

线焦斑 X 射线源成像*

王研¹⁾²⁾# 刘鑫³⁾# 黄万霞¹⁾ 易明皓³⁾ 郭金川³⁾† 朱佩平¹⁾‡

1)(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(深圳大学光电工程学院, 光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 深圳 518060)

(2016年6月1日收到; 2016年7月7日收到修改稿)

为解决普通 X 射线源光通量和空间相干性的矛盾, 本文提出一种焦斑为线状的新型 X 射线源. 理论上, 本文所提的射线焦斑为理想的线, 沿线方向上提供高通量光子; 垂直线方向光源为空间相干光, 可为系统提供高分辨率图像. 沿着线方向上, 图像会损失细节, 为补偿该方向上图像的损失, 利用旋转叠加的方法, 重构出高分辨率图像. 在频率域, 分析了旋转叠加空间频率传递函数值的分布特性, 其结果表明: 相对单个图像, 频率传递函数在频域的各个方向, 传递函数特性有大幅度提高, 从而可以传递图像高空间频率成分. 基于普通 X 射线管, 实现了该种射线源, 并利用实验验证了该方法的有效性.

关键词: X 射线, X 射线成像, 图像重构

PACS: 95.85.Nv, 87.59.-e, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.65.219501

1 引言

X 射线自发现以来在各个领域都有广泛而重要的应用, 特别是在安检、医学及材料学领域中是一种不可或缺的成像技术^[1-5]. 在 X 射线成像系统中, 光源的相干性对图像质量有决定性的影响^[6]. 在可见光波段, 有各种有效的方法改善光束的质量, 但对于 X 射线, 能采用的有效手段极其有限, 一般成像系统中没有采取任何方法改善光束的质量^[7-9]. X 射线光束质量体现在两个方面, 一是光源的时间相干性, 由光源的谱分布体现; 另一个是光源的空间相干性, 由 X 射线发射面积及形状决定. X 射线成像可分为两代技术, 第一代是基于吸收的成像方法, 该方法利用物体不同部位对光强的吸收不同形成图像衬度; 第二代为相衬成像, 利用 X 射线穿过物体时相位变化形成图像衬度. 对于弱吸收物体, 吸收成像难以形成图像衬度, 只能采用

相衬成像技术对物体成像, 如采用基于光栅的微分相衬成像^[10-12]、X 射线散斑技术^[13,14]、孔编码技术^[15]、衍射增强^[16]及同轴相衬成像^[17-19]. 但对这两类成像技术, 只要物体同探测器间存在距离, 光源的空间相干性对成像质量影响都相同.

缩小光源光子发射面积是一种有效提高光源空间相干性的方法, 例如采用微焦斑光源的同轴相衬成像, 其光源焦点直径仅有 10—50 μm , 远低于常用 X 射线管焦斑 0.5—1 mm. 但小焦斑带来另一个严重问题: 光源的光通量太低. X 射线管利用高速电子束轰击金属钨或铜靶发射 X 射线光子, 但由于转换效率低, 99% 以上的电子能量都转换为热量, 靶在工作过程中温度极高, 尤其是靶点, 电子束流不能太大, 否则极易烧坏靶材. 微焦斑光源电子束电流通常为 50—200 μA , 而普通 X 射线管在 1—40 mA, 原因在于微焦斑靶点面积太小, 电流不能大, 从而光通量很小.

* 中科院自主创新项目(批准号: Y4545320Y2)、国家自然科学基金(批准号: 11535015, 61571305, 61101175, 11375225)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB825804)资助的课题.

共同第一作者.

† 通信作者. E-mail: jcguo@szu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhupp@ihep.ac.cn

因此, 对于普通的 X 射线管光源, 光源的空间相干性同光通量是一对矛盾, 目前还没有解决这一矛盾的有效方法. 本文提出一种线焦斑光源, 间接解决这一矛盾. 本文设计了一种焦斑形状为 $1\text{ cm} \times 0.1\text{ mm}$ 的 X 射线管, 管电流为 $1\text{--}3\text{ mA}$. 在 0.1 mm 方向上光源具有良好的空间相干性; 在 1 cm 方向上, 光源不具备空间相干性, 图像将失去物体的细节, 此时旋转物体, 获得多个方向的物体图像, 利用滤波旋转叠加的方法恢复物体细节. 相对于常用微焦斑管电流 $50\text{ }\mu\text{A}$, 光强增强了 $20\text{--}60$ 倍; 相对于普通焦斑 $0.5\text{--}1\text{ mm}$ 焦斑直径, 线源焦斑降到了 0.1 mm , 分辨率相应提高 $5\text{--}10$ 倍.

2 探测强度

普通 X 射线管产生的 X 光为部分相干光, 采用部分相干光传播理论处理光的传播. 部分相干光用互强度来描述任意两点的相干性, 两平面间互强度的传播如图 1 所示, 图中 r_1 和 r_2 为距离矢量.

透过物体的任意两点 (P_1, P_2) 互相干强度为 $J(P_1, P_2)$, 传播到像面任意两点 (Q_1, Q_2) 的互相干强度为 $J(Q_1, Q_2)$. 根据互强度传播理论,

$$J(Q_1, Q_2) = \frac{1}{\lambda^2} \iint_s \iint_s J(P_1, P_2) \times \frac{\exp[jk(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)]}{r_1 r_2} dS_1 dS_2, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, k 为波数^[20]. 当 Q_1, Q_2 两点重合时, 得到强度分布 $I(Q)$.

采用 van Cittert-Zernike 对光源的假设: 光源上任意两点统计无关, 将 (1) 式变换到频域计算, 可得到如下表达式^[21]:

$$I(x, y) = I_0(x, y) \otimes I_1(x, y), \quad (2)$$

其中, 符号 \otimes 为二维卷积, $I_0(x, y)$ 为光源经过位于物体处针孔的针孔成像图, $I_1(x, y)$ 为光源为理想点源物体成像图.

当光源为有限长的理想线源时, 则 $I_0(x, y)$ 可写为

$$I_0(x, y) = \delta(x)\text{rect}(y/a), \quad (3)$$

其中, $\delta(\cdot), \text{rect}(\cdot)$ 分别为 Delta 函数和矩函数. 参数 a 的大小导致该方向图像空间频率的损失. 将强度 (2) 式转换到频域为

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v), \quad (4)$$

其中, $G(u, v), H(u, v)$ 及 $F(u, v)$ 分别为 $I(x, y), I_0(x, y), I_1(x, y)$ 的二维傅里叶变换; (u, v) 为空间频率. 则 $H(u, v)$ 为高分辨率图像 $I(x, y)$ 的空间传递函数.

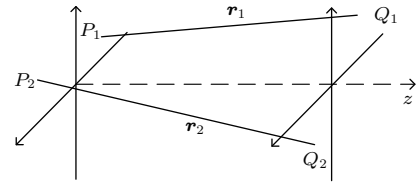


图 1 自由空间部分相干光互强度传播

Fig. 1. The propagation of mutual intensity in free space.

3 图像重构算法

为重构高分辨率图像 $I_1(x, y)$, 必须提高空间传递函数的传递特性. 为此, 可旋转光源, 得到不同角度下的多幅图像, 然后利用叠加图像的方法提高传递函数的传递特性. 当光源绕其中心旋转 θ 角度到新的坐标系统, 其针孔图像用 $I_0(s, t)$ 表示, 两个坐标系统有如下关系:

$$\begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (5)$$

由傅里叶变换旋转不变性, 旋转后图像空间传递函数为 $H(u_\theta, v_\theta)$, 其中

$$\begin{pmatrix} u_\theta \\ v_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}. \quad (6)$$

对多幅图像叠加, (4) 式可写为

$$G(u, v) = F(u, v) \sum_{\theta=0} H(u_\theta, v_\theta) = F(u, v)H'(u, v), \quad (7)$$

其中

$$H'(u, v) = \sum_{\theta=0} H(u_\theta, v_\theta).$$

可以用如下图形表示出旋转叠加对空间传递函数的影响. 当只拍摄一副角度的图像时, 传递函数只能传递频率域过中心某一个方向上的空间频率, 如图 2(a)–(c) 所示, 这些传递函数图像在频率域相差一个旋转角度, 叠加后可以传递不同方向上空间频率, 如图 2(d) 所示. 理论上, 在 $0\text{--}\pi$ 角度内, 旋转无数个角度, 则可以传递所有的空间频率. 从图 2 可以看出, 相比单幅空间频率响应, 叠加频率响应在各个方向都有响应.

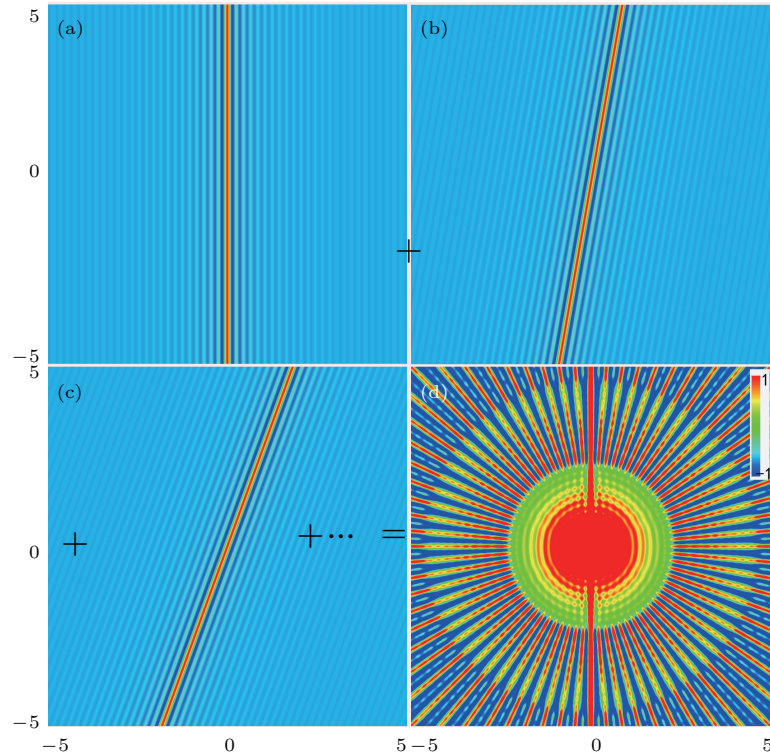


图2 (网刊彩色) 空间频率响应函数在频域内的值(每幅图两个方向 (u, v) 上的空间频率范围都为 $-5 \sim 5$ lp/mm) (a)–(c) 源旋转的角度, 依次为 $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$; (d) 19 副 $0^\circ \sim 180^\circ$ 空间频率响应叠加, 每 10° 一副; 图中频率传递函数值为 $-1 \sim 1$

Fig. 2. (color online) The values of spatial frequency response in frequency field (The spatial frequency of two axes (u, v) change from -5 to 5 lp/mm): (a)–(c) The rotation angles are $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$, respectively; (d) the superposition of 19 images with $0^\circ \sim 180^\circ$ rotation angles, the value of color bar varies from $-1 \sim 1$.

4 实验

4.1 光源设计

普通 X 射线光源灯丝结构为螺旋状结构, 螺旋直径一般为 $1 \sim 1.5$ mm, 如图 3(a) 所示(图 3(b) 为其侧视图), 灯丝发射的电子通过聚焦、加速系统轰击高 Z 物质靶材, 产生 X 射线. 螺旋直径决定着 X 射线焦点一维方向大小, 如图 3(b) 所示. 将灯丝改为蛇形状, 如图 3(c) 所示, 不采用螺旋灯丝, 而是平板状, X 射线焦点一维大小由灯丝厚度决定, 另一维与灯丝长度有关. 本文中灯丝厚度为 0.1 mm, 长度为 1 cm. 在长度方向上, X 射线管通常也采用聚焦措施, 而本文不采用, 从而形成一个线状的焦斑.

4.2 系统实验

在实际成像系统中, 光源难以旋转, 采用旋转物体的等效方式, 系统布局如图 4 所示.

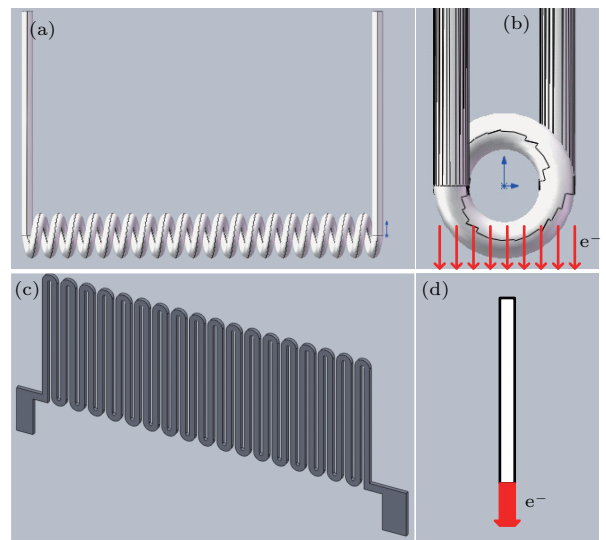


图3 (网刊彩色) 线状 X 射线源灯丝设计 (a) 普通 X 射线管灯丝结构; (b) 普通灯丝侧视图; (c) 线焦点 X 射线源灯丝结构; (d) 线源灯丝侧视图

Fig. 3. (color online) The design of filament of X-ray line focal spot: (a) The structure of filament for traditional X-ray tube; (b) the lateral view of common filament; (c) the structure of filament for line focal X-ray source; (d) the lateral view of filament of line source.

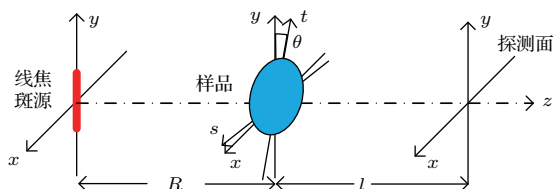


图4 (网刊彩色) 成像系统结构

Fig. 4. (color online) Imaging system.

测试物体为集成电路芯片, 芯片内部含有细小连接金属线, 可以直观看到光源大小对金属线成像的影响. 测试参数如下: 钨靶 X 射线管管电压 40 kV, 管电流 1 mA, 单幅图像曝光时间 50 ms, 物体每次旋转 10°, 共 17 幅照片, 总曝光时间为 850 ms, 光源到物体距离 $R = 0.5$ m, 物体到探测器距离 $l = 0.5$ m, 图中圆直径实际尺寸为 35 mm. 探测器为高速 (最高 60 帧/s) 平板探测器 (DEXELA 1207NDT), 单个像素为 $74.8 \mu\text{m} \times 74.8 \mu\text{m}$. 成像及恢复结果如图 5 所示.

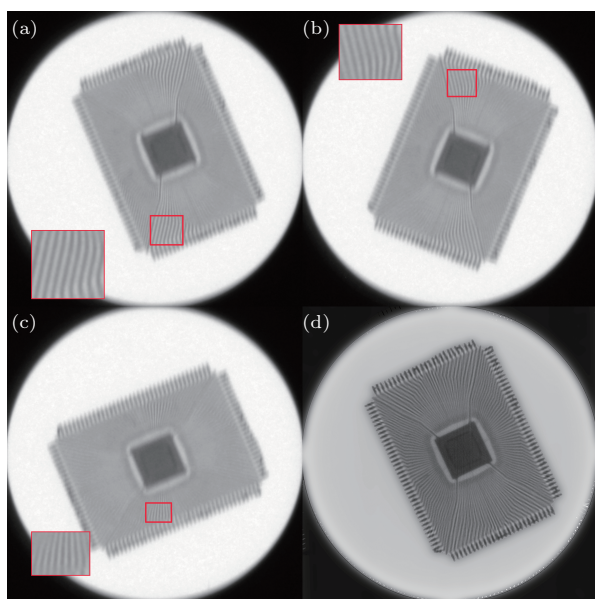


图5 (网刊彩色) 样品成像实验 (a)—(c) 不同旋转角度的图像, 旋转角分别为 0°, 45° 及 90°, 红色方框内为对应框放大图; (d) 所有图像叠加效果; 图像中圆的直径为 35 mm

Fig. 5. (color online) Experiments of sample: (a)—(c) The images with different rotation angles that are 0°, 45° and 90°; (d) the superposition of 17 images; the diameter of the circle in image is 35 mm.

光源只具有一维方向上的空间相干性, 单个图像仅能保留一个方向空间频率, 图 5 (a)—(c) 图像只能分辨出垂直方向附近的金属线, 而难以看清其他方向物体的细节, 从方框中局部放大图中可以清

楚地看到这一点. 图 5 (d) 为叠加图, 相比原图像, 可以更清楚地看到各个方向上金属线.

4.3 对比实验

为了对比不同光源的成像效果, 图 6 给出相同成像距离的成像结果, 管电压均为 40 kV. 为了视觉效果, 图 6 (e) 调整了图像对比度. 图 6 (a) 为普通 X 射线管成像, 管电流为 5 mA, 成像时间为 80 ms, 焦斑大小约为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$; 图 6 (b) 和图 5 (d) 为同一图像; 图 6 (c) 为微焦斑源 (HAMAMATSU PHOTONICS, L9421-02, $7 \mu\text{m}$ 焦斑直径) 成像, 管电流为 $100 \mu\text{A}$, 图像获取时间为 1 s. 从分辨率来看, 图 6 (c) 和图 6 (e) 都能分辨大部分芯片内部的金属线, 而图 6 (a) 完全不能分辨内部的金属线. 从图 7 (a) 可以更清楚看到金属线引起的强度变化, 普通光源曲线非常平坦, 曲线对比度 (定义为 $V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}$) 为 3.6%, 不能反映此处的金属线; 此处线源的曲线变化明显, 曲线对比度为 22%; 微焦斑源曲线变化也很明显, 但曲线对比度只有 8%,

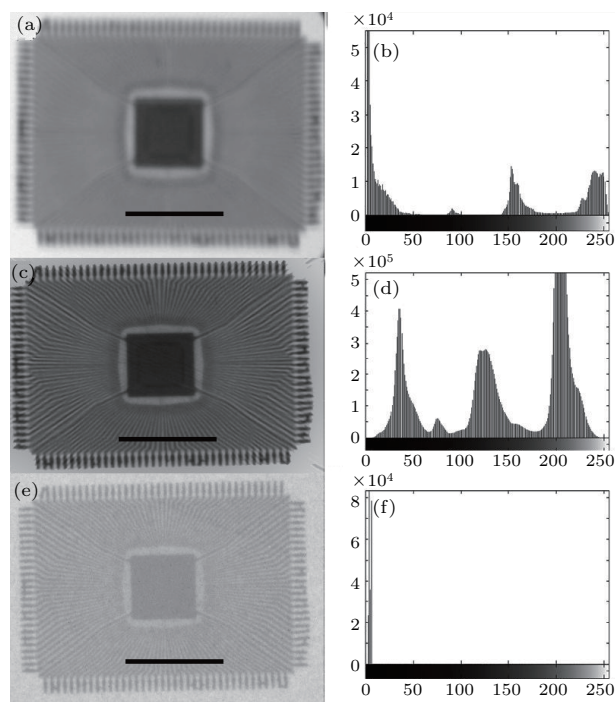


图6 不同光源对比实验 (a) 普通 X 射线管成像; (c) 线源成像; (e) 微焦斑源成像; (b), (d) 及 (f) 对应 (a), (c) 及 (e) 图的原始图像直方图

Fig. 6. The comparing of experiments with different X-ray sources. Radiographic images with (a) traditional X-ray tube, (c) line source, (e) microfocus source. Panels (b), (d) and (f) are the histograms of raw datum corresponding to (a), (c) and (e).

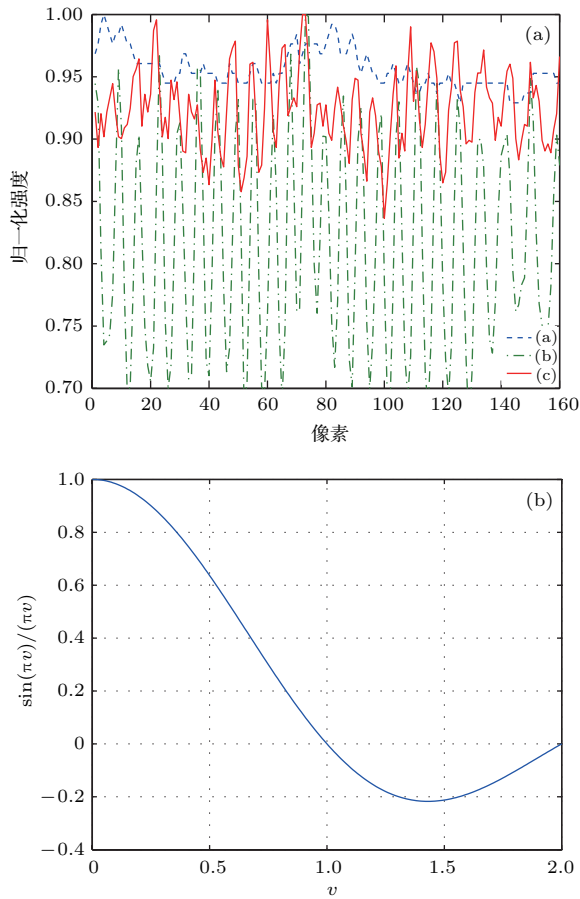


图7 (网刊彩色) (a) 图6黑线处曲线, 曲线(a)–(c)分别对应图6(a), (c)和(e); (b)空间传递函数 $H(u)$
 Fig. 7. (color online) (a) The profiles of the black bars in Fig. 6(a), (c) and (e) corresponding with legend (a)–(c); (b) the spatial transfer function $H(u)$.

同时曲线上毛刺较多, 说明噪声较大. 可以从(4)式对这一现象做详细的量化分析. 为简化, 假设普通X射线管和微焦斑源焦斑形状都为方形, 线状源焦斑为矩形; 成像距离比 $R/l = 1$, 则针孔处于物体中心时, 光源在探测面处投影和源焦斑实际大小完全一致, 所以成像系统空间传递函数 $H(u, v)$ 为焦斑形状的傅里叶变换; 对于普通焦斑源和微焦斑源, 两个边相同, 只分析一个边传递函数(也是最高分辨率的一个方向), 线状源由于旋转叠加, 最终分辨率由矩形短边决定, 三种光源都有相同的强度分布函数 $\text{rect}(x/a)\text{rect}(y/b)$ (a, b 为边长), 只是边长不同, 只考虑 y 方向, 空间传递函数 $H(v) = \sin(b\pi v)/(b\pi v)$, 图7(b)为 $\sin(\pi v)/(\pi v)$ 函数图(v 为物体空间频率). 从图7(b)可以得到, 物体尺度同光源尺度相同时, 传递函数为0, 即光源极限空间传递频率. 对普通光源, 焦斑为0.5 mm, 芯片外部引脚尺寸为0.6 mm, 内部引线在0.1–0.5 mm, 图6(a)仅能分辨外部引脚, 无法分

辨内部引线; 线源窄边设计为0.1 mm, 极限分辨率为0.1 mm, 中心区域引线线宽在0.1 mm下不能分辨; 微焦斑源半径只有7 μm , 系统只受探测器分辨率限制, 所以中心区域引线线宽在0.0748 mm下不能分辨.

尽管微焦斑源有很高的分辨率, 但图6(e)直观感觉图像质量“不好”, 其原始全图像对比度仅为30%, 而图6(a)和图6(c)的对比度达到了95%和98%. 从图像直方图可以非常明显地看到图像数据的分布差异, 图6(a)和图6(c)各个灰度值均有分布, 而6(e)灰度集中在2个灰度值上, 物体区分度很低, 其原因在于探测器在不同光源下收集的光子数有差别. 微焦斑光源管电流只要0.1 mA, 尽管曝光时间较长(1 s), 但在管电流同时间的乘积上(0.1 mA \times 1 s)仍然小于普通光源(5 mA \times 0.08 s)及线状光源(1 mA \times 0.85 s), 导致对比度差.

5 讨论与结论

在(2)式中, $I_1(x, y)$ 是光源为理想点源物体成像图, 如同轴相衬成像; 或当物体靠探测器较近时, 为普通吸收成像. 但 $I_1(x, y)$ 为其他技术形成的图像时, 方程(2)并不改变, 则该图像重构技术仍然适用. 例如, 当线源用于基于光栅的微分相衬成像时, 让线源平行于光栅线方向, 在一个角度下利用相移的方法恢复物体相位分布, 再旋转物体, 利用相移恢复相位, 重复得到多个角度的相位分布, 最后叠加, 则得到多角度高分辨率相位分布. 但利用旋转的办法无疑带来另外一个限制, 即对旋转精度机械稳定性的要求. 旋转台不可避免地存在轴的摆动, 导致旋转中心的移动, 从而引起图像叠加的误差; 在实际成像中采用物体旋转的方法, 叠加时以相同的角度反方向旋转图像, 图像旋转中采用的插值方法也会引起图像叠加的误差. 在实验中, 采用如下的方法减小上述引起的误差: 1) 每幅图像重新寻找旋转轴, 旋转台中心是一个圆孔, 圆孔圆心为旋转中心, 图5中可以看到该圆孔的成像, 每一幅图, 重新找到圆的中心, 减小轴中心摆动误差, 实验中, 轴的中心摆动有0–5像素的摆动; 2) 图像旋转的数字处理是不可避免的, 主要是采用合适的插值方法, 本文采用三次样条插值.

本文给出一种线状焦斑的X射线源, 用于解决普通X射线源不能同时具备高亮度、高空间分辨率的矛盾; 同时, 提出一种旋转叠加的方法用于重构高分辨率图像. 实验中, 用旋转物体的方法替代旋

转光源, 这样叠加时需要反方向旋转图像, 无疑会影响图像质量, 所以采用旋转光源的方法时, 无需旋转物体, 也无需反方向旋转图像, 更有利于实际应用. 同普通光源相比, 线源能提供更高分辨率的图像, 相同条件下, 本文所设计的线焦斑源将普通的源分辨率从0.5 mm提高到0.1 mm, 如果优化聚焦系统, 焦斑可降低到50 μm ; 同微焦斑光源相比, 线源能提供更高的亮度和更快的成像速度. 此种光源在X射线显微领域, 有望解决光源相干性和亮度的矛盾, 获得更广泛的应用.

参考文献

- [1] Huang J H, Du Y, Lei Y H, Liu X, Guo J C, Niu H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 168702 (in Chinese) [黄建衡, 杜杨, 雷耀虎, 刘鑫, 郭金川, 牛憨笨 2014 物理学报 **63** 168702]
- [2] Zhang X D, Xia C J, Xiao X H, Wang Y J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044501
- [3] Han Y, Li L, Yan B, Xi X Q, Hu G N 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 058704 (in Chinese) [韩玉, 李磊, 闫镇, 席晓琦, 胡国恩 2015 物理学报 **64** 058704]
- [4] Gureyev T E, Wilkins S W 1998 *J. Opt. Soc. Am. A* **15** 579
- [5] Gureyev T E, Nesterets Y I, Stevenson A W, Miller P R, Pogany A, Wilkins S W 2008 *Opt. Express* **16** 322
- [6] Pogany A, Gao D, Wilkins S W 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 2774
- [7] Nesterets Y I, Wilkins S W, Gureyev T E, Pogany A, Stevenson A W 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 093706
- [8] Paganin D, Mayo S C, Gureyev T E, Miller P R, Wilkins S W 2002 *J. Microscopy* **206** 33
- [9] Wilkins S W, Gureyev T E, Gao D, Pogany A, Stevenson A W 1996 *Nature* **384** 335
- [10] Momose A, Kawamoto S, Koyama I, Hamaishi Y, Takai K, Suzuki Y 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** L866
- [11] Weitkamp T, Diaz A, David C, Pfeiffer F, Stampanoni M, Cloetens P, Ziegler E 2005 *Opt. Express* **13** 6296
- [12] Zhu P P, Zhang K, Wang Z L, Liu Y J, Liu X S, Wu Z Y, McDonald S A, Maronec F, Stampanoni F 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **107** 13576
- [13] Berujon S, Ziegler E, Cerbino R, Peverini L 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 158102
- [14] Zanette I, Zdorab M C, Zhou T H, Burvall A, Larsson D H, Thibault P, Hertz M H, Pfeiffer F 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **112** 12569
- [15] Munro P R, Ignatyev K, Speller R D, Olivo A 2012 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109** 13922
- [16] Chapman D, Thomlinson W, Johnston R E, Washburn D, Pisano E, Gmür N, Zhong Z, Menk R H, Arfelli F, Sayers D 1997 *Phys. Med. Biol.* **42** 2015
- [17] Toth R, Kieffer J C, Fourmaux S, Ozaki T, Krol A 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 083701
- [18] Mayo S C, Stevenson A W, Wilkins S W 2012 *Materials* **5** 937
- [19] Gureyev T E, Mayo S C, Wilkins S, Paganin D M, Stevenson A W 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5827
- [20] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics* (Oxford: Cambridge University Press) p459
- [21] Liu X 2007 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [刘鑫 2007 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]

Line focal X-ray source imaging*

Wang Yan^{1)2)#} Liu Xin^{3)#} Huang Wan-Xia¹⁾ Yi Ming-Hao³⁾
 Guo Jin-Chuan^{3)†} Zhu Pei-Ping^{1)‡}

1) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

(Received 1 June 2016; revised manuscript received 7 July 2016)

Abstract

High spatial coherent and bright X-ray beam is necessary condition for acquiring high quality radiography image. However, traditional X-ray tube can only provide high flux X-ray light or high spatial coherent light. In general, X-ray photons are generated by using energetic electrons with several tens or even hundreds keV to hit a target. Unfortunately, over 99% electron energy are converted into heat rather than the energy of X-ray photons. Thus, the heat dissipation of the target restricts the emission power and radiation flux. Increasing the emission area of X-ray can relieve the heat dissipation, but it would bring another serious problem—low spatial coherence that is in inverse proportion to emission area or focal spot. In order to solve the conflict between brightness and spatial coherence, an X-ray source with one-dimensional coherence is proposed in this work. The new X-ray source has a special focal spot where one side is small enough to ensure the spatial coherence and the perpendicular side is big enough to provide sufficient X-ray flux. In the direction of long side, the long size of focal spot will result in losing the image details. Consequently, an algorithm of superposition and rotation, in which many images with different rotation angles are added together, is proposed to retrieve the lost information. On the other hand, the spatial transfer function of superposition is analyzed in the frequency domain, and the result shows that the method of superposition can transfer more components of frequency than single image. Based on a traditional X-ray tube, a line focal spot source is designed and fabricated. Two series of experiments are performed for different destinations. After 17 images of a chip with different rotation angles and the line focal spot are collected, those images are rotated in the reverse direction and added together. The image of superposition clearly presents some details which are invisible in one of 17 images. At the same tube voltage and for the same object, some comparative experiments with micro-focus source, line focal spot source and normal focal spot source are presented. Compared with traditional X-ray tube, line focal spot source can provide high-resolution image. In the aspect of image visibility, the new source has definite advantages compared with micro-focus source, despite no improvement in imaging resolution. Finally, the reason for the difference in imaging resolution is discussed from the aspects of spatial coherence and light flux.

Keywords: X-ray, X-ray imaging, image reconstruction

PACS: 95.85.Nv, 87.59.-e, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.65.219501

* Project supported by the Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y4545320Y2), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11535015, 61571305, 61101175, 11375225), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB825804).

† Corresponding author. E-mail: jcguo@szu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhupp@ihep.ac.cn