

微聚焦管硬 x 射线位相衬度成像*

陈 敏† 肖体乔 骆玉宇 刘丽想 魏 逊 杜国浩 徐洪杰

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

(2003 年 11 月 11 日收到, 2003 年 12 月 24 日收到修改稿)

利用微聚焦管硬 x 射线光源进行同轴位相衬度成像实验, 所用的光源聚焦尺寸最小可达 $0.5\mu\text{m}$. 根据微聚焦硬 x 射线管的光学传递函数, 对光源尺寸、相干长度等因素对成像分辨率的影响进行了分析. 对新鲜的未经任何处理的生物样品进行了位相衬度成像, 分辨率在 $10\mu\text{m}$ 左右, 并和吸收衬度成像进行了对比. 实验结果表明利用微聚焦管作为硬 x 射线光源, 多色硬 x 射线位相衬度成像可以得到比吸收衬度成像高得多的分辨率.

关键词: 位相衬度成像, 微聚焦管 x 射线源, 吸收衬度成像, 光学传递函数

PACC: 4230, 0785

1. 引 言

自伦琴在一百多年前发现 x 射线以来, x 射线成像被广泛应用到各个领域, 而其中应用最广的就是 x 射线透照术和 XCT. 这些方法主要利用了较重元素和较轻元素对 x 射线的吸收存在较大差异这一特性来进行成像, 而忽略了其他的信息, 如相位信息. 因此这些方法只能用来区分生物硬组织和软组织, 而无法区分不同软组织之间的差别. 然而, 在许多临床应用中, 需要区分不同的软组织如早期肿瘤组织与正常组织之间的差别, 显然传统的 x 射线成像术已无法胜任.

对轻元素而言, 典型的硬 x 射线位相漂移截面要比吸收截面大一千倍左右, 正是由于这个原因, 近年来 x 射线位相衬度成像技术越来越受到人们的重视^[1-9]. 这种新的 x 射线成像方法是基于这样一个事实: 当 x 射线穿透物质时, 它的位相变化给出了产生位相衬度的可能性. 人们已经提出了几种 x 射线位相衬度成像方法, 并且在实验中得到了验证^[7]. 世界上许多同步辐射实验站都进行了这方面的实验研究, 但这些研究多限于硬 x 射线干涉法和衍射增强技术, 对光源的要求非常高, 需要使用各种光学器件来实现光波的高度单色性, 因此一般都在第三代同

步辐射上进行. 我们小组在北京同步辐射实验站进行了生物样品的硬 x 射线同轴位相衬度成像研究, 取得了很好的结果^[9]. 但是同步辐射光源使用机时有限, 并且造价高昂, 很难真正得到应用和推广. 近年来发展了一种使用多色 x 射线同轴位相衬度成像方法^[2-4], 它只要求 x 射线具有高度的横向空间相干性而不必使用单色相干光源. 利用微聚焦管 x 射线光源完全可以满足这一要求. Wilkins 小组利用微聚焦管硬 x 射线光源作了这方面的工作, 但是他们的光源聚焦尺寸只有 $10\mu\text{m}$ 左右^[4], 极大地限制了成像分辨率. 目前利用微聚焦管 x 射线光源进行相关的位相衬度成像研究在国内还未见报道.

本文利用微聚焦管硬 x 射线光源(光源最小聚焦尺寸约 $0.5\mu\text{m}$), 采用同轴位相衬度成像方法, 对新鲜的未经任何处理的生物样品进行高分辨率的成像, 清晰地获得了样品内部的细微结构信息, 并与吸收衬度成像进行了对比.

2. 位相衬度成像机理

位相衬度形成的原理如下^[1-5]: 采用相干光源, 当波前通过物体时, 相干(平面或球面)波前受到了畸变, 进一步传播时, 由于横截波前的干涉效应, 就会产生强度变化, 因此使位相变化成为可见, 即形成

* 国家自然科学基金(批准号: 10275087), 上海市光科技项目(批准号: 022261023)和上海市自然科学基金(批准号: 02ZF14116)资助的课题.

† E-mail: chenm@src.ac.cn

位相衬度.

通常光线入射到样品后其透射光波振幅可表示为

$$u(x, y) = F(x, y)u_0(x, y), \quad (1)$$

其中 u 和 u_0 分别表示为透射光和入射光的振幅, F 是样品的传递函数, 可表示为

$$F(x, y) = M(x, y)e^{i\varphi(x, y)}, \quad (2)$$

M 表示样品的吸收, 而 φ 则表示位相调制,

$$M(x, y) = \exp\left(-\frac{1}{2}\int \mu(x, y, z) dz\right), \quad (3)$$

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda}\int (n(x, y, z) - 1) dz, \quad (4)$$

其中 μ 是线性吸收系数, n 是复折射率的实部, 与电子密度有关.

通常来说, 由于样品的传递函数与最后得到的强度 $I(x, y)$ 之间没有一个简单的关系, 这意味着不能从最后得到的位相图直接推断样品的有关信息. 然而, 如果忽略样品的吸收, 对 $I(x, y)$ 作傅里叶变换, 可以得到^[5]

$$\tilde{I}(f_x, f_y) = \tilde{\alpha}(f_x, f_y) + 2\text{sin}(\pi\lambda D(f_x^2 + f_y^2)) \times \tilde{\varphi}(f_x, f_y), \quad (5)$$

如果 $|\varphi(x, y) - \varphi(x - \lambda Df_x, y - \lambda Df_y)| \ll 1$ 成立.

对于弱位相物体 (5) 式对所有的空间频率 f 都成立. \tilde{I} 和 $\tilde{\varphi}$ 表示对强度 I 和位相 φ 的傅里叶变换. $\tilde{\alpha}(f)$ 是背景强度. D 是样品到探测器之间的距离. (5) 式的右边第二项代表了成像衬度. (5) 式表明得到的相衬图的强度分布与位相调制有关, 并且对它很敏感.

以上考虑的是理想的完全相干光的情况. 实际上光源是不相干的, 因此入射到物面的光是部分相干的. 为简单起见, 考虑一维情况, 并且很容易推广到二维情况. 设入射到物面的互强度为 $J_{12}(x_1, x_2)$, 假定光源的线度远远小于光源到样品的距离, 光源的角分布为 $S(\beta)$, 则从任何距离 z 观察到的互强度都是相同的, 即

$$J_{12}(x_1, x_2) = \int d\beta S(\beta) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}\beta(x_1 - x_2)\right) = \tilde{S}\left(\frac{x_1 - x_2}{\lambda}\right), \quad (6)$$

式中 $\tilde{S}\left(\frac{x_1 - x_2}{\lambda}\right)$ 是光源角分布函数 $S(\beta)$ 的傅里叶变换.

利用 Fresnel 衍射公式可以得到互强度从物面传播到像面的强度分布

$$J_D = \frac{1}{\lambda D} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} d\eta_1 d\eta_2 \times \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda D}[(x_1 - \eta_1)^2 - (x_2 - \eta_2)^2]\right) \times J_{12}(\eta_1, \eta_2), \quad (7)$$

式中 D 是物面到像面的距离. 考虑到 $I(x) = J_D(x, x)$, 并且假定样品为弱位相物体, 忽略样品的吸收, 将 (7) 式变换到频域, 得到^[5]

$$\tilde{I}(f) = \tilde{S}(Df) [\tilde{\alpha}(f) + 2\text{sin}(\pi\lambda Df^2)\tilde{\varphi}(f)], \quad (8)$$

式中 $\tilde{I}(f)$ 是 $I(x)$ 的傅里叶变换. (8) 式中忽略了常数项. 比较 (8) 式和 (5) 式, 可以看出光源的影响在频域上表现为完全相干光的强度分布与光源角分布函数的傅里叶变换的乘积, 在空间坐标下则是两者的卷积. 这意味着制约成像分辨率的最终因素是光源特征尺寸.

如果 D 足够小, 则 $\text{sin}(\pi\lambda Df^2) \approx \pi\lambda Df^2$, 我们很容易转换到真实空间, 并且表明成像的衬度正比于位相的二阶微分^[2,3]. 在这种情况下, 相衬图直接反映了物体的内部信息, 位相的特征能显现在增强的边缘衬度中. 这种成像的机理被称为微分位相衬度. 因此, 在实际应用中, 往往不需要进行像的重构, 位相衬度能被直接看到.

作为一个实际的例子, 我们考虑微聚焦管硬 x 射线光源的情况. 微聚焦管硬 x 射线位相衬度成像示意图如图 1 所示, 硬 x 射线从微聚焦管发出, 传播一段距离 z_1 后到达样品, 波前发生畸变, 再传播一段距离 z_2 后被探测器接收. 光源到样品的距离为 z_1 , 样品到探测器的距离为 z_2 , 光源的半径为 ρ , 假定光强均匀分布, 则光源角分布函数为

$$S(\beta) = \begin{cases} 1 & \beta < \rho/z_1, \\ 0 & \beta \geq \rho/z_1. \end{cases} \quad (9)$$

对 (9) 式作傅里叶变换并代入到 (8) 式, 并且考虑到球面波成像时, 像会被放大到原来的 M ($M = (z_1 + z_2)/z_1$) 倍, 因此在 (8) 式中用 z_2/M 和 Mf 替代 D 和 f ^[4], 得到

$$\tilde{I}(f) = \frac{\rho^2 J_1(\gamma)}{z_1^2 \gamma} [\tilde{\alpha}(Mf) + 2\text{sin}(\pi\lambda z_2 Mf^2)\tilde{\varphi}(Mf)], \quad (10)$$

式中 $\gamma = 2\pi z_2 \frac{\rho}{z_1} f$.

由 (10) 式可以得到考虑了微聚焦光源的效应后, 在频域上的光学传递函数 $H(f)$ 为 (由于这里考

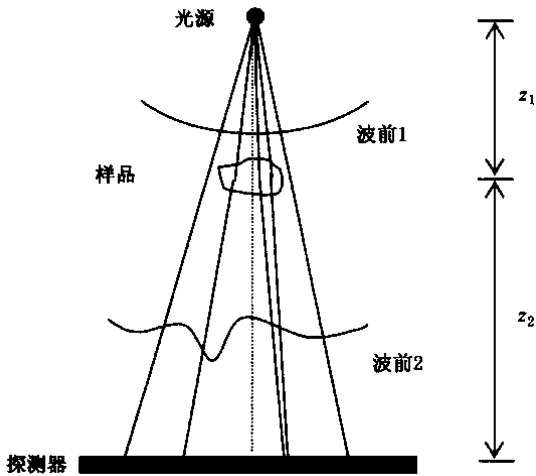


图 1 微聚焦管硬 x 射线相衬成像示意图

虑的是强度而不是振幅,因此确切的说是衬度传递函数,在不致引起混淆的情况下,我们仍然称它为光学传递函数)

$$H(f) = \frac{J_1(\gamma)}{\gamma} 2 \sin(\pi \lambda z_2 M f^2), \quad (11)$$

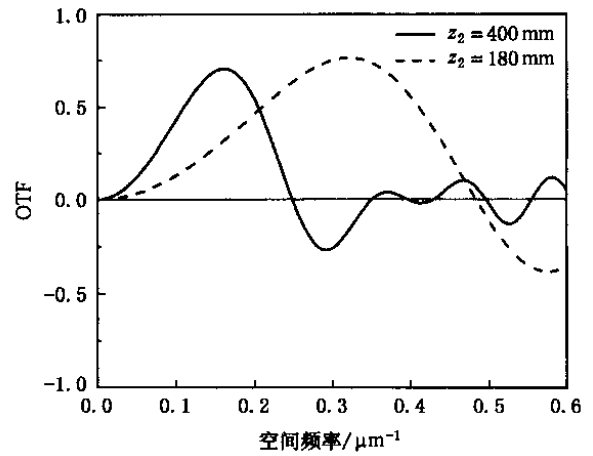
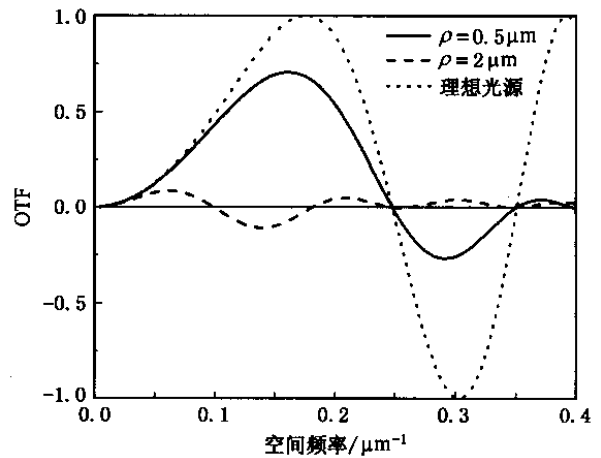
显然如果令 $\gamma \rightarrow 0$, 即认为光源是完全相干的, 则可以得到和文献 4 完全相同的结果。

根据(11)式就可以得到在纯的弱位相物体, 旁轴近似下的系统的光学传递函数与光源特征尺寸及样品到探测器之间的距离的关系。图 2 给出了在考虑实际光源效应的情况下的 OTF 与样品和探测器之间的距离 z_2 的关系。对于特定的要分辨的空间频率 f , 其反衬度随距离 z_2 的增加而增加, 在达到最大值后随距离 z_2 的增加而减小, 因此对任何一个空间频率, 都有一个最佳成像距离, 在这个距离上成像其反衬度最大。显然, 如果要分辨的物体的空间频率越大(即物体的特征尺寸越小), 要获得最佳的反衬度, 则样品与探测器之间的距离应越短。这个结果和在理想光源下的结果是一致的^[4]。图 3 给出了在考虑了光源效应前后的相衬成像 OTF。从图中可以看出光源的效应就是使相衬衰减, 光源尺寸越大, OTF 衰减得越快。而且 OTF 的第一极大值随光源特征尺寸的增大而减小, 即随着光源特征尺寸的增加, 在获得最佳反衬度的前提下, 可分辨的物体的空间频率减小, 即降低了分辨率。因此光源效应将降低成像的分辨率。

以上讨论都是假定光源距样品距离不变。由于光源的相干长度可描述为 $l_c = 2\lambda z_1 / \rho$, 因此(11)式中的 γ 可写为

$$\frac{\rho}{2\lambda z_1} 2\pi z_2 \frac{\rho}{z_1} f = 4\pi z_2 \frac{\lambda}{l_c} f.$$

根据前面的

图 2 OTF 与距离 z_2 的关系, 实际光源的尺寸 ρ 为 $0.5 \mu\text{m}$, z_1 为 130mm 图 3 实际光源与理想光源 OTF 的比较, $z_1 = 130 \text{mm}$, $z_2 = 400 \text{mm}$

分析, 可以得到结论: 光源的相干长度越长, 分辨率越高, 反之则分辨率越低。

3. 实验装置及结果

实验装置示意图如图 1 所示。实验所用的微聚焦管(钨靶, Phoenix 公司)的电压可调范围 $0-100 \text{kV}$, 流强 $0-250 \mu\text{A}$, 出射光锥张角约为 30° 。光源点聚焦尺寸最小为 500nm 。对 20keV 的 x 射线, 要使样品面上的 x 射线相干长度达到 $1 \mu\text{m}$, 样品到光源点的距离最小为 $z_1 = 4 \text{mm}$ 左右。所用的底片为富士 IX80 型 x 射线胶片。可以上下移动样品架以改变距离 z_1 和 z_2 。

图 4 给出了蚊子的硬 x 射线同轴相衬像, 实验中靶电压为 70kV , 靶电流为 $100 \mu\text{A}$, 光源到样品的距离 z_1 为 130mm , 样品到底片的距离 z_2 为 400mm 。曝光时间为 120s 。左图为蚊子的相衬图, 右图分别是蚊

子头部和腹部相应区域的放大图.从蚊子腹部管道的放大图可清晰地分辨出主管道、次级管道、毛细管及其分叉,分辨率在 $10\mu\text{m}$ 左右.

为了和吸收衬度像作比较,选取苍蝇的眼部分别记录了它的位相衬度像和吸收衬度像.实验的靶电压为 70kV ,靶电流为 $100\mu\text{A}$.光源到样品的距离 z_1 为 130mm ,样品到底片的距离分别为 400mm , 180mm 和 1mm (从上到下),曝光时间分别为 480s , 200s 和 60s .当样品非常接近底片时,相衬像的衬度几乎为零,而吸收像的衬度为最大,因此图 5(c)可以认为是苍蝇眼部的吸收像,而图 5(a)和(b)包含了样品的丰富的相位信息.从图 5(a)和(b)中可以看到苍蝇眼部的网状结构及其他细节,而吸收像(图 5(c))则无法看到这些细节.从图 5 中可以看到,随

着距离 z_2 的增加,吸收衬度急剧下降,相位衬度随距离 z_2 的增加而增加.这与前面的理论分析相符.

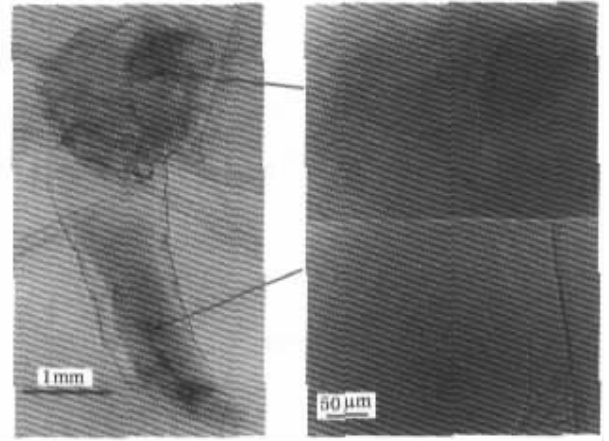


图 4 蚊子的硬 x 射线相衬像(右图为左图相应区间的放大像)

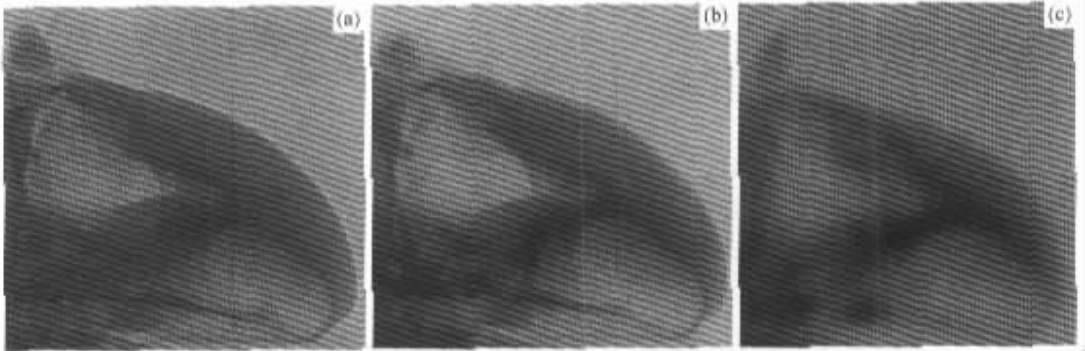


图 5 苍蝇眼部的相衬图和吸收图 (a) $z_2 = 400\text{mm}$, 曝光时间 480s (b) $z_2 = 180\text{mm}$, 曝光时间 200s (c) $z_2 = 1\text{mm}$, 曝光时间 60s .靶电压为 70kV ,靶电流 $100\mu\text{A}$,样品到光源距离 130mm

4. 讨 论

我们用微聚焦管 x 射线拍摄了生物样品的位相衬度图,相比于常规的吸收衬度成像,位相衬度成像可以得到吸收衬度成像所无法得到的更为精细的结构.目前的位相衬度成像大都在同步辐射实验站上进行,相比于微聚焦管硬 x 射线光源,同步辐射光源具有高的多的光通亮,但是同步辐射光源造价高,体积大,使用时间有限,很难将其真正实用化.微聚焦管硬 x 射线光源则造价低,体积小,视场大,同时它

对样品有放大作用,实际上降低了对探测器的要求,因此这种光源在实用化方面具有非常大的前景.

微聚焦管 x 射线光源的聚焦尺寸对位相衬度成像的分辨率的影响很大.利用微聚焦管硬 x 射线光源可以很容易得到高度空间相干性的 x 射线,因此可以极大地提高成像分辨率.我们使用的微聚焦管的最小聚焦尺寸可以达到 500nm ,这意味着有可能达到亚微米的分辨率水平.此外,利用高分辨率、高灵敏度的 x 射线 CCD 可以进行生物、化学等领域的实时成像研究.

- [1] Snigirev A *et al* 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 5486
- [2] Gao D C *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2357 [高大超 等 2000 物理学报 **49** 2357]
- [3] Wilkins S *et al* 1996 *Nature* **384** 335
- [4] Pogany A , Gao D and Wilkins S W 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 2774
- [5] Cloetens P *et al* 1996 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **29** 133
- [6] Huang W X *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1040 [黄万霞 等 2002 物理学报 **51** 1040]
- [7] Richard Fitzgerald 2000 *Physics Today* **53** 23
- [8] Baruchel J *et al* 2001 *Biomaterials* **22** 1515
- [9] Xiao T *et al* 2003 *Nucl. Sc. Tech.* **14** 217

Phase-contrast imaging with microfocus x-ray source *

Chen Min Xiao Ti-Qiao Luo Yu-Yu Liu Li-Xiang Wei Xun Du Guo-Hao Xu Hong-Jie

(Shanghai Institute of Applied Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

(Received 11 November 2003 ; revised manuscript received 24 December 2003)

Abstract

We report the experimental results of the in-line phase-contrast imaging with a microfocus x-ray source. The minimized focused spot size of the x-ray source is about $0.5\mu\text{m}$. According to the optical transfer function of the microfocus x-ray source , the effects of the size of the x-ray source , the coherent length of x-ray on the imaging resolution are discussed. The phase-contrast images of the fresh biomaterials are obtained with $10\mu\text{m}$ resolution. Compared with the absorption-contrast image of the sample , the fine-structure of the fresh biomaterials can be observed distinctly in the phase-contrast image.

Keywords : phase-contrast imaging , microfocus x-ray , absorption-contrast imaging , optical transfer function

PACC : 4230 , 0785

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10275087) , the Shanghai Foundation on Development of Science and Technology (Grant No. 022261023) and the Shanghai Natural Science Foundation (Grant No. 02ZF14116) .

微聚焦管硬x射线位相衬度成像

作者: [陈敏](#), [肖体乔](#), [骆玉宇](#), [刘丽想](#), [魏逊](#), [杜国浩](#), [徐洪杰](#)
 作者单位: [中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800](#)
 刊名: [物理学报](#) **ISTIC** **SCI** **PKU**
 英文刊名: [ACTA PHYSICA SINICA](#)
 年, 卷(期): 2004, 53 (9)
 被引用次数: 21次

参考文献(9条)

1. [Xiao T](#) [查看详情](#) 2003
2. [Baruchel J](#) [查看详情](#) 2001
3. [Richard Fitzgerald](#) [查看详情](#) [外文期刊] 2000
4. [Huang W X](#) [北京同步辐射装置上的位相衬度成像](#) [期刊论文]-[物理学报](#) 2002 (5)
5. [Cloetens P](#) [查看详情](#) 1996
6. [Pogany A](#); [Gao D](#); [Wilkins S W](#) [查看详情](#) 1997
7. [Wilkins S](#) [PHASE-CONTRAST IMAGING USING POLYCHROMATIC HARD X-RAYS](#) [外文期刊] 1996 (6607)
8. [Gao D C](#) [硬X射线位相衬度成像](#) [期刊论文]-[物理学报](#) 2000 (12)
9. [Snigirev A](#) [查看详情](#) 1995

引证文献(21条)

1. [李达](#), [倪晨](#), [顾牡](#) [铝质滤波片在微聚焦钨靶X射线源相衬成像中的应用研究](#) [期刊论文]-[光学仪器](#) 2009 (5)
2. [李然](#), [王燕](#), [刘松](#), [张学龙](#) [临床X射线相衬成像研究进展](#) [期刊论文]-[生命科学仪器](#) 2009 (4)
3. [彭屹峰](#), [陈绍亮](#), [陈岳声](#), [汤光宇](#), [赵文荣](#), [朱佩平](#), [黄万霞](#), [袁清习](#), [何伟](#) [同步辐射类同轴技术应用于肾脏成像的实验研究](#) [期刊论文]-[中国医学影像技术](#) 2008 (11)
4. [胡春红](#), [赵涛](#), [李辉](#), [尹红霞](#), [罗述谦](#) [X射线相位衬度成像的研究进展](#) [期刊论文]-[国际生物医学工程杂志](#) 2008 (1)
5. [薛艳玲](#), [肖体乔](#), [杜国浩](#), [刘丽想](#), [胡雯](#), [徐洪杰](#) [西洋参和高丽白参的X射线显微鉴定研究](#) [期刊论文]-[光学学报](#) 2008 (9)
6. [王燕](#), [陈家璧](#), [张学龙](#), [黄勇](#) [硬X射线相位衬度成像研究进展](#) [期刊论文]-[激光与光电子学进展](#) 2008 (6)
7. [蒋诗平](#), [李妹芳](#), [陈阳](#), [陈亮](#) [同轴X射线相位衬度计算机X射线断层摄影术研究](#) [期刊论文]-[光学学报](#) 2008 (3)
8. [蒋诗平](#), [陈阳](#), [李妹芳](#), [陈亮](#), [熊壮](#), [余永强](#) [同轴X射线位相衬度成像实验研究](#) [期刊论文]-[中国医学影像技术](#) 2007 (11)
9. [刘丽想](#), [杜国浩](#), [胡雯](#), [谢红兰](#), [肖体乔](#) [X射线同轴轮廓成像中影响成像质量的若干因素研究](#) [期刊论文]-[物理学报](#) 2007 (8)
10. [骆玉宇](#), [肖体乔](#), [陈敏](#), [刘丽想](#), [曾丹华](#), [杜国浩](#), [徐洪杰](#) [利用同步辐射扭摆器光源研究X射线同轴轮廓成像质量](#) [期刊论文]-[核技术](#) 2007 (2)
11. [刘丽想](#), [杜国浩](#), [胡雯](#), [骆玉宇](#), [谢红兰](#), [陈敏](#), [肖体乔](#) [利用定量相衬成像消除X射线同轴轮廓成像中散射的影响](#) [期刊论文]-[物理学报](#) 2006 (12)
12. [汪敏](#), [胡小方](#), [伍小平](#) [同步辐射计算机断层技术衬度误差机理分析](#) [期刊论文]-[物理学报](#) 2006 (8)
13. [于慧菁](#), [朱化凤](#), [陈建文](#), [高鸿奕](#), [李儒新](#), [徐至展](#), [朱佩平](#), [王寓越](#), [黄万霞](#), [袁清习](#), [冼鼎昌](#) [关于X射线同轴位相衬度成像的研究](#) [期刊论文]-[光子学报](#) 2006 (6)
14. [刘成林](#) [肿瘤组织的同步辐射X射线成像和谱学研究](#) [学位论文] 博士 2006

15. [彭屹峰](#) [相位衬度医学成像的实验研究](#)[学位论文]博士 2006
16. [彭屹峰](#) [相位衬度医学成像的实验研究](#)[学位论文]博士 2006
17. [魏逊](#), [肖体乔](#), [陈敏](#), [刘丽想](#), [骆玉宇](#), [杜国浩](#), [徐洪杰](#) [中药显微结构的微聚焦管X射线相衬成像研究](#)[期刊论文]-[核技术](#) 2005(12)
18. [于斌](#), [彭翔](#), [田劲东](#), [牛憨笨](#) [硬x射线同轴相衬成像的相位恢复](#)[期刊论文]-[物理学报](#) 2005(5)
19. [于斌](#), [彭翔](#), [田劲东](#), [牛憨笨](#), [刁麓弘](#), [李华](#) [硬X射线同轴相衬成像相位恢复的模拟](#)[期刊论文]-[中国科学G辑](#) 2005(3)
20. [黄万霞](#), [袁清习](#), [田玉莲](#), [朱佩平](#), [姜晓明](#), [王寓越](#) [同步辐射硬x射线衍射增强成像新进展](#)[期刊论文]-[物理学报](#) 2005(2)
21. [魏逊](#) [硬X射线相衬成像在中药材显微鉴定中的应用研究](#)[学位论文]博士 2005

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wlxb200409027.aspx