样品是幼鼠, 其上面的毛都是很细的软毛, 肉眼不太容易看清楚这些毛. 散射信息更加明显, 从散射信息可以看出, 透明胶带上面的透明胶甚至都能清楚的看出来. 而消光信息也比吸收信息对比度更高. 利用图像处理的相关理论<sup>[5]</sup>, 可以将这些信息合成到一张图片中, 从而在一张图片中看到更

多的物体的细节,如图4所示.在图中,不同成分和不同组织结构与X射线的相互作用不同,在衍射增强成像中,不同的相互作用可以在图像中用4种不同的信息表示出来,因此,不但可以获得4种信息的图像,而且根据不同信息的强度大致判断样品的成分和组织结构.

## 5 结论

以上实验是在同一次注入进行的,对于跨注入的实验,如果能够保证两次注入时的光斑位置和形状一

致,则上述处理方法也是可行的.上述要求对于北京同步光源是很容易满足的,如果实验是跨注入进行的,两次注入时光斑形状或者位置发生变化,则有样品时的摇摆曲线的形状可能发生变化,而且消光信息处理的时候也不大容易确定  $I_{\text{peak}}$ ,实验结果可能会不太理想,但是这对于现在的大部分同步光源已经不是问题了.

综合以上,我们在北京同步光源上成功实现了信息分离的实验,而且实验的效果很好,达到了很高的分辨率,为以后进一步的研究提供了基础.

## 参考文献(References)

- 1 Snigirev A, Snigireva I, Kohn V et al. Rev. Sci. Instrum., 1995, **66**(12): 5486
- 2 ZHU P P, WANG J Y et al. Acta. Phys. Sin., 2005, **54**(1): 58 (in Chinese)  
(朱佩平, 王嵩越等. 物理学报, 2005, **54**(1): 58)
- 3 Chapman D, Thomlinson W et al. Phys. Med. Biol., 1997, **42**: 2015
- 4 Oltulu Oral. An unified approach to X-ray absorption-refraction-extinct-contrast with diffraction enhanced imaging(Paper for doctor degree). Chicago, Illinois, 2003
- 5 Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002

# Information Extracting and Processing with Diffraction Enhanced Imaging of X-Ray<sup>\*</sup>

CHEN Bo<sup>1,2</sup> SHU Hang<sup>2</sup> ZHU Pei-Ping<sup>2</sup> CHEN Chun-Chong<sup>1</sup> WANG Jun-Yue<sup>2</sup>  
YUAN Qing-Xi<sup>2</sup> JIANG Fan<sup>1</sup> CHEN Jie<sup>1</sup> WU Zi-Yu<sup>2;1)</sup> MING Hai<sup>1</sup>

1 (Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

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

**Abstract** X-ray imaging at high energies has been used for many years in many fields. Conventional X-ray imaging is based on the different absorption within a sample. It's difficult to distinguish different tissues of a biological sample because of their small difference in absorption. In this paper, we use the diffraction enhanced imaging (DEI) method. We took images of absorption, extinction, scattering and refractivity. In the end, we presented pictures of high resolution with all these information combined.

**Key words** diffraction enhanced imaging (DEI), phase contrast imaging, information extracting

Received 22 August 2005

\*Supported by Key Important Project of National Natural Science Foundation of China (10490194) and National Natural Science Foundation of China (60477006)

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