

高对称度光源的同步辐射 X 射线同轴相衬成像

黎刚^{1*†}, 张杰^{1†}, 易栖如^{1†}, 王艳萍¹, 陈雨¹, 贾全杰¹, 姜晓明^{1,2*†}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

2. 中国科学院北京综合研究中心, 北京 101407

* 联系人, E-mail: lig@ihep.ac.cn; jiangxm@ihep.ac.cn

† 同等贡献

2016-10-21 收稿, 2016-12-02 修回, 2016-12-02 接受, 2017-06-08 网络版发表

中国科学院科研装备研制项目(YZ201211)、中国科学院北京综合研究中心创新课题(2014-01)、中国科学院北京综合研究中心自主部署课题(Y5Z003)和国家自然科学基金(11675208, 11305200)资助

摘要 全球现有的同步辐射光源中, 电子束团在垂直于运动方向的截面上其水平尺寸和垂直尺寸的差异都较大, 即同步辐射X射线(SRX)源的尺寸在水平和垂直两方向上有较大差异(二者的比值为光源的对称度, 与1的差别越大, 则对称度越差). 这使得利用同步辐射X射线开展同轴相衬成像实验时, 水平和垂直两个方向上入射X射线的点扩展函数相差较大, 造成两个方向上空间分辨率有很大差别, 这种差异还会造成两个方向上相位衬度水平的明显差别, 从而严重影响同轴相位衬度成像的质量. 本文通过在北京同步辐射装置(BSRF)成像线站(4W1A)束线上加入白光光阑直接限制光源对样品的点扩展函数的方法, 获得了一个对称度大大提高的同步辐射X射线源(光源对称度从2.7提高到接近1), 并开展了模型样品(聚酰胺细丝)的同轴相位衬度成像实验. 使4W1A的光源对称度从2.7提高到1, 虽然会使总通量约减小为原来的0.0005, 但通量密度只减小到原来的0.22. 总通量的减小由光斑尺寸的减小和通量密度的减小共同决定, 由于高分辨率同轴成像需要的光斑尺寸很小, 因此本方法对高分辨率同轴成像的不利影响仅限于通量密度的减小. 同时, 研究结果表明, 通过关小水平光阑尺寸, 把对成像有贡献的水平方向光源尺寸从1.23 mm减小到约0.35 mm, 使模型样品成像的最大相位衬度从0.057提高到了0.35, 即通过关小光阑提高光源的对称度, 使同轴相衬成像的密度灵敏度提高了5倍. 光源对称度的提高, 使空间分辨率和相位衬度这两方面在水平方向和垂直方向达到相同的水平, 从而极大改善了BSRF 4W1A线站SRX同轴相位衬度成像的质量. 我们分析了成像质量提升的原因, 并讨论了未来进一步改进的方向.

关键词 X 射线同轴相位衬度成像, 光源对称度, 衬度, 空间分辨率, 同步辐射, 点扩展函数

X射线在物质中的折射率可表示为: $n=1-\delta-i\beta$. 其中 δ 与相位变化相关, β 与吸收相关. 在15~100 keV 的范围内, 大部分轻元素的 δ 比 β 大2~3个数量级. 因此, 轻元素为主的样品引起的硬X射线的相位改变远高于其对硬X射线的吸收, 因而相位改变带来的成像衬度远高于吸收带来的衬度. 生物软组织大部分由C, H, O等轻元素构成, 吸收衬度很弱, 适合采用相

位衬度进行成像. 而高能硬X射线的利用将有助于在获得较好衬度的同时, 大幅度降低生物体所受的辐射剂量.

相位衬度成像是采用某种方法把样品对波函数相位的调制转换成透射光强度的变化记录下来. 同步辐射X射线具有亮度高、能谱宽、相干性好等突出优点, 在生物体相位衬度成像中具有独特优势. 目前

引用格式: 黎刚, 张杰, 易栖如, 等. 高对称度光源的同步辐射 X 射线同轴相衬成像. 科学通报, 2017, 62: 2544–2552

Li G, Zhang J, Yi Q R, et al. Synchrotron radiation X-ray in-line phase-contrast imaging with highly symmetric source (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2544–2552, doi: 10.1360/N972016-00905

主要的相位衬度成像方法包括同轴相衬成像^[1]、衍射增强成像^[2]、光栅剪切成像^[3]等。其中同轴相衬成像利用具有一定空间相干性的X射线穿过样品后在自由空间的传播来获得相位衬度,实验设置简单,在同步辐射光源上应用得最广泛。但是该方法的成像效果在许多同步辐射成像束线上并不理想,特别在追求更高空间分辨率的相位衬度成像时,相位衬度的成像质量(相位衬度水平)总是让人不太满意,严重限制了这种方法的生物医学应用。以前的工作中^[4~11]一般把这种高空间分辨率下相位衬度成像质量较差的原因归结为入射X射线的点扩展函数较大和探测器的空间分辨率差等因素,并探讨了这两个因素对同轴X射线成像质量的影响。

在本课题组以前的研究中^[12],探讨了光源对称度对同步辐射相位衬度成像质量的影响。光源对称度定义为同步辐射X射线源水平方向尺寸和垂直方向尺寸的比值,该值越接近于1则光源的对称度越高。研究发现,同轴相衬成像时X射线源较低的对称度会引起不同方向上点扩展函数随物像距离变化的较大差别,造成空间分辨率和相位衬度增强幅度的不一致,需要在某个折衷的物像距离处才能获得质量较好的同轴相衬图像。

目前,世界上同步辐射X射线(Synchrotron Radiation X-ray, SRX)成像束线的光源对称度差异较大,见表1。可以发现,多级Wiggler作X射线源时的光源

对称度最低,比值均大于10;弯铁或波荡器作X射线源的对称度较好,但一般也分布在3~8之间,只有意大利SYRMEP束线的光源对称度达到1.7的较好水平。为了研究X射线源对称度的变化和同轴相位衬度成像质量之间的关系,本论文通过在北京同步辐射装置(Beijing Synchrotron Radiation Facility, BSRF)成像线站(4W1A)光束线上加入小尺寸限光光阑,获得了一个对称度大大提高的SRX光源,从而使本课题组能第一次从实验上研究光源对称度的变化对SRX同轴相位衬度成像质量的影响。研究结果表明,光源对称度的提高极大改善了BSRF 4W1A线站SRX同轴相位衬度成像的质量。最后分析了成像质量提升的原因以及进一步改进的方向。

1 实验

1.1 实验几何

实验采用BSRF的4W1单周期电磁扭摆器为光源,磁极间隙66 mm,周期长度1.392 m,峰值磁场强度1.8 T,临界能量5.8 keV。光源尺寸的半高宽为1.23 mm (水平)×0.46 mm (垂直),光源不对称度约为2.7。通过42 m长的4W1A束线^[12]把同步辐射白光引入到实验棚屋中,经Si(111)双晶单色器单色化后照射在样品上。实验采用能量为13 keV的单色X射线。该束线最大水平接收角为1.0 mrad,最大垂直接收角

表1 世界部分同步辐射硬X射线相衬成像束线的参数^{a)}

Table 1 Parameters of some synchrotron radiation hard X-ray phase contrast imaging beamlines in the world^{a)}

束线和光源	光源类型	光源尺寸 ^{b)} (H μm ×V μm)	光源对称度	物源距离(m)	点扩展函数@物像距1 m (H μm ×V μm)
CLS-BMIT-ID	S-MW	441×16.6	26.6	55	8×0.3
AS-IMBL	S-MW	361×19	19	136	2.6×0.14
SSRF-13W1	MW	408×23	17.7	32	12.75×0.78
PF-14C	S-SW	1160×72	16	35	33×2.0
SPring-8BL20B2	BM	114×14	8.1	215	0.5×0.07
CLS-BMIT-BM	BM	173×30.8	5.6	23	7.5×1.3
APS 2BM-B	BM	230×50	4.6	50	4.6×1
ESRF-ID19	U	120×30	4.0	145	0.83×0.2
SLS-TOMCAT	S-BM	53×16	3.3	20	2.56×0.8
BSRF-4W1A	SW	524×195 ^{c)}	2.7	42	12.5×4.6
ELETTRA-SYRMEP	BM	135×80	1.7	23	5.9×3.5

a) S-MW: 超导多级扭摆器, MW: 多级扭摆器, BM: 弯铁, SW: 单极扭摆器, S-BM: 超导弯铁, S-SW: 超导单极扭摆器, U: 波荡器。各光源参数来源于<http://www.lightsources.org/>, 光源对称度及点扩展函数根据光源尺寸和物源距离计算得出; b) 表中光源尺寸为电子束团尺寸的sigma值, 光源的半高宽是sigma值的2.35倍; c) 数据根据实验当天弯铁的束流实测尺寸以及4W1的磁铁参数推算得到

为0.3 mrad, 真空度为 10^{-7} torr, 两端由铍窗隔绝, 末端封有铝窗用来保护铍窗. 实验几何如图1所示, 在距离光源17 m处有一个白光光阑, 通过调节这个白光光阑的水平和垂直尺寸, 可以改变光源的点扩展函数以及光源的对称度.

实验所用探测器是本课题组自行研制的高分辨率间接探测器. 该探测器用单晶闪烁体薄膜把入射X射线的图像高效率、高分辨地转化成可见光图像, 通过显微耦合系统把闪烁晶体薄膜上的图像放大并传递到可见光面探测器上, 实现X射线图像的高分辨率探测. 实验时采用4.6 μm 厚的铽掺杂钆石榴石(Gadolinium Gallium Garnet: Terbium, GGG:Tb)闪烁晶体薄膜, 耦合系统的物镜为20 $\times$ 0.45 NA, 中间变倍镜2 $\times$, 可见光面探测器的像素为13 μm . 探测器的等效像素尺寸为0.325 μm , 空间分辨率为0.65 μm , 有效视野宽度约为0.3 mm. 探测器放置在双晶单色器后约1 m的地方, 即距光源点43 m处, 可以实现物像

距离在0~1 m范围内变化.

实验样品为聚酰胺细丝组成的网格, 单根细丝的直径为50 μm . 实验时沿光路移动样品, 分别在物像距离为4, 10, 16, 36, 100, 200和300 mm处对样品进行同轴相衬成像. 为了比较光源点的对称度对相位衬度成像质量的影响, 分别在两种情况下进行了上述成像实验:

(1) 白光光阑完全打开, 此时对样品上任一点的光强有贡献的光源尺寸约为1.23 mm (水平) $\times$ 0.46 mm (垂直), 即光源对称度约为2.7; 曝光时间40 s, 探测器的电子增益为20倍, 平均光强为33000.

(2) 采用减小白光光阑水平和垂直方向尺寸的方法来提高成像系统光源的对称度, 原理如图2所示. 把距离光源17 m的白光光阑水平方向关至约为210 μm 宽时, 对样品上任一点有贡献的光源水平尺寸变为: $S_x \approx 210 \mu\text{m} \times (17+25+1)/26 \approx 350 \mu\text{m}$. 此时把垂直方向的白光光阑也关小到约210 μm . 通过这种调节,

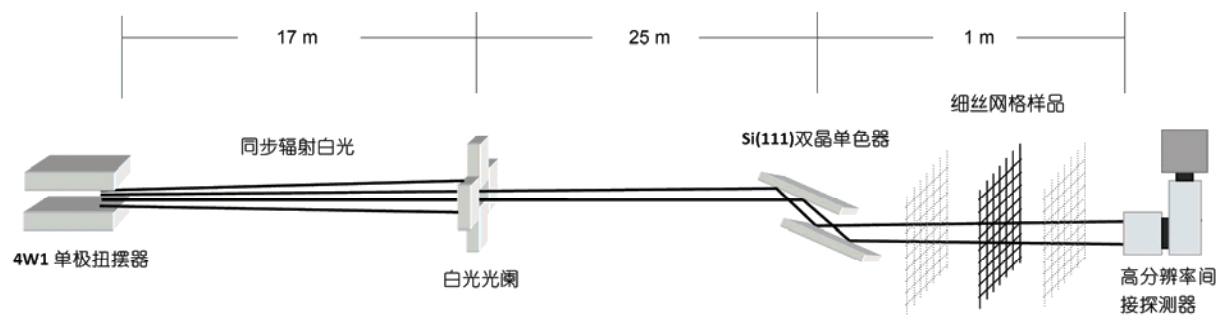


图1 BSRF 4W1A束线开展X射线同轴相衬成像实验几何示意图

Figure 1 Sketch of X-ray in-line phase contrast imaging setup at BSRF 4W1A beamline

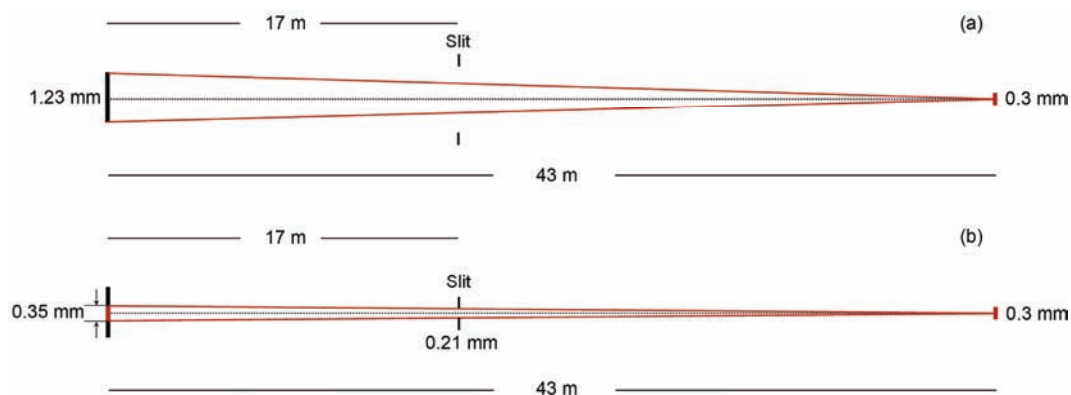


图2 (网络版彩色)在水平方向上样品、白光光阑和光源尺寸几何关系的示意图. (a) 白光光阑全开时探测器上任一像素的光强来自1.23 mm光源上各个点的贡献; (b) 白光光阑关小至0.21 mm时, 探测器上任一像素的光强来自0.35 mm光源上各个点的贡献

Figure 2 (Color online) Geometrical sketch of sample, white beam slit and source size in horizontal direction. (a) White beam slit is open, the X-ray intensity of a certain detector pixel is contributed by 1.23 mm source; (b) white beam slit is closed to 0.21 mm, and the X-ray intensity of a certain detector pixel is contributed by 0.35 mm source

光源的对称度提高到了约1.0. 这时单张图像的曝光时间增加为60 s, 探测器的电子增益为20倍, 平均光强为11000.

1.2 实验结果

(i) 白光光阑完全打开时. 此时, 光源的尺寸为1.23 mm (水平) $\times$ 0.46 mm (垂直), 光源对称度约为2.7. 当物像距离很小时(10 mm以下), 衬度主要来源于吸收衬度, 在X射线能量为13 keV的条件下, 50 μ m直径的聚酰胺细丝网格吸收衬度很小, 在实验图像中基本不可见. 当物像距离增加到16 mm时, 水平和竖直方向放置的细丝网格边缘均出现可观察的相位衬度(图3(a)). 随着物像距离进一步增大, 直至300 mm, 水平放置的细丝的相位衬度逐步增强; 而垂直放置的细丝相位衬度变化不大, 而且随着距离的增加边界逐渐变得模糊, 如图3(c)所示.

为了更清楚地呈现这种差异, 沿图3(a)中白色线段所示的位置对所有距离的图像作截线, 结果如

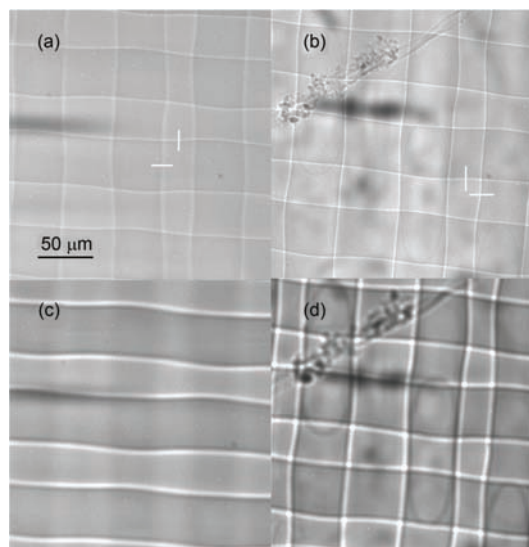


图3 细丝网格在不同对称度光源下的同轴相衬成像结果举例. (a), (c) 白光光阑完全打开光源对称度低时的结果; (b), (d) 白光光阑关小到210 μ m $\times$ 210 μ m光源对称度高时的结果. (a)和(b)的物像距离为16 mm, (c)和(d)的物像距离为300 mm. 在(d)中可以看到在细丝内部有椭圆型的气泡. (b)和(d)左上角的干扰结构来自光路

Figure 3 Some experiment results of in-line phase contrast imaging to polyamide fiber under different source symmetry conditions. (a), (c) are obtained from white beam slit completely opening and low source symmetry, (b), (d) correspond to 210 μ m $\times$ 210 μ m white beam slit size and high source symmetry. The distance of object to detector (DOD) related to (a) and (b) is 16 mm, DOD related to (c) and (d) is 300 mm. Oval air bubbles in fiber can be seen from (d), some irregular structures on top of (b) and (d) stem from beamline setup

图4(a), (b)所示. 从图中可以看出, 在白光光阑完全打开的条件下, 垂直方向具有典型的同轴相衬成像边缘衬度的增强, 随着物像距离的增加, 细丝边缘光强增强的幅度越来越大(图4(b)), 形成强烈反差的是水平方向边缘衬度的增强效应很弱(图4(a)及其局部放大图).

(ii) 把距离光源17 m的白光光阑关小到约210 μ m $\times$ 210 μ m. 此时, 光源的尺寸约为350 μ m $\times$ 350 μ m, 光源的对称度为1.0. 提高光源对称性后的同轴相衬成像结果如图3(b), (d)所示. 物像距离较近时(16 mm) (图3(b)), 细丝网格的图像在水平和竖直两个方向均具有可观察到边界增强效应. 物像距离较远时(300 mm) (图3(d)), 细丝网格的图像在水平和竖直两个方向的边界增强效应进一步明显增强. 沿图3(b)中白色线段所示的位置对此条件下所有距离的图像作截线的结果如图4(c), (d)所示. 从图中可以看出, 在白光光阑关小到接近相等的条件下, 水平方向具有与垂直方向相近的典型的同轴相衬成像边缘衬度的增强.

2 数据分析

2.1 光阑大小对通量和通量密度的影响

关小白光光阑会引起X射线光斑尺寸和总通量的明显下降. 4W1束线的接收角分别为1 mrad $\times$ 0.3 mrad, 距离光源17 m处白光光阑上的光斑面积为17 mm $\times$ 5.1 mm, 实验中白光光阑的大小为0.21 mm $\times$ 0.21 mm. 用白光光阑关小后的通光面积和其上光斑面积的比可以粗略估计关小白光光阑引起的总通量下降, 二者的比值为 5.2×10^{-4} . 即关小光阑使光斑的总通量下降了约2000倍. 但照射到样品上的X射线通量密度的下降远没有这么大. 由图3(a), (b)可知, 白光光阑关小前后探测器单个像素上的光强约为33000和11000, 曝光时间为40和60 s, 关小白光光阑前后光强的比值约为4.5:1.

其中的原因是BSRF 4W1光源在水平方向的半高宽为1.23 mm, 发散度为1 mrad, 光源到探测器距离为43 m. 在关小白光光阑前, 光源上任一点在探测器所在平面形成的光斑水平尺寸为43 mm. 此时, 探测器上任一点的光强来自于1.23 mm宽的水平光源; 关小白光光阑后, 对探测器上每个像素光强有贡献的光源尺寸减小为0.35 mm (图2), 即关小水平光阑

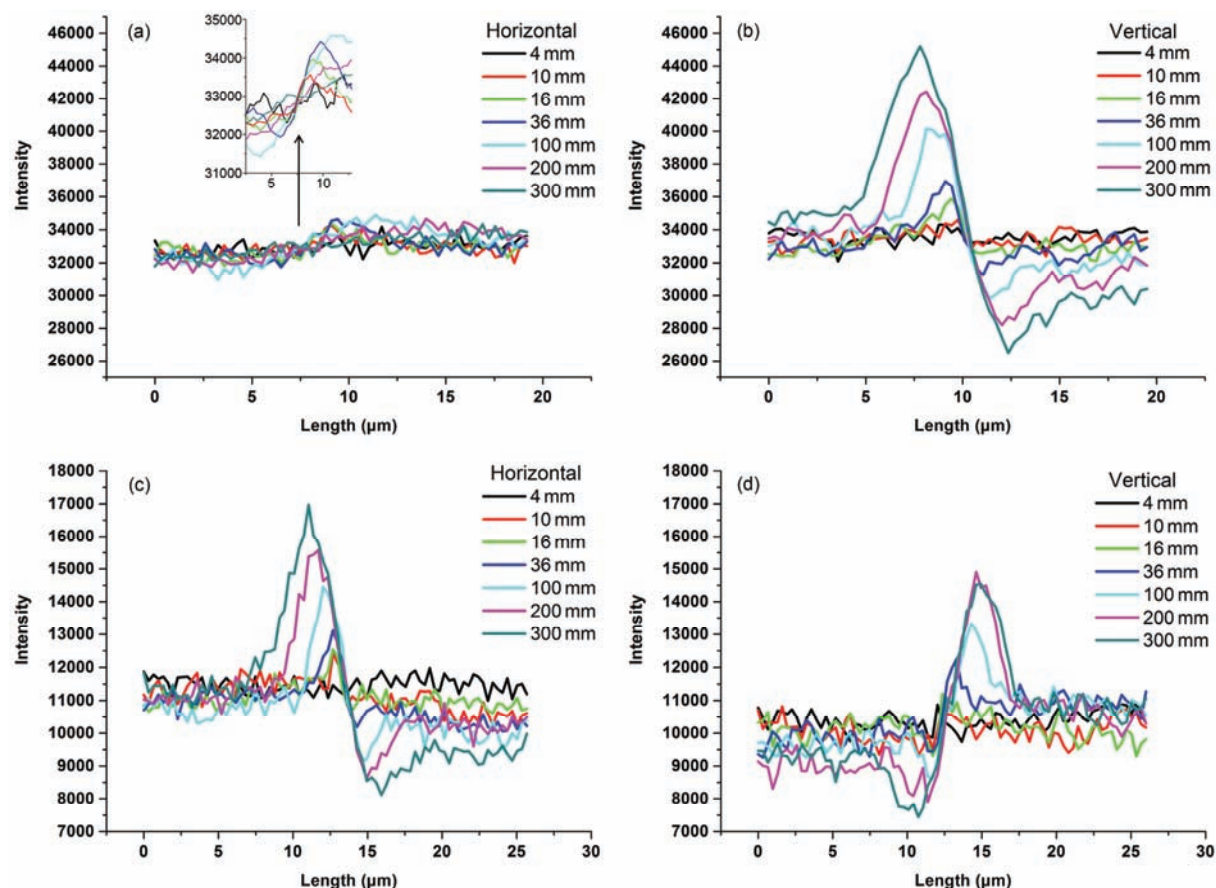


图4 两种光源对称度下细丝边界处的光强截线随物像距离变化的实验结果. 截线的位置在图3(a), (b)中用白色线段标示. (a), (b) 白光光阑完全打开光源, 对称度低的条件下水平方向和垂直方向的截线; (c), (d) 白光光阑关小到约 $210\ \mu\text{m} \times 210\ \mu\text{m}$ 光源对称度高的条件下水平方向和垂直方向的截线. 不同颜色代表了不同的物像距离, 分别为 4, 10, 16, 36, 100, 200 和 300 mm. 图(a)中的局部细节图对原数据进行了适当的平滑处理

Figure 4 Intensity curves depicted along a pixel line crossing the fiber edge at different DODs under two kinds of source symmetry. The pixel lines are marked by white lines on Figure 3(a) and (b). (a) and (b) respectively shows curves in horizontal and vertical direction under white beam slit completely opening and low source symmetry conditions. (c) and (d) shows curves in horizontal and vertical direction under $210\ \mu\text{m} \times 210\ \mu\text{m}$ white beam slit size and high source symmetry conditions. DOD, indicated by different colors, is respective 4, 10, 16, 36, 100, 200 and 300 mm. The curves showed in detailed image in (a) is moderately smoothed

前后的光强比为3.5:1. 同样, 在垂直方向, 光源尺寸的半高宽是0.46 mm, 把垂直方向光阑关小到0.21 mm后的光强比是1.3:1. 因此, 关小白光光阑前后总的光强变化为4.55:1, 与实验得到的关小白光光阑前后的强度比十分接近.

采用关小白光光阑的方法提高光源的对称度, 虽然会使总通量有3个量级的下降, 但主要来自于光斑尺寸的减小, 通量密度的下降只有几倍. 这对于高分辨成像的光强影响较小, 但却可以大大提高系统同轴相衬成像的质量.

实验中可以在白光光阑前利用聚焦元件对入射X射线进行一定的聚焦来提高通过光阑的通量, 亦可

以在白光光阑后放置聚焦元件, 虽然不能提高总通量, 但是可以提高照射到样品上的X射线通量密度. 由于聚焦元件也会对等效光源发散度产生一定的影响, 因此需要仔细考虑以免聚焦元件造成等效光源发散度变差. 如果条件允许, 将白光光阑靠近光源点也能提高通量.

2.2 光源对称度对相位衬度的影响

在本实验中, 光源水平和垂直方向的分散度都比较大, 此时光源尺寸是影响光源点扩展函数的主要因素, 光源尺寸越大, 点扩展函数越差, 光源尺寸越小, 点扩展函数越好.

根据图4中的截线和衬度的定义^[13]:

$$\text{Contrast} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

计算了在光源不同对称度下每个物像距离的同一细丝固定边缘位置在水平和垂直两个方向的衬度, 结果如图5所示. 可以明显地看到, 当白光光阑正常打开时, 在光源对称度较低、光源水平方向点扩展函数较差的条件下, 细丝边缘水平方向的衬度远低于垂直方向的衬度. 水平方向在物像距离为100 mm附近达到衬度的最大值0.057, 随着物像距离增大而逐渐下降. 而垂直方向的衬度则一直随物像距离增加而增大, 直到本次测量的最远距离300 mm处衬度增大至0.261. 即不同的光源点扩展函数会对样品的相位衬度产生巨大影响.

与此形成鲜明对比, 在白光光阑均关小到约210 μm , 光源对称度大大提高的条件下, 细丝边缘水平方向的衬度和垂直方向的衬度随着物像距离的增加而非常一致地增加, 当物像距离增加至300 mm时, 这两个方向的衬度分别增大到0.35和0.32.

上述结果表明, 通过调节水平光阑大小(即光源的水平点扩展函数), 可以很容易地调节水平方向上聚酰胺细丝边界的最大相位衬度从约0.057, 增加到约0.35, 增大了5倍, 同时还获得了高对称度光源的成像.

其实, 这一点不难理解. 光源的点扩展函数越小, 入射X射线的空间相干性越好, 同轴相位衬度成像获得的衬度增强就越大; 反之, 光源的点扩展函数

大, 入射X射线的空间相干性就越差, 同轴相衬成像能够获得的衬度增强越小.

2.3 光源对称度对成像质量的影响

从图4的4幅曲线图中可以观察到, 细丝边界光强截线的宽度随物像距离的增大而增大. 以图4中光强截线峰值与谷值的平均作为基线, 将光强截线分为亮区和暗区, 通过统计细丝边界处光强截线亮区半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM, 相对于基线强度)的像素数目可以测量其宽度. FWHM和物体到探测器的距离之间的关系如图6(a)所示. 图中的数据点来自对图4(a)~(c)3幅图光强截线中亮区的FWHM的测量. 直线由最小二乘法拟合得到. 图6(a)表明, 光源点扩展函数大则细丝边界光强截线的FWHM随着物像距离的增加快速地单调增大, 这个现象将对图像的空间分辨率产生重要影响. 以瑞利(Rayleigh)判据作为标准对不同FWHM条件下的图像分辨率做了一个初步估计. 按照瑞利判据, 两个亮斑相互靠近到一定程度, 在各自峰位强度间会产生鞍点, 若鞍点强度超过了峰强的73.5%则认为这两个亮斑已不能分辨, 此时两个亮斑峰位间的距离为该条件下的空间分辨率. 若两个亮斑完全一致且对称分布, 则峰位左右两侧强度为峰强36.75%的两点间距离可以代表该条件下的空间分辨率. 因此根据图4, 分析了光强截线亮区相对基线强度为(峰强-基线) $\times$ 36.75%的两点间距离, 以此反映各条件下的空间分辨率, 得到了与FWHM相似的结果, 如图6(b)所示,

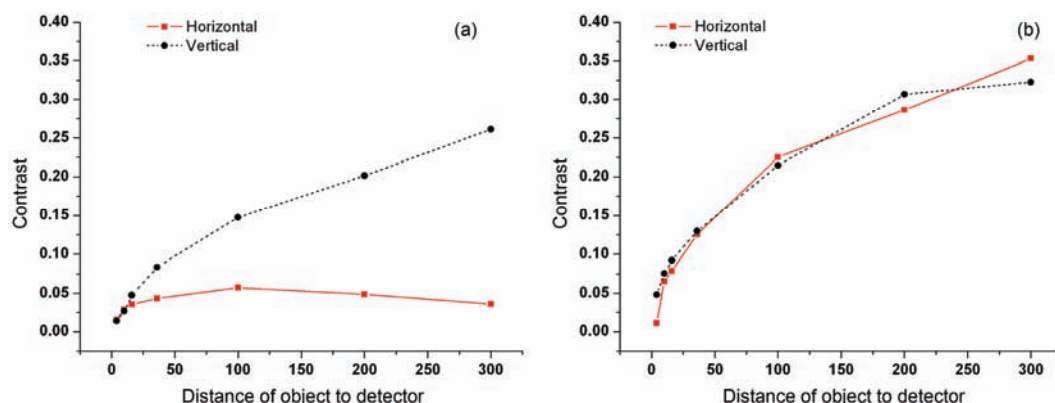


图5 (网络版彩色)不同光源对称度下细丝样品成像衬度和物像距离的关系曲线. (a) 白光光阑正常打开光源对称度较低时的结果; (b) 白光光阑关小到约210 μm ×210 μm , 光源对称度较高时的结果

Figure 5 (Color online) Variation of fiber edge contrast as a function of DOD under two kinds of source symmetry conditions. (a) Results under white beam slit completely opening and low source symmetry conditions; (b) results under 210 μm ×210 μm white beam slit size and high source symmetry conditions

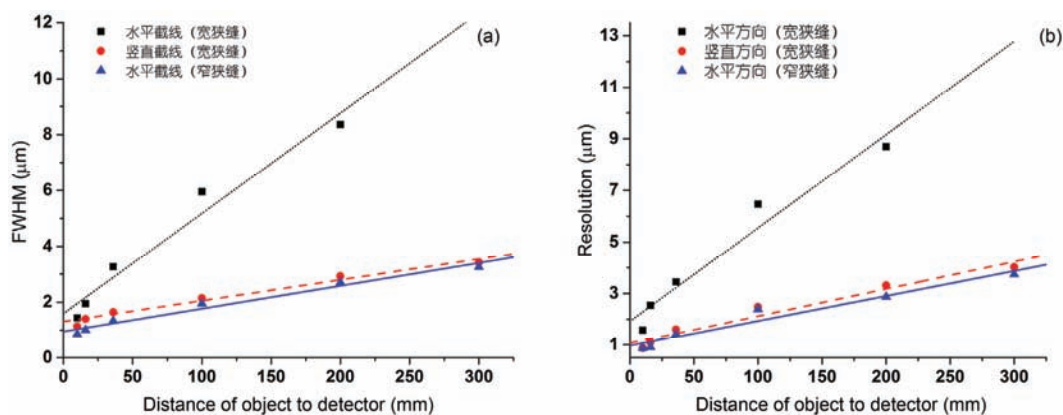


图6 (网络版彩色)不同光源对称度的条件下,细丝边界光强截线的半高全宽(FWHM)(a)和空间分辨率随物像距离的变化(b)

Figure 6 (Color online) (a) Full width at half maximum (FWHM) of intensity curve of pixel line crossing fiber edge and (b) spatial resolution as a function of DOD under different source symmetry conditions

在光源点扩展函数较大的水平方向,空间分辨率随物像距离增加快速单调变差,而在采用光阑约束后的高对称性等效光源照射下,水平方向的空间分辨率得到了明显改善,并达到了与竖直方向相当的水平。

FWHM随物像距离线性增加的原因是同轴相衬成像中菲涅耳干涉展宽与光源点扩展函数展宽的共同作用。假设光源各点造成的样品边界的展宽相同,则总展宽是菲涅耳干涉展宽与点扩展函数的卷积。在本文的物像距离范围内,菲涅耳干涉展宽较小,上述展宽主要来自光源的点扩展函数,其斜率与光源尺寸成正比关系。因此,对高对称度光源(光阑关小的情况下),可以获得非常对称的空间分辨率和相位衬度。

虽然光源尺寸大的方向不太影响光源尺寸小的方向的成像衬度和分辨率,但是由于实际样品结构的取向复杂,相位衬度和空间分辨率互相干扰,图像的整体质量会严重下降,难以突破光源尺寸大的方向限制的相位衬度和分辨率水平。随着光源对称度的提高,同轴相衬成像的衬度和空间分辨率的对称性也大大提高,从而大幅提高成像的质量。

2.4 关于最佳成像条件的讨论

人们总是希望获得的图像既有高空间分辨率,又有强衬度,两者可以兼得的成像一直是成像研究的重要目标。可以注意到,在本实验涉及的物像距离(4~300 mm)范围内,光阑完全打开条件下,水平方向的相位衬度在100 mm附近达到了极大值,之后随着物像距离增加,衬度反而逐渐下降;其他条件下的相

位衬度则随着物像距离增加而不断增大。相位衬度不会无限制地提高,在本实验的物像距离内,大部分实验条件下还没有达到衬度最大的物像距离。衬度极大位置与光源对称性、X射线能量、样品的材质和尺寸、探测器分辨率和灵敏度等多种因素相关,这将是本研究下一步工作的方向。同时,由于空间分辨率随着物像距离的增加而下降,如何在空间分辨率和相位衬度这两个因素间取得平衡来定义最佳成像条件也有待进一步研究和探讨。

3 讨论和展望

光源点扩展函数的大小不仅决定成像的空间分辨率,在相位衬度成像时,更显著决定着物体相位衬度的大小。通过减小光源的点扩展函数,可以大幅提高成像的相位衬度水平,这种提高对采用高能X射线开展同轴相衬成像时非常重要,此时成像衬度不够高是最主要矛盾。

此外,高对称度的小尺寸X射线源不仅使同轴相位衬度成像整体图像的空间分辨率趋于一致,而且使整体图像的相位衬度水平趋于一致。这两重因素对称性的提高,大大提升了同轴相位衬度成像的质量,这一点将为发展更高水平的相衬成像技术指明方向。

目前,所有同步辐射光源的电子束团都是水平方向尺寸远大于垂直方向尺寸的低对称度光源,只能通过在光束线上利用减小水平方向的光阑来获得对称度较高的光源。由于电子束团的垂直尺寸为100 μm量级(第二代光源)到10 μm量级(第三代光源),水

平光阑的开口尺寸要小于这个尺寸才能获得对称光源,而且光阑的位置离光源越远,需要光阑的开口尺寸越小.这个光阑大大减小了束线的光斑尺寸和总光子通量.正在设计中的新一代光源将采纳圆形电子束光源,如APS-II和HEPS,将使同步辐射光源的优势在同轴相位衬度成像中得到真正有效发挥.

总之,采用高对称度光源,将使得所有提升空间分辨能力和相位衬度水平的努力,都会带来相应的图像质量的提升,从而使高分辨相位衬度成像成为可能.如果能进一步提升探测器的空间分辨能力,梦想中的活体、动态、实时、细胞水平的相位衬度成像亦将成为可能.

致谢 对Massachusetts General Hospital和Harvard Medical School的Gupita教授及上海科技大学的江怀东教授的建设性讨论,中国科学院高能物理研究所加速器中心的岳军会博士和祝德充博士在BSRF 4W1束流尺寸方面的讨论和协助,北京同步辐射装置4W1A成像站在束线机时上的协助,在此一并致谢.

参考文献

- 1 Snigirev A, Snigireva I, Kohn V, et al. On the possibilities of X-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66: 5486–5492
- 2 Chapman D, Thomlinson W, Johnston R E, et al. Diffraction enhanced X-ray imaging. *Phys Med Biol*, 1997, 42: 2015–2025
- 3 David C, Nöhammer B, Solak H H, et al. Differential X-ray phase contrast imaging using a shearing interferometer. *Appl Phys Lett*, 2002, 81: 3287–3289
- 4 Wilkins S W, Gureyev T E, Gao D, et al. Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays. *Nature*, 1996, 384: 335–338
- 5 Cloetens P, Ludwig W, Baruchel J, et al. Holotomography: Quantitative phase tomography with micrometer resolution using hard synchrotron radiation X rays. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 2912–2914
- 6 Pagot E, Fiedler S, Cloetens P, et al. Quantitative comparison between two phase contrast techniques: Diffraction enhanced imaging and phase propagation imaging. *Phys Med Biol*, 2005, 50: 709–724
- 7 Gureyev T E, Mayo S, Wilkins S W, et al. Quantitative In-line phase-contrast imaging with multienergy X rays. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 5827–5830
- 8 Baruchel J, Cloetens P, Härtwig J, et al. Phase imaging using highly coherent X-rays: Radiography, tomography, diffraction topography. *J Synchrotron Rad*, 2000, 7: 196–201
- 9 Nugent K A, Gureyev T E, Cookson D F, et al. Quantitative phase imaging using hard X rays. *Phys Rev Lett*, 1996, 77: 2961–2964
- 10 Pogany A, Gao G, Wilkins S W. Contrast and resolution in imaging with a microfocus X-ray source. *Rev Sci Instrum*, 1997, 68: 2774–2782
- 11 Jia Q J, Chen Y, Li G, et al. Optimization of the in-line X-ray phase-contrast imaging setup considering edge-contrast enhancement and spatial resolution. *Chin Phys C*, 2012, 36: 267–274
- 12 Jiang J H, Zhao J Y, Tian Y L, et al. The X-ray topography station at the Beijing synchrotron radiation facility. *Nucl Instr Meth Phys Res A*, 1993, 336: 354–360
- 13 Born M, Worf E. *Principles of Optics* (in Chinese). 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. 249 [Born M, Worf E. 光学原理. 第七版. 北京: 电子工业出版社, 2009. 249]

Summary for “高对称度光源的同步辐射 X 射线同轴相衬成像”

Synchrotron radiation X-ray in-line phase-contrast imaging with highly symmetric source

LI Gang^{1*†}, ZHANG Jie^{1†}, YI QiRu^{1†}, WANG YanPing¹, CHEN Yu¹, JIA QuanJie¹ & JIANG XiaoMing^{1,2*†}

¹ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

² Beijing Advanced Sciences and Innovation Center of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China

* Corresponding authors, E-mail: lig@ihep.ac.cn; jiangxm@ihep.ac.cn

† Equally contributed to this work

In available synchrotron radiation facilities all over the world, the size of electron beam bunch has distinct difference between the horizontal direction and the vertical direction at the cross section vertical to electron moving direction. It will cause low symmetry of source size in horizontal and vertical directions, and result in big difference in the spacial resolution and phase contrast between these two directions in synchrotron radiation X-ray in-line phase contrast imaging. The superior resolution and phase contrast of one direction will couple with the inferior ones of the other direction in actual object imaging, this interaction will degrade both spacial resolution and phase contrast of the whole image and lead to poor image quality. In this paper, a four-knife white beam slit is used in Beijing synchrotron radiation facility (BSRF) 4W1A beamline to adjust source size in horizontal and vertical directions and restrict the point spread function (PSF) of source, the source size is limited from 1.23 mm (horizontal)×0.46 mm (vertical) to 0.35 mm×0.35 mm. By this way, a highly symmetric effective X-ray source is obtained. The symmetry of source size is improved from 2.7 to about 1. Although the total X-ray flux loses 99.95%, the X-ray flux density is only reduced to 22%. It because total flux is taken account of the expanded spot size due to divergence, while flux density is mainly related to effective source size, which is limited not severely as expanded spot size by white beam slit. The flux density reduction by this method is not a critical defect in high resolution X-ray phase contrast imaging and can be improved by other ways. The polyamide fiber net is imaged using X-ray in-line phase contrast imaging at 4W1A, BSRF. Diameter of fiber is about 50 microns, X-ray energy is 13 keV, the effective pixel size is 0.325 micron, the experiment images are obtained at object-to-detector distances of 4, 10, 16, 36, 100, 200 and 300 mm with source-to-object distance of about 43 m. The results show that when source size in horizontal direction is limited from 1.23 to 0.35 mm (symmetry of source size is about 1 at this condition), the maximal phase contrast of image is advanced from 0.057 to 0.35. It means the density sensitivity is promoted about 5 times than in ordinary source size conditions. The spacial resolutions in different source size symmetry conditions are also primary analyzed based on Rayleigh criterion. The result shows that spacial resolution can be improved notably in horizontal direction by limiting horizontal source size to a nearly symmetric source size condition. Our work demonstrates that the spacial resolution and phase contrast can be promoted at the same level by source size symmetry improved, which markedly improved the imaging quality in synchrotron radiation X-ray in-line phase-contrast imaging. It will have great benefit to high-resolution X-ray in-line phase contrast imaging. The reasons of these improvements are analyzed and developments in future are also discussed.

X-ray in-line phase-contrast imaging, source symmetry, contrast, spacial resolution, synchrotron radiation, point spread function

doi: 10.1360/N972016-00905