

X 射线相衬成像光子筛<sup>\*</sup>程冠晓<sup>†</sup> 胡超

(中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055)

(香港中文大学电子工程系, 香港)

(2010年9月16日收到; 2011年4月18日收到修改稿)

基于 Zernike 相衬成像原理和光瞳切趾原理, 提出一种将相位板和切趾光子筛集成为一个相衬显微物镜的 X 射线相衬成像光子筛的设计方法. 这种 X 射线相衬成像物镜可以实现生物体组织或者其他弱吸收材料的高分辨率和高衬度成像. 通过优化光子筛透镜的衍射结构, 可以抑制成像系统的点扩展函数的旁瓣和消除高阶衍射焦点, 从而提高成像分辨率; 另外, 将光子筛透镜和变相板合为一体, 克服了成像透镜和变相板难以对准的缺陷. 以高斯切趾光子筛为例, 实验验证了设计方法的可行性.

**关键词:** X 射线显微技术, 相衬成像, 光瞳切趾, 光子筛

**PACS:** 07. 85. Tt, 42. 79. Dj, 42. 25. Fx, 42. 15. Eq

## 1. 引言

X 射线具有强大的穿透物体的能力; 而且由瑞利分辨率判据可知, 照明波长越短则最短分辨距离越小, 采用 X 射线照明的显微成像系统的最短分辨距离可小于 0.1 nm. 因而, 自 1895 年伦琴发现 X 射线至今, X 射线成像技术已经广泛地应用于临床医学、科学研究和工业技术领域中物体内部结构的无损检测. 由于图像上不同区域间存在明暗程度的差别(即衬度), 才使得我们能观察到清晰的图像细节. X 射线显微镜所获得的图像衬度, 通常依赖于被测物体对 X 射线光子辐射的能量吸收或者相位调制. 前者称为吸收衬度成像, 而后者称为相位衬度成像. 吸收衬度与辐射的光子能量的三次方成反比, 与原子序数的四次方成正比. 因而, 吸收衬度成像适用于低能量辐射和高原子序数物质结构的情形, 但不适用于低原子序数物质或者弱吸收材料的结构探测.

20 世纪 90 年代中期开始发展起来的 X 射线相衬成像技术<sup>[1]</sup>, 利用材料结构的相移特性产生图像衬度, 具有曝光时间短、可实现低原子序数物质或

者弱吸收物质内部微细结构的无损探测的优点, 是 X 射线应用领域的一个研究热点. 国内外的许多大型科研机构 and 高端医疗器械公司, 均在竞相研发 X 射线相衬显微成像技术<sup>[2-11]</sup>. 现已实际应用的一种 X 射线波带片 Zernike 相衬显微成像技术, 用波带片聚焦 X 射线辐射, 用位于波带片焦面上的变相环给物体的相位结构引起的衍射光施加一个适度的相移, 使得这束经过附加相移的衍射光和物体的直接透射光被波带片会聚后在像面干涉成像, 从而将物体的相位信息转换为相应的光强信息而提高弱吸收物体的可分辨性. 然而, 当前的微纳量级实验技术水平难以确保 X 射线波带片和位于其焦面上的相衬环精确对准, 而且波带片的突变孔径和中心对称环带结构会引起像面“振铃效应”和光轴向的高阶衍射, 物体的衍射光能量比直接透射光能量小很多. 因此, 像面上最终得到的干涉图像的对比度不够好. 这种 X 射线波带片相衬显微成像技术有待进一步完善.

基于 Zernike 相衬成像原理和光瞳切趾原理, 本文提出一种用于弱吸收材料内部微细结构无损探测的 X 射线相衬成像光子筛的设计方法. 它将光子筛透镜<sup>[12,13]</sup>和变相板集成为一个复合衍射透镜, 不

<sup>\*</sup> 广东省机器人与智能系统重点实验室基金(批准号: 2009A060800016)、广东省与中国科学院全面战略合作计划(批准号: 2009B091300160)、国家自然科学基金(批准号: 60904031)、深圳市基础研究计划(批准号: 2009-203)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KGCX2-YW-166)和教育部留学回国人员科研启动基金(批准号: 2008-890)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: guanxiaocheng@yahoo.cn

仅能够抑制衍射旁瓣和高阶衍射焦点而提高成像分辨率,而且解决了成像透镜和变相板精确对准的难题,能够提高成像衬度.

## 2. 成像原理

X 射线相衬成像光子筛由彼此紧贴的光子筛和变相板构成,如图 1 所示. 利用紧贴光子筛透镜的变相板给物体的直接透射光施加一个适度的相移,使得这束经过附加相移后的直接透射光和物体的相位结构引起的衍射光被光子筛会聚在像面干涉成像.

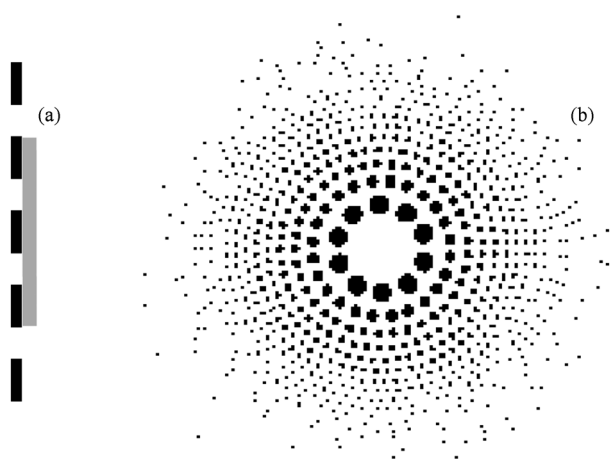


图 1 光子筛相衬显微物镜结构示意图 黑色和灰色分别表示光子筛和变相板. (a) 侧视图, (b) 正视图

X 射线相衬成像光子筛的光瞳函数  $P(r)_{\text{ZAPS}}$  可表示为

$$P(r)_{\text{ZAPS}} = P(r)_{\text{PS}} W(r) F(r), \quad (1)$$

式中  $P(r)_{\text{PS}}$  为未切趾的光子筛光瞳,  $W(r)$  为切趾函数,  $F(r)$  为 Zernike 相位滤波函数. 对于环形照明, Zernike 相位滤波函数可表示为

$$F(r) = \exp(\pm j\pi/2) \quad (r_{\text{in}} \leq r \leq r_{\text{out}}), \quad (2)$$

式中  $r_{\text{in}}, r_{\text{out}}$  分别为相衬环的内外半径. 考虑一种近轴照明 ( $0 \leq r \leq r_{\text{out}}$ ) 的特例, 这对应于圆形相衬板位于切趾光子筛光瞳面中心区域, 给透射光零级频谱分量 (即直接透射光) 附加  $\pm \pi/2$  相移的情形. 相衬成像原理如图 2 所示, 通过 X 射线相衬成像光子筛物镜 (由切趾光子筛和变相板构成) 的空间滤波将物体的相位信息转换为相应的强度信息, 从而提高

透明物体或弱吸收物体的可分辨性. 单色相干 X 射线照明被测物体, 利用紧贴在光子筛透镜表面的一个变相板给物体的直接透射光附加一个适度的相移. 这束经过移相的直接透射光和物体相位结构引起的衍射光被光子筛物镜会聚并在像面上干涉, 干涉图像的强度与物体引起的相移呈线性关系, 从而使得表征被测物体结构的相位特性或折射率特性以图像衬度的方式在像面上记录下来.

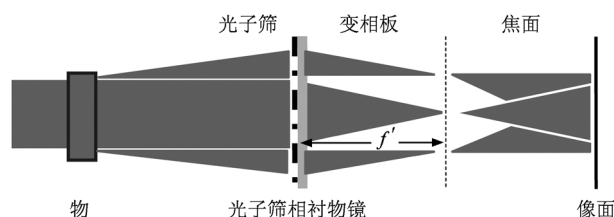


图 2 光子筛相衬显微成像原理示意图

下面介绍 X 射线相衬成像光子筛的成像理论. 为了数学上的简便, 假定透明物体或弱吸收物体引起的相移变化  $\phi \ll 2\pi$ , 并忽略系统光瞳的有限大小. 那么, 透明物体的复振幅透射率可表示为

$$t(x, y) = \exp[j\phi(x, y)] \approx 1 + j\phi(x, y). \quad (3)$$

(3) 式右边第一项表示通过物体经历均匀相移的较强的零级频谱光, 第二项表示物体的相位结构引起的较弱的离轴衍射光. 用普通显微镜在像面上观察不到透明物体或者弱吸收物体的像, 其主要原因是因为相位结构产生的衍射光与很强的被聚焦的零级频谱光之间存在相位差  $\pi/2$ .

若利用 X 射线相衬成像光子筛把透明物体或者弱吸收物体的相位分布转变为可观测的像的光强度衬度分布, 则可得到该被测物体的高分辨率和高衬度的显微图像. 把物体置于光子筛透镜的物平面上, 光子筛透镜的透射场复振幅分布为

$$T(f_x, f_y) = \text{FT}[t(x, y)] = \delta(f_x, f_y) + j\Phi(f_x, f_y). \quad (4)$$

这里

$$\Phi(f_x, f_y) = \text{FT}[\phi(x, y)],$$

其中  $\text{FT}[\cdot]$  为 Fourier 变换算符. 在紧贴光子筛透镜的表面上放置一块变相板作空间滤波, 它只对零级频谱起作用, 衰减系数为  $\alpha$ , 相位延迟为  $\pm \pi/2$ , 可得到参与成像的频谱为

$$T_{\text{F}}(f_x, f_y) = j[\pm \alpha \delta(f_x, f_y) + \Phi(f_x, f_y)]. \quad (5)$$

为了讨论方便,假定成像系统的放大率为 1,则像面上的强度分布为

$$I(x,y) = \text{FT}^{-1}[T_F(f_x, f_y)]^2 \approx \alpha^2 \pm 2\alpha\phi(x,y), \quad (6)$$

式中  $\text{FT}^{-1}[\cdot]$  为 Fourier 逆变换算符. (6) 式表明像的强度分布与物体的相位分布呈线性关系.

定义像的衬度

$$C = [I(x,y) - I_b]/I_b,$$

其中  $I_b$  表示背景强度. 可得

$$C = \pm 2\phi(x,y)/\alpha. \quad (7)$$

(7) 式表明物体的相位分布转变成了像的衬度分布,选取较小的  $\alpha$  值可以提高像的衬度. (7) 式中的正号表示正相衬,负号表示负相衬;正负号的选取决定于零级频谱的相移是  $\pi/2$  或  $-\pi/2$ .

### 3. 设计方法

X 射线相衬光子筛物镜是利用光刻方法在同一基底的两面分别蚀刻而得到切趾光子筛透镜和变相板. 通过设定的电子束光刻程序在两面镀 Au 膜的石英基底上曝光,一面形成由众多针孔构成的切趾光子筛透镜,另一面得到变相板. 这样能够实现切趾光子筛透镜和变相板的精确稳定对准. 光子筛相衬物镜的设计制作方法如图 3 所示. 首先,把光子筛(各个孔心坐标和孔半径)和变相板的数据保存成 TXT 格式文件,计算机把这些数据转换成 CIF 格式输入光刻机的控制系统. 然后,光刻机基于这些数据,对石英基片双面上的 Au 膜进行扫描式逐点曝光光刻. 最后,在石英基片表面形成光子筛相衬物镜的浮雕结构.

X 射线相衬成像光子筛设计的核心问题是光子筛透镜. 当衍射光学元件具有突变的光瞳和对称的衍射结构分布时,其衍射光场会产生很高的旁瓣和高阶衍射级次,例如传统的 Fresnel 波带片. 为了提高光学成像系统的空间分辨率,可以采用渐变透射比光瞳的方法(即切趾法)抑制衍射像的旁瓣<sup>[14-33]</sup>. 相干成像系统以高斯切趾光瞳居多,诸如激光照明情形. 高斯切趾的优点如下:仅通过调节一个切趾参数就能抑制 Airy 斑的旁瓣而改善成像空间分辨率,尽管略有主瓣展宽和能量损失现象;亦能减小由加工公差和对准精度而产生的像差对成像质量的影响. 本文提出一种基于光瞳切趾原理的 X 射线光子筛衍射透镜的设计方法. 光子筛的准随机分布的透光孔形成了一个“渐变”光瞳,可以有效地抑制旁瓣和高阶衍射,增强成像分辨率和对比度. 这是一种分布于 X 射线吸收材料膜层(原子吸收系数大的重金属材料,如 Au, W, Ta, Pt)上的多孔衍射结构,用优化设计的准随机分布的透光孔取代传统的 Fresnel 波带片的透光环带而控制波前传播,从而实现所需的光学功能. 用光学系统成像性能评价函数的术语表述,就是通过改变光子筛光瞳的复振幅透射比,从而改变系统的点扩展函数以改善系统的成像质量. 点扩展函数的主瓣宽度决定了成像分辨率,而旁瓣峰值有可能湮没信号分量中的较小成分. 因此,希望光子筛的点扩展函数的主瓣尽量窄,旁瓣峰值尽量小,使能量主要集中在主瓣内. 光子筛的点扩展函数的优化指标是主瓣宽度(即半高全宽,归一化主瓣的幅度下降到 -3 dB 时的宽度)和旁瓣衰减(即最高旁瓣峰值与主瓣峰值的差值).

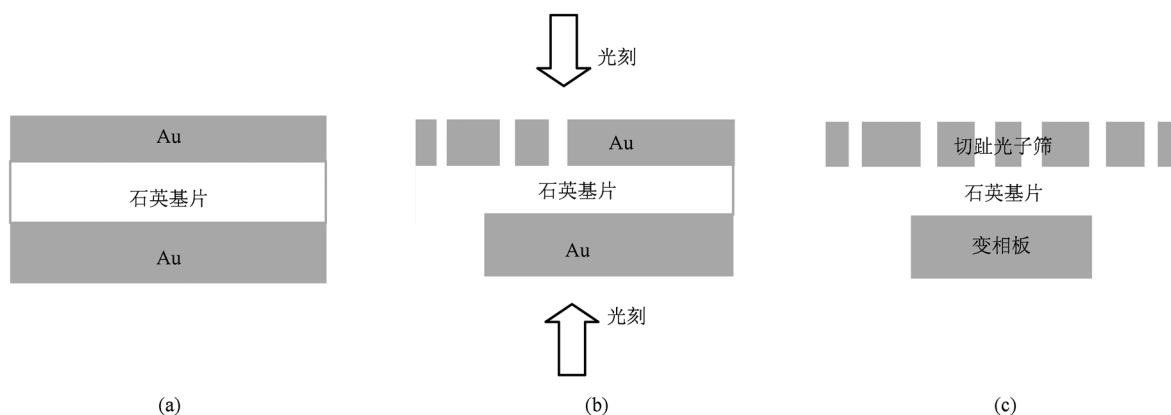


图 3 光子筛相衬成像物镜的设计制作 (a) 双面镀 Au 的石英基片, (b) 双面光刻曝光, (c) 光子筛相衬物镜结构的侧面剖视图

令(1)式中的光子筛光瞳切趾函数(即振幅透射比或针孔分布密度)沿径向呈高斯分布,即

$$W(r) = \exp(-0.5r^2/\sigma^2), \quad (8)$$

式中  $r$  为相应的 Fresnel 环带中心半径,  $\sigma$  为切趾参数. 高斯切趾仅通过调节一个切趾参数  $\sigma$  的大小, 就能便利地控制光瞳面的针孔密度, 从而实现像面光场强度的优化分布.

我们利用快速 Fourier 变换方法数值求解了具

有相同数值孔径的两个光子筛和一个波带片的强度点扩展函数, 这三个器件的切趾参数  $\sigma$  分别为 0.5, 2,  $\infty$ ; 光子筛和波带片的旁瓣衰减分别为 -32.8, -14.0, -13.2 dB; 主瓣宽度分别为 0.07, 0.05, 0.05. 从图 4 可以看到: 切趾参数越小, 则振幅透射比窗口越窄, 旁瓣抑制效果越显著; 另外, 高斯切趾抑制旁瓣的代价是轻微的主瓣展宽.

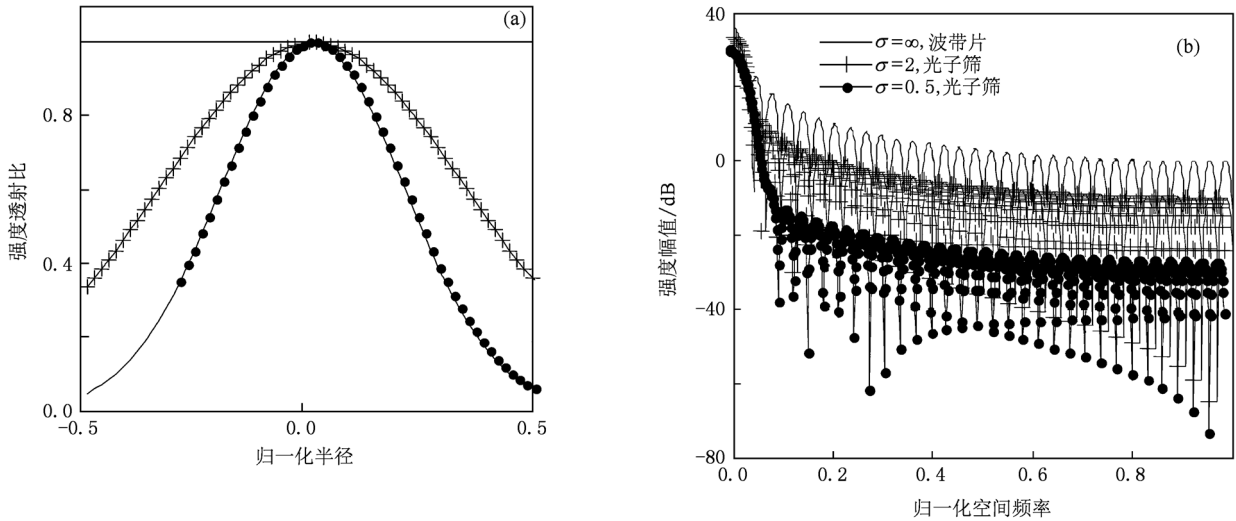


图 4 X 射线光子筛和波带片的光瞳函数和点扩展函数 (a) 光瞳函数, (b) 点扩展函数

给出 X 射线光子筛的设计参数如下: X 射线波长为 0.5 nm、焦距为 20 mm、入瞳直径为 2 mm、数值孔径(NA)为 0.05, 求解其衍射结构. 具体的计算结果如下: 光子筛的成像分辨率  $\delta \approx 6.1$  nm; 最小衍射结构特征尺寸  $d_{\min} \approx 7.5$  nm, 筛孔总数  $N_{\text{hole}} = 14215227$ , 针孔直径与相应的环带宽度之比  $K = 1.5$ . 计算机仿真了该光子筛前 479 个衍射结构的位置分布、光瞳振幅透射比和点扩展函数, 结果如图 5 所示. 由于高斯切趾, X 射线相衬成像光子筛的振幅透射比约为 15%—30%, 而振幅型波带片的振幅透射比可达 50%. 衍射效率近似地与透光区面积成正比, 因此 X 射线相衬成像光子筛的一级衍射效率仅为相同 NA 波带片的 10%. 不过, 对于使用同步辐射光源产生的高亮度 X 射线照明的情形, 衍射效率已不是最重要的问题, 衍射旁瓣抑制和器件加工的可行性是更为关注的问题. 此时, X 射线相衬成像光子筛是一种新颖的有望替代传统波带片作为 X 射线相衬成像关键器件的衍射光学器件. 目前微纳器件加工技术水平可以实现的加工公差能够保证器件的 Strehl 比不小于 0.8<sup>[34]</sup>, 对准精度已

达 2 nm<sup>[35,36]</sup>, 这足以将最小特征尺寸为 7.5 nm 的针孔精确地刻蚀在相应的 5 nm 宽的波带片几何环带上.

#### 4. 实验验证

为了检验光子筛光瞳切趾法抑制旁瓣的可行性, 我们采用激光直写光刻技术在镀铬的石英基片上制作了一种高斯切趾光子筛(照明波长为 632.8 nm, NA 为 0.086, 通光口径为 30 mm,  $K = 1.5$ ). 图 6 显示了高斯切趾光子筛中心和边缘区域针孔的分布情形, 针孔直径与相应的 Fresnel 环带宽度之比  $K = 1.5$ .

我们搭建了光子筛的分辨率测试系统. 如图 7 所示, 波长为 632.8 nm 的激光透过一块毛玻璃板和分辨率板, 再经平行光管扩束准直后正入射到光子筛透镜, 在像面上形成的分辨率板的像被显微物镜放大后, 由电荷耦合器件采集并送入计算机数据处理系统. 由鉴别率表直接查出刚能分辨的单元号所对应的每毫米线对数  $N_0$ , 即可求出被测光子筛透镜像面轴上点的分辨率

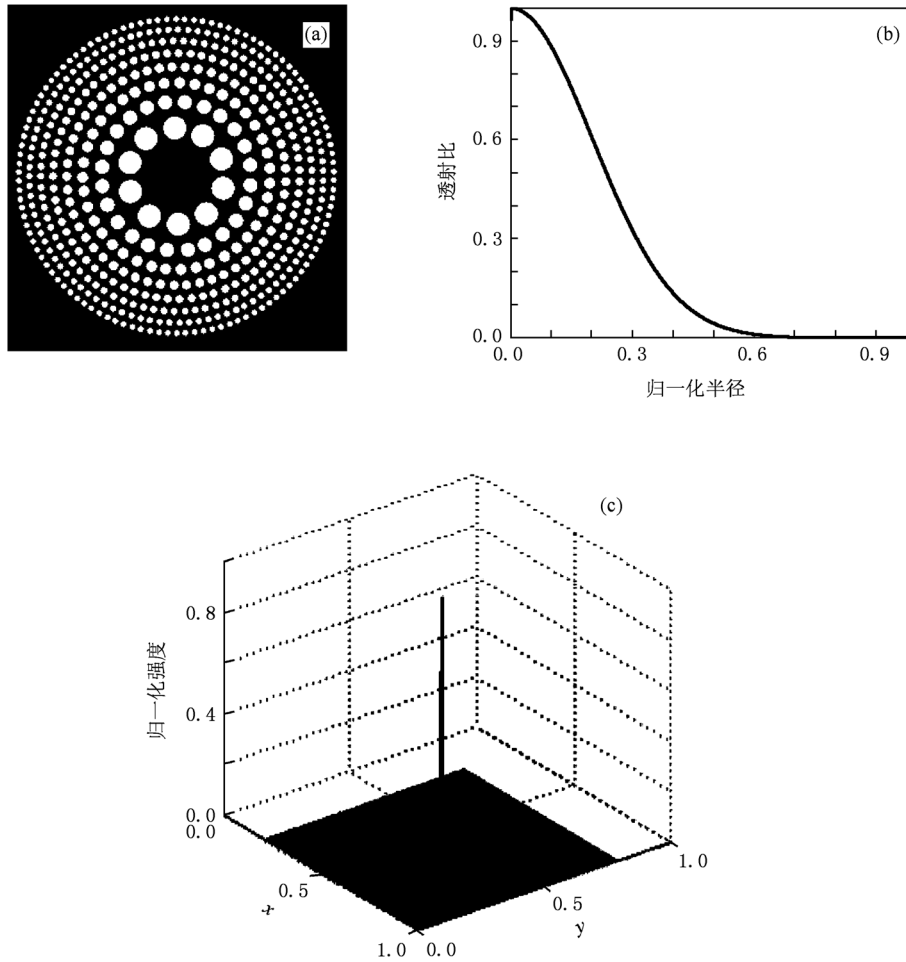


图5 X射线光子筛的计算机仿真设计结果  $\lambda = 0.5 \text{ nm}$ ,  $D = 2 \text{ mm}$ ,  $NA$  为 0.05. (a) 前 479 个衍射结构分布, (b) 光瞳振幅透射比, (c) 点扩展函数

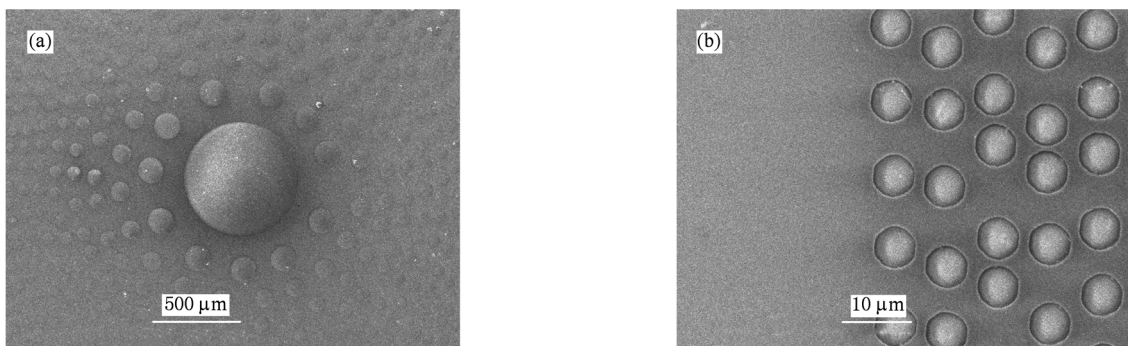


图6 高斯切趾光子筛的扫描电子显微镜像  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $NA$  为 0.086,  $K = 1.5$ . (a) 光子筛中心区域, (b) 光子筛边缘区域

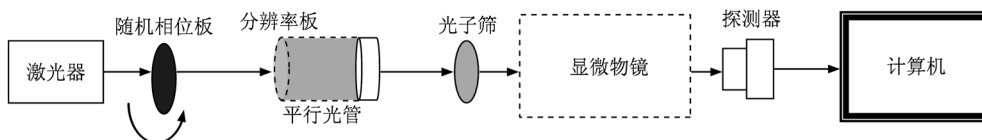


图7 光子筛分辨率测量系统框图

$$N = N_0 f'_c / f', \quad (9)$$

式中  $f'_c$  为平行光管的焦距,  $f'$  为被测光子筛物镜的焦距.

经过标定的平行光管焦距为 551.55 mm, 实验测量的光子筛焦距为 181.29 mm. 图 8 是利用随机相位板消相干方法抑制激光散斑后得到的光子筛的分辨率测试图像, 可以看到第 18 个单元, 因而  $N_0 = 33.4$ . 根据(9)式可得, 光子筛的实际能分辨的最小线宽为  $4.8 \mu\text{m}$ , 测量值与理论设计值 ( $4.5 \mu\text{m}$ ) 的相对偏差为 5.8%. 高斯切趾光子筛显著地抑制了衍射旁瓣和高阶衍射, 实验结果与理论预测符合较好.

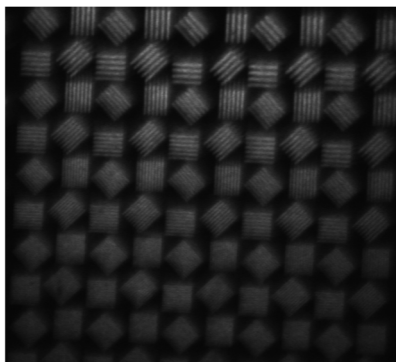


图 8 分辨率测量结果

## 5. 结 论

根据实际成像需求, 虽然有诸多切趾窗口可选, 但是切趾光子筛设计的基本思想是普适的. 高斯切趾光子筛设计方法的优点是只需简单地调节一个高斯窗口切趾参数, 就能控制光子筛的点扩展函数的旁瓣衰减和主瓣宽度, 从而实现光子筛成像性能的最优化. 光子筛设计的基本思想是通过调节光瞳复振幅透射比而控制光子筛的点扩展函数以实现光子筛成像性能的最优化. 换言之, 就是通过优化光子筛透光孔的数目、孔径大小和孔心位置分布而构造优化的光瞳, 有效地抑制光轴方向的高级衍射焦点和像面上的旁瓣强度或者压缩主瓣宽度, 改善成像分辨率. 本文提出的 X 射线相衬成像光子筛是一种将相位板和切趾光子筛集成为一体的复合衍射物镜, 具有高成像衬度、高成像分辨率的成像特性和使用维护简便的优点. 利用同步辐射光源的高辐射通量、高相干和准单色性的优势, X 射线相衬成像光子筛作为一种新颖的相衬成像关键光学器件, 在生物活体软组织这类弱吸收材料的医学成像诊断及低原子序数材料的低剂量、无损、高分辨、动态、三维成像研究领域有广阔的应用前景, 对深入利用我国同步辐射光源造福社会具有重要意义.

- [1] Davis T J, Gao D, Gureyev T E, Stevenson A W, Wilkins S W 1995 *Nature* **373** 595
- [2] Di Fabrizio E, Cojoc D, Cabrini S, Kaulich B, Susini J, Facci P, Wilhein T 2003 *Opt. Express* **11** 2278
- [3] Chen M, Xiao T Q, Luo Y Y, Liu L X, Wei X, Du G H, Xu H J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2953 (in Chinese) [陈敏、肖体乔、骆玉宇、刘丽想、魏逊、杜国浩、徐洪杰 2004 物理学报 **53** 2953]
- [4] Chao W L, Harteneck B D, Liddle J A, Anderson E H, Attwood D T 2005 *Nature* **435** 1210
- [5] Chen J W, Gao H Y, Li R X, Gan H J, Zhu H F, Xie H L, Xu Z Z 2005 *Prog. Phys.* **25** 175 (in Chinese) [陈建文、高鸿奕、李儒新、干慧菁、朱化凤、谢红兰、徐至展 2005 物理学进展 **25** 175]
- [6] Chang C, Sakdinawat A, Fischer P, Anderson E, Attwood D 2006 *Opt. Lett.* **31** 1564
- [7] Shu H, Zhu P P, Wang J Y, Gao X, Yin H X, Liu B, Yuan Q X, Huang W X, Luo S Q, Gao X L, Wu Z Y, Fang S X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1099 (in Chinese) [舒航、朱佩平、王寓越、高欣、伊红霞、刘波、袁清习、黄万霞、罗述谦、高秀来、吴自玉、方守贤 2006 物理学报 **55** 1099]
- [8] Sakdinawat A, Liu Y W 2007 *Opt. Lett.* **32** 2635
- [9] Sakdinawat A, Liu Y W 2008 *Opt. Express* **16** 1559
- [10] Wang Y, Chen J B, Zhang X L, Huang Y 2008 *Laser Optoelectron. Prog.* **45** 41 (in Chinese) [王燕、陈家璧、张学龙、黄勇 2008 激光与光电子学进展 **45** 41]
- [11] Wang K G, Wang L, Niu H B 2008 *J. Appl. Opt.* **29** 183 (in Chinese) [王凯歌、王雷、牛憨笨 2008 应用光学 **29** 183]
- [12] Kipp L, Skibowski M, Johnson R L, Berndt R, Adlung R, Harm S, Seemann R 2001 *Nature* **414** 184
- [13] Cheng G X, Xing T W, Lin W M, Zhou J M, Qiu C K, Liao Z J, Ma J L 2006 *Chin. J. Sens. Actuat.* **19** 2344 (in Chinese) [程冠晓、邢廷文、林妩媚、周金梅、邱传凯、廖志杰、马建玲 2006 传感技术学报 **19** 2344]
- [14] Mills J P, Thompson B J 1986 *J. Opt. Soc. Am.* **A 3** 694
- [15] Mills J P, Thompson B J 1986 *J. Opt. Soc. Am.* **A 3** 704
- [16] Allred D B, Mills J P 1989 *Appl. Opt.* **28** 673
- [17] Wang H F, Gan F X 2001 *Appl. Opt.* **40** 5658

- [18] Li L Y, Li C C, Li Y Z, Dai Y P, Xie H, Zhu J Q 2001 *Chin. J. Lasers* **28** 447 (in Chinese) [李良钰、李常春、李银柱、戴亚平、谢虎、朱健强 2001 中国激光 **28** 447]
- [19] Liu W P, Du G, Huang J K, Zhong Y L, Yi Q M, Liao C J, Liu S H 2001 *Laser Infrar.* **31** 180 (in Chinese) [刘伟平、杜戈、黄君凯、钟雨乐、易清明、廖常俊、刘颂豪 2001 激光与红外 **31** 180]
- [20] Andersen G 2005 *Opt. Lett.* **30** 2976
- [21] Menon R, Gil D, Barbastathis G, Smith H 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 342
- [22] Cao Q, Jahns J 2006 *J. Opt. Soc. Am. A* **23** 179
- [23] Giménez F, Monsoriu J A, Furlan W D, Pons A 2006 *Opt. Express* **14** 11958
- [24] Gao Z, Luo X G, Ma J X, Fu Y Q, Du C L 2008 *Opt. Laser Tech.* **40** 614
- [25] Xie C Q, Zhu X L, Jia J 2009 *Opt. Lett.* **34** 3038
- [26] Jia J, Xie C Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 183
- [27] Liu Y J, Dai H T, Sun X W, Huang T J 2009 *Opt. Express* **17** 12418
- [28] Cheng G X, Hu C, Xu P, Xing T W 2010 *Opt. Lett.* **35** 3610
- [29] Andersen G 2010 *Appl. Opt.* **49** 6391
- [30] Zhang J Y, Cao Q, Lu X Q, Lin Z Q 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 256
- [31] Zhang J Y, Cao Q, Lu X Q, Lin Z Q 2010 *J. Opt. Soc. Am. A* **27** 1342
- [32] Xu Q F 2010 *Optik* **121** 1941
- [33] Chen Z F, Wang C H, Pu D L, Hu J, Chen L S 2010 *Opt. Express* **18** 16279
- [34] Cheng G X, Xing T W, Liao Z J, Yang Y, Ma J L 2008 *Proc. SPIE* **6832** 83229
- [35] Fischer P, Kim D H, Chao W L, Liddle J A, Anderson E H, Attwood D T 2006 *Mater. Today* **9** 26
- [36] Cheng G X, Hu C, Meng M Q H 2011 *Optics in the Life Sciences: OSA Optics and Photonics Congress* (Washington: Optical Society of American) NTuB7

# X-ray Zernike apodized photon sieves for phase-contrast microscopy\*

Cheng Guan-Xiao<sup>†</sup> Hu Chao

(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

(Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

(Received 16 September 2010; revised manuscript received 18 April 2011)

## Abstract

We present a kind of diffractive lens Zernike apodized photon sieves (ZAPS) whose structure is based on the combination of two concepts; apodized photon sieves and Zernike phase-contrast. Combined with the synchrotron light source, the ZAPS can be used as an objective for high-resolution phase-contrast X-ray microscopy in physical and life sciences. The ZAPS is a single optic unit that integrates the appropriate  $\pm \pi/2$  radians phase shift through selective zone placement shifts in an apodized photon sieve. The focusing properties of the ZAPS can be easily controlled by apodizing its pupil function. An apodized photon sieve with Gaussian pupil is fabricated by lithographic technique and shows that the side-lobes are significantly suppressed at the expense of slightly widening the width of the main lobe.

**Keywords:** X-ray microscopy, phase-contrast imaging, pupil apodization, photon sieves

**PACS:** 07. 85. Tt, 42. 79. Dj, 42. 25. Fx, 42. 15. Eq

---

\* Project supported by the Foundation of Key Laboratory of Robotics and Intelligent System of Guangdong Province, China (Grant No. 2009A060800016), the Strategic Cooperation Program of Guangdong Province and Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2009B091300160), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60904031), the Basic Research Program of Shenzhen, China (Grant No. 2009-203), the Main Direction Program of the Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KGCX2-YW-166) and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of Ministry of Education, China (Grant No. 2008-890).

<sup>†</sup> E-mail: guanxiaocheng@yahoo.cn