

# 台式 X 射线系统多光栅调制屏设计与特性\*

汪德<sup>1)2)</sup> 谈志杰<sup>1)†</sup> 李晴宇<sup>1)2)</sup> 喻虹<sup>1)2)</sup> 韩申生<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 空天激光技术与系统部王之江激光创新中心, 上海 201800)

2) (中国科学院大学, 材料与光电研究中心, 北京 100049)

(2025 年 4 月 21 日收到; 2025 年 6 月 25 日收到修改稿)

台式 X 射线系统存在通量低、非相干性等局限, 在显微成像、高精度测量等应用场景中面临巨大挑战. 傅里叶变换关联成像 (FGI) 对相干性要求较低, 据此原理发展出的空间相关多角度 FGI 能够有效提高成像效率, 适用于台式 X 射线系统. 然而该技术仍处于理论阶段, 缺乏调制 X 射线并形成聚焦多光束的有效器件. 为此, 本文提出一种多光栅调制方法, 将多个子光栅按特定方位排列对 X 射线进行调制. 单个子光栅出射的 X 射线为空间相干光, 各子光栅之间的 X 射线在样品位置非相干叠加, 从而形成聚焦的多角度光束, 有效提高台式 X 射线系统的通量利用率. 本文对多光栅调制屏的调制原理进行阐述, 通过数值仿真分析光栅尺寸、材质、厚度等参数的影响, 针对液态靶 X 射线源设计多光栅调制屏, 并完成加工. 本研究能够推动台式 X 射线系统在高分辨衍射成像中的应用.

**关键词:** 台式 X 射线系统, 多光栅调制屏, 空间调制, 衍射成像

**PACS:** 41.50.+h, 07.85.Fv, 42.30.Lr, 61.05.cp

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250512

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250512

## 1 引言

X 射线的波长短、穿透能力强, 能够突破传统光学显微镜的分辨率极限以及电子显微镜的穿透深度限制, 已成为解析物质结构的有效工具, 并广泛应用于材料科学、物理学、生命科学等多个领域<sup>[1-7]</sup>. 传统的 X 射线显微成像技术主要有透射全场 X 射线成像<sup>[1,2]</sup>、扫描透射 X 射线成像<sup>[3,4]</sup>、相干 X 射线衍射成像 (coherent diffraction imaging, CDI)<sup>[5-7]</sup>、X 射线计算机断层扫描<sup>[8,9]</sup>、X 射线荧光成像<sup>[8,10]</sup>等. 这些方法通过测量光场的一阶相干性来获取物体的图像. 与传统的 X 射线显微成像方法不同, X 射线傅里叶变换关联成像 (Fourier-transform ghost imaging, FGI) 利用光场的高阶相干性获取物体的傅里叶变换图像<sup>[11-13]</sup>. 该理论自 2004 年提

出以来<sup>[11]</sup>, 于 2016 年实现了首次 X 射线成像实验<sup>[13]</sup>, 并应用于低剂量生物样本成像<sup>[14,15]</sup>、电路板检测<sup>[16]</sup>等领域. 相较于传统的 CDI, FGI 对光源的相干性要求低, 具备物像分离的能力, 为高分辨率的生物医学显微成像和材料结构分析提供了潜在的应用前景<sup>[14-19]</sup>, 有望利用台式 X 射线源实现高分辨显微成像. 近年来, 基于空间相关技术的 FGI 能够实现单次曝光成像<sup>[13]</sup>, 从而有效地降低光通量的需求. 而多光束成像<sup>[20,21]</sup>能够充分利用台式 X 射线源的发光特性, 显著地提升成像效率. 据此, Li 等<sup>[22]</sup>提出了空间相关多角度 FGI 成像方法, 该方法能同时获取样品不同角度的傅里叶信息, 通过空间相关计算获得样品的傅里叶变换衍射图. 然而, 目前该方法仍处于理论阶段, 实验上缺乏有效的调制器件来获取聚焦的多角度 X 射线光束.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11627811) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [tanzj@siom.ac.cn](mailto:tanzj@siom.ac.cn)

根据工作原理不同, X 射线聚焦器件主要分为 3 类. 第 1 类是基于折射的器件, 如复合折射透镜<sup>[23]</sup>. 第 2 类是基于反射的器件, 主要包括毛细管透镜、K-B 镜、Wolter 镜、Montel 镜等<sup>[24-27]</sup>, 通过镀多层膜能够进一步提高反射率. 第 3 类为基于衍射的器件, 其中最具有代表性的就是波带片<sup>[28]</sup>. 上述聚焦器件可以实现通量的提升, 广泛应用于小角 X 射线散射<sup>[29]</sup>、全场显微成像<sup>[1,2]</sup> 等技术领域中. 然而, 这些传统的聚焦器件难以获得不同角度的多束光, 无法直接应用于空间相关多角度 FGI. 目前, 有研究者提出了多种策略来产生多光束, 包括透镜阵列<sup>[21]</sup>、多狭缝<sup>[30]</sup> 及多孔径掩模<sup>[31]</sup>. 这些光学元件都是经过特殊设计的, 透镜阵列需要额外的针孔阵列来配合使用形成多光束, 而多狭缝与多孔径掩模则常依赖额外的聚焦装置来实现有效的光束控制. 因此, 在实际应用中, 这些方案在实现多角度 X 射线成像时仍面临一定的复杂性和技术挑战.

为此, 本文提出设计多光栅调制屏对台式 X 射线源进行调制, 实现聚焦的多角度光束. 在调制屏上, 分布大量特定排布的子光栅, 通过光栅衍射实现大量不同入射角光束的聚焦, 提高通量利用率. 本文建立了多光栅调制屏的理论模型, 阐述了其调制原理, 并给出了调制屏参数设计的依据. 通过仿真分析了部分相干 X 射线经过调制屏后的传播特性. 通过数值模拟分析了子光栅的尺寸、材质、厚度等参数对多角度光束聚焦光斑的尺寸、均匀性和衍射效率的影响. 针对特征波长 1.13 nm、焦斑尺寸 20  $\mu\text{m}$  的液态镱靶台式 X 射线源, 依据调制原理和仿真分析结果, 设计并加工多光栅调制屏. 该调制屏能够应用于台式 X 射线空间相关多角度 FGI 系统中.

## 2 X 射线多光栅调制屏原理

空间相关多角度 FGI 中, 由  $M_g$  束光构成的聚焦多角度光束照射样品, 单束光为空间相干光, 不同光束间非相干, 并在样品面实现聚焦, 入射角度随机分布. 使用探测器在距离物体为  $z_3$  的位置记录探测臂光强分布  $I_t(x_t)$ , 计算  $I_t(x_t)$  与参考臂光强分布  $I_r(x_r)$  的空间相关, 可得<sup>[22]</sup>

$$G_{\text{spatial}}^{(2)}(\Delta x = x_t - x_r) \propto M_g \left| T \left( \frac{\Delta x}{\lambda z_3} \right) \right|^2 + I_0, \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为波长,  $T(\cdot)$  表示样品透过率的傅里叶变换;  $I_0$  表示样品面的总强度. 因此, 对单幅探测散斑场和参考散斑场的强度进行空间相关, 可以得到物体的傅里叶变换衍射图样.

多光栅调制屏的调制原理如图 1(a) 所示. 台式 X 射线源出射的非相干光传播了一段距离  $z_1$ , 到达多光栅调制屏的表面, 具有一定的空间相干性<sup>[32]</sup>. 调制屏上的子光栅对入射的部分空间相干 X 射线进行调制, 产生衍射光束. 调制屏的有效尺寸为  $P_g$ . 调制屏上大量子光栅的一级衍射光束以不同的入射角辐照在距离调制屏  $z_2$  的焦点 (样品) 位置, 提升光通量的利用率. 傅里叶变换关联成像分辨率  $\Delta$  受到后焦距  $z_2$  和调制屏尺寸  $P_g$  的影响, 存在以下关系<sup>[33]</sup>:

$$\Delta \geq z_2 \frac{2\lambda}{\pi P_g}. \quad (2)$$

多光栅调制屏的二维结构如图 1(b) 所示, 由尺寸为  $l$  的方形子光栅组成, 调制屏上共排布有  $M_g$  个子光栅. 对于第  $m$  个子光栅, 其中心  $o_m$  位于调制屏  $xoy$  平面内的坐标为  $(x_m, y_m)$ , 光栅的方位角为  $\alpha_m$ , 周期为  $d_m$ , 厚度为  $h$ , 其中  $m = 1, 2, \dots, M_g$ . 为了避免其他衍射级次的干扰, 可以在焦点附近放置适当尺寸的光阑.

台式 X 射线源的特征波长为  $\lambda$ , 焦斑尺寸为  $D_s$ . 根据 Van Cittert-Zernike 定理<sup>[32]</sup>, 传播到多光栅调制屏上的 X 射线相干尺寸  $l_s$  为

$$l_s = \frac{\lambda z_1}{D_s}. \quad (3)$$

子光栅尺寸  $l$  应该设计与相干尺寸  $l_s$  相匹配. 子光栅尺寸小于相干尺寸, 意味着系统的相干通量没有有效利用, 而子光栅尺寸大于相干尺寸的情况下, 子光束相干性不足. 每个子光栅产生的一级衍射光束在焦点位置的光斑尺寸为  $D_f$ . 在远场衍射条件下, 光斑尺寸  $D_f$  可以通过下式计算<sup>[34]</sup>:

$$D_f = \frac{\lambda z_2}{l}. \quad (4)$$

通过对子光栅尺寸  $l$  的设计, 能够在焦点位置得到预期尺寸的相干光束, 对应于参考文献<sup>[22]</sup> 中某一入射角下, 入射至样品的 X 射线光束. 为了实现不同入射角的光束并行照射样品, 必须将多个子光栅的衍射光束照射到同一位置. 在多光栅调制屏上, 第  $m$  个子光栅产生的一级衍射光束, 可视为多角度光束中的第  $m$  条入射至样品的光束. 入射子

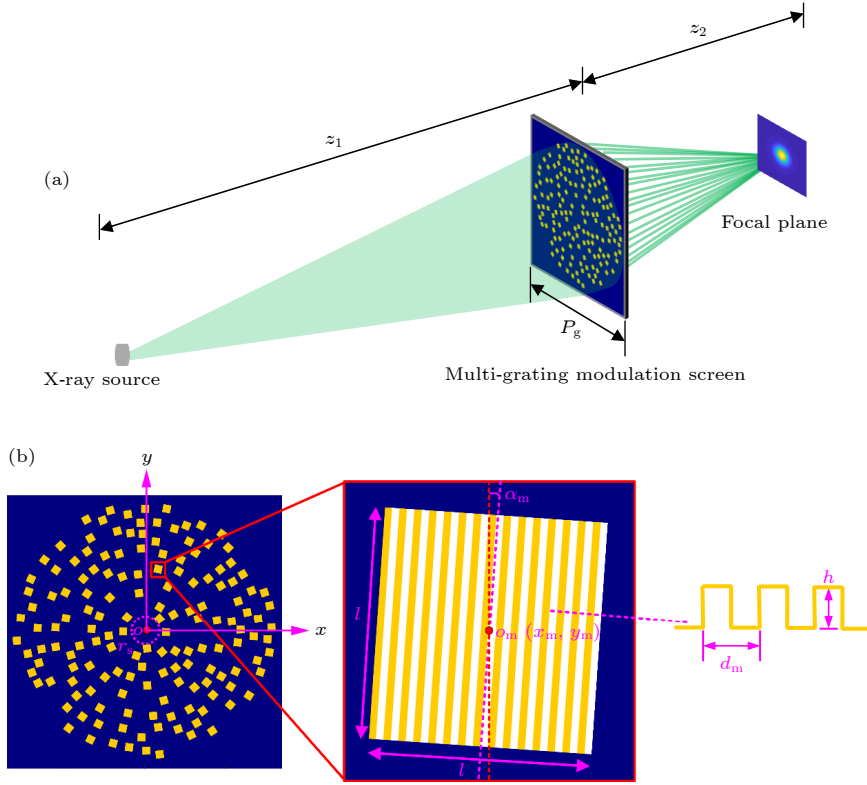


图 1 多光栅调制屏调制原理 (a) 多光栅调制的光路示意图; (b) 多光栅调制屏的二维结构

Fig. 1. Modulation principle of multi-grating modulation: (a) Optical schematic diagram of multi-grating modulation; (b) two-dimensional structure of multi-grating modulation screen.

光栅的 X 射线和出射的一级衍射 X 射线位于光栅法线的同一侧. 根据斜入射光栅方程<sup>[35]</sup>, 可以得到关系式:

$$d_m(\sin \theta_{in_m} + \sin \theta_{out_m}) = \lambda, \quad (5)$$

式中,  $\theta_{in_m}$  和  $\theta_{out_m}$  分别代表入射角和衍射角. 在傍轴近似条件下, 入射角和衍射角可以表示为

$$\begin{aligned} \sin \theta_{in_m} &= \sqrt{x_m^2 + y_m^2}/z_1, \\ \sin \theta_{out_m} &= \sqrt{x_m^2 + y_m^2}/z_2. \end{aligned} \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式并整理, 可得

$$d_m = \frac{\lambda z_1 z_2}{(z_1 + z_2) \sqrt{x_m^2 + y_m^2}}. \quad (7)$$

受到加工工艺限制, 子光栅周期下限为  $d_{low}$ . 此外, 为有效抑制直透光的干扰, 子光栅需避开调制屏中心区域, 其位置应分布在以调制屏中心为圆心、最小半径为  $r_s$  的环状区域之外. 同时, 为了确保衍射光束具备良好的方向性和强度, 本文设定每个子光栅不少于 5 个完整周期, 在该情况下, 一级衍射峰形态稳定, 小次级峰强度降低<sup>[36]</sup>. 故子光栅位置  $(x_m, y_m)$  的设计应满足以下条件:

$$\max \left( r_s, \frac{5\lambda z_1 z_2}{(z_1 + z_2)l} \right) < \sqrt{x_m^2 + y_m^2} < \frac{\lambda z_1 z_2}{(z_1 + z_2)d_{low}}. \quad (8)$$

在空间相关多角度 FGI 中, 多光束的入射角随机均匀分布<sup>[22]</sup>, 对应于多光栅屏上的子光栅随机排列, 衍射角  $\theta_{out_m}$  均匀分布. 由 (6) 式表示的几何关系可知, 在给定调制屏后焦距  $z_2$  的条件下, 子光栅的位置  $(x_m, y_m)$  决定了单束光的角度. 此外, 为确保各子光栅产生的一级衍射光束在空间上彼此非相干, 子光栅之间的间隔应大于光源在调制屏面处的空间相干尺寸  $l_s$ . 为了使一级衍射光束聚焦于样品所在的光轴中心位置, 调制屏上各子光栅的刻线方向应垂直于其中心  $o_m(x_m, y_m)$  指向调制屏中心  $o$  的径向方向. 因此, 子光栅在  $xoy$  平面内的方位角  $\alpha_m$  可表示为

$$\alpha_m = \arctan(y_m/x_m). \quad (9)$$

最终, 根据子光栅的大小、位置、周期、方位角等参数设计得到的多光栅调制屏, 能够对入射的部分相干 X 射线进行调制, 生成聚焦的多角度光束入射样品. 这一设计实现了对 X 射线光源的部分相干光的聚焦调制, 从而提高光源光通量的利用率并实

现多角度光束.

### 3 多光栅调制屏的特性分析及参数设计

为了分析 X 射线通过多光栅调制屏后的传播特性, 仿真计算了调制屏后不同位置的光强分布. 在仿真中, 光源大小为  $20\ \mu\text{m}$ , 波长为  $1\ \text{nm}$ , 光源与调制屏间距为  $0.4\ \text{m}$ , 距离调制屏为  $0.19\ \text{m}$  的位置平面是样品面, 子光栅的大小为  $20\ \mu\text{m}$ . 通过 (8) 式确定子光栅位置的分布范围, 利用 MATLAB 中 Random 函数随机生成子光栅的位置, 然后通过 (9) 式确定子光栅的方位角. 同时, 各子光栅一级衍射光的衍射角满足均匀分布. 结果如图 2(a) 所示, 计算了多光栅调制屏后  $0.16, 0.175, 0.19, 0.205$  和  $0.22\ \text{m}$  位置的衍射光束光强分布三维图, 调制屏后焦距为  $0.19\ \text{m}$ . 在焦点之前, 图样中除了一级衍射光, 还存在直透光及更高级衍射光. 通过在焦点附近放置合适尺寸的光阑, 能够有效去除其他衍射级次的影响, 获得良好的聚焦光斑, 如图 2(a) 中  $0.19\ \text{m}$  位置处所示. 图 2(b) 所示为焦点处的光斑二维强度分布, 其横截面的强度曲线如图 2(c) 所示, 整个光斑均匀对称. 在焦点之后, 各子光栅的一级衍射光束将独立传播, 形成具有随机分布的

光斑. 从图 2(a) 可以整体看出, 随着 X 射线束在多光栅调制屏后传播, 不同子光栅的一级衍射光束之间的间隔首先逐渐变小, 直至在焦点位置处重叠, 随后间隔开始逐渐增大.

在多光栅调制屏上, 子光栅的尺寸  $l$  和空间相干尺寸  $l_s$  的匹配程度, 将影响一级衍射光束入射样品的光斑尺寸和光斑均匀性. 为了统一描述不同匹配程度下的影响, 并避免因子光栅尺寸和空间相干尺寸差异带来的复杂性, 将子光栅尺寸与 X 射线源在多光栅调制屏面的空间相干尺寸之比定义为归一化光栅尺寸  $R_1 = lD_s/\lambda z_1$ . 归一化光栅尺寸直接影响光栅一级衍射光束, 从而影响衍射光束聚焦光斑的尺寸和均匀性. 光斑的尺寸通过光斑的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 来衡量<sup>[37]</sup>, 光斑均匀性可通过光斑强度的归一化均方根  $M_{\text{NRMS}}$  来评价<sup>[38]</sup>, 光斑均匀性  $M$  可表示为

$$M = 1 - \frac{M_{\text{NRMS}}}{\bar{I}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^p (I_q - \bar{I})^2}{(p-1)\bar{I}}} \times 100\%,$$

$$I_q \geq 0.8I_{\text{max}}, \quad (10)$$

式中  $I_{\text{max}}$  是光斑强度的最大光强,  $I_q$  是不小于  $0.8I_{\text{max}}$  的光斑采样点的光强,  $p$  是满足  $I_q$  的采样点

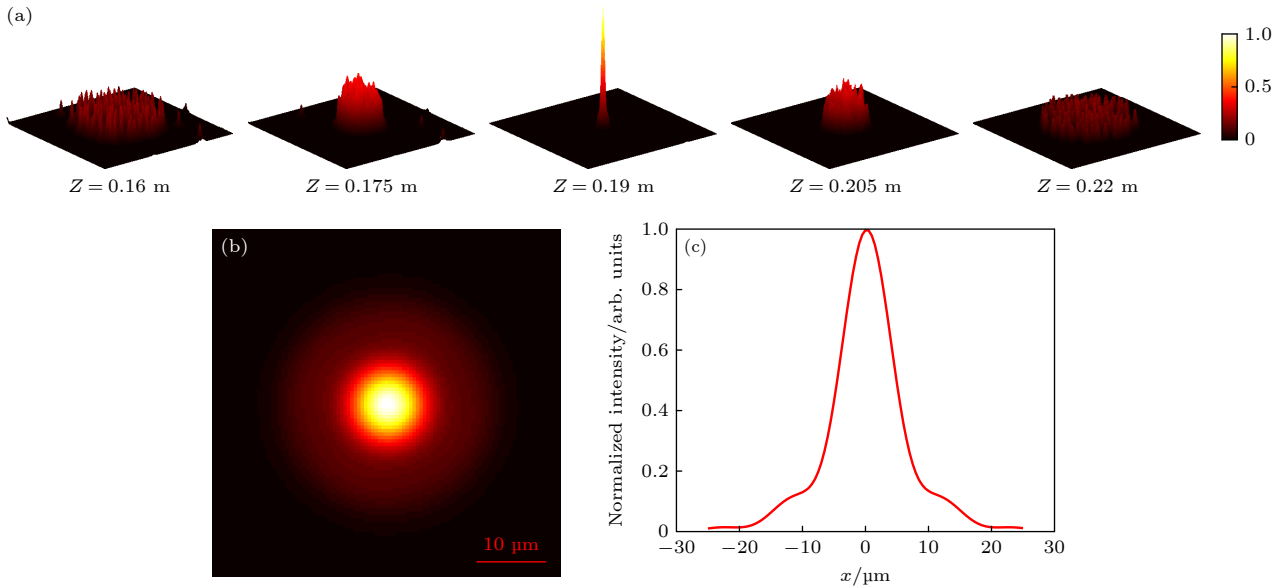


图 2 调制屏后光束传播过程中光斑的强度分布演变的结果 (a) 距离调制屏不同位置  $z$  处的光斑的强度分布三维图; (b)  $z = 0.19\ \text{m}$  处 ((a) 图) 的强度分布二维图; (c) (b) 图横截面强度分布曲线

Fig. 2. Simulation results of the evolution of the intensity distribution of the spot in the process of beam propagation behind the modulation screen: (a) Three-dimensional diagram of the intensity distribution of spot at different positions  $z$  from the modulation screen; (b) two-dimensional diagram of the intensity distribution of the pattern in Fig.(a) at  $z = 0.19\ \text{m}$ ; (c) cross section curve of the intensity distribution of Fig.(b).

总数,  $\bar{I}$  是采样范围内光强的均值. 图 3(a)—(c) 所示为 3 个不同的归一化光栅尺寸下仿真得到的样品面光斑强度分布. 图 3(d), (e) 分别展示了归一化光栅尺寸对光斑的 FWHM 和光斑均匀性的影响. 从图 3(d) 可以看出, 随着归一化光栅尺寸的增大, 光斑的 FWHM 快速减小, 在  $R_1$  为 1 的附近达到一个相对稳定的较低值, 随后缓慢上升. 这表明在光源的空间相干尺寸范围以内, 子光栅尺寸的增大能显著地减小样品面光斑的尺寸, 同时能增强衍射光通量, 提高了入射通量的利用率. 当光栅尺寸大于光源的相干尺寸, 入射光栅的 X 射线相干性变差, 光斑逐渐变宽. 从图 3(a)—(c) 中不同  $R_1$  下的光斑也能看到显著差异. 此外, 从图 3(e) 中光斑均匀性随光栅尺寸变化的趋势可见, 均匀性整体维持在较高水平, 波动幅度较小, 表明在一定范围内变化光栅尺寸, 光斑的均匀性受影响较小. 从上述结果可以看出, 光栅尺寸的合理选择对聚焦光斑的尺寸具有显著影响. 在光栅尺寸和光源的空间相干尺寸相当的情况下, 能够得到较小尺寸的光斑.

接下来, 将综合分析多光栅调制屏的衍射效率

与厚度之间的关系, 优化材料的选择和设计. 目前, X 射线衍射元件的常用材料包括 Au, W,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Si<sup>[39]</sup>. 为了选择合适的材料用于制备调制屏, 对这 4 种材料进行了分析. 在 X 射线波段内, 光栅的衍射效率依赖于厚度与波长的关系, 由相移和吸收共同决定. 为确定各个材料的最优厚度, 根据衍射光栅的标量理论<sup>[40]</sup>, 在相同的 X 射线波长下, 采用不同厚度的多光栅调制屏进行数值模拟. 光栅透光区域增大虽能提高透过率, 但会降低所需的一级衍射强度. 为实现最佳衍射效率, 本文将占空比(线宽/周期)设计为 0.5<sup>[40]</sup>. 在得到焦平面上的光斑强度分布后, 通过焦平面上的光斑与入射所有光栅前表面光能量的比值来计算多光栅调制屏的衍射效率<sup>[41,42]</sup>. 图 4(a) 所示为 1 nm 波长下, 不同材料的多光栅调制屏的衍射效率随厚度变化的曲线. 在厚度较薄的情况下, X 射线通过光栅时的相位变化呈周期性, 衍射效率随厚度增大呈现波动衰减趋势. 当厚度增大时, 光的吸收将占据主导, 衍射效率趋于稳定. 仿真计算得到 Au, W,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Si 在最佳衍射效率下的厚度分别为 310, 350, 995 和

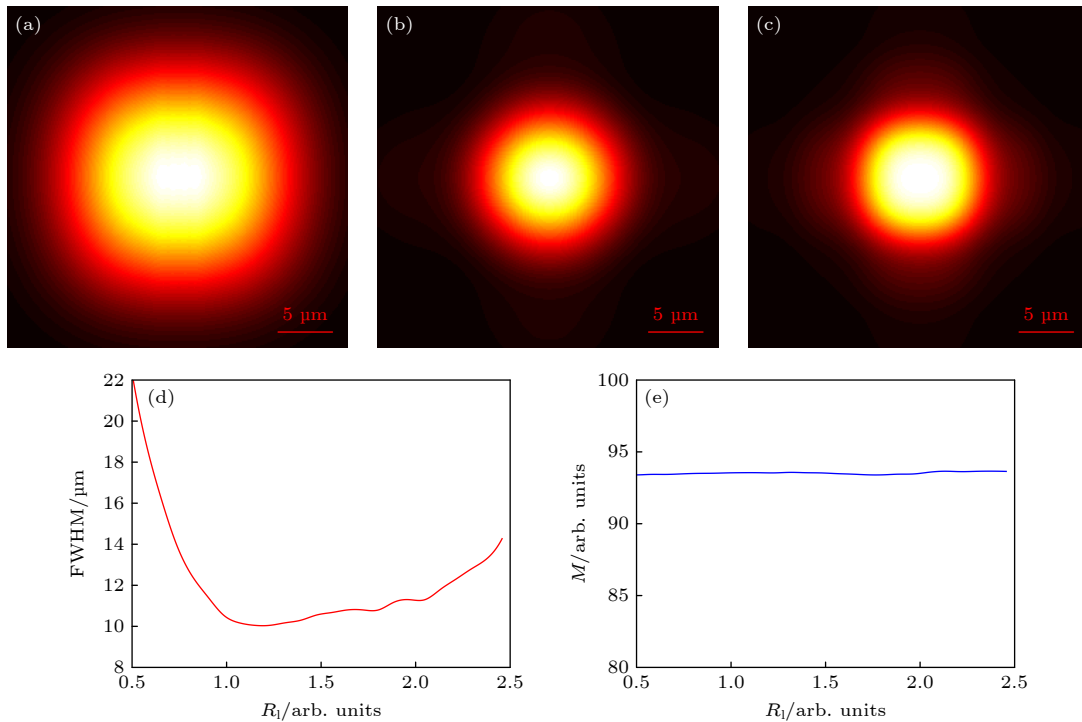


图 3 不同归一化光栅尺寸  $R_1$  下的仿真结果 (a)  $R_1 = 0.5$  时的光斑强度分布; (b)  $R_1 = 1$  时的光斑强度分布; (c)  $R_1 = 2.4$  时的光斑强度分布; (d) 光斑的 FWHM 随归一化光栅尺寸变化的曲线; (e) 光斑均匀性随归一化光栅尺寸变化的曲线

Fig. 3. Simulation results under different normalized grating sizes  $R_1$ : (a) The intensity distribution of the spot when  $R_1 = 0.5$ ; (b) the intensity distribution of the spot when  $R_1 = 1$ ; (c) the intensity distribution of the spot when  $R_1 = 2.4$ ; (d) the curve of the FWHM of the spot changing with the normalized grating size; (e) the curve of the uniformity of the spot with the change of the normalized grating size.

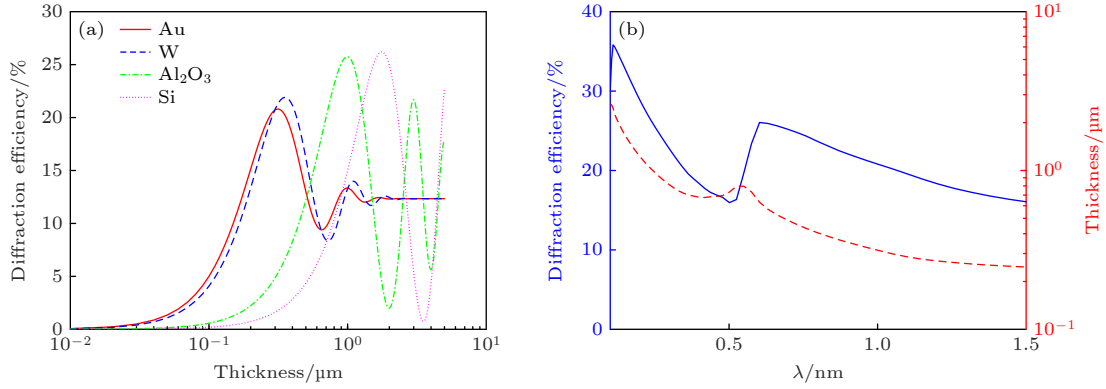


图4 多光栅调制屏的衍射特性仿真结果 (a) 1 nm波长下不同材料的多光栅调制屏衍射效率随厚度变化的曲线; (b) 不同光源波长对应的最大衍射效率及最佳光栅厚度

Fig. 4. Simulation results of diffraction characteristics of multi-grating modulation screen: (a) Diffraction efficiency curves of multi-grating modulation screens made of different materials as a function of thickness at a wavelength of 1 nm; (b) maximum diffraction efficiency and optimal grating thickness for different source wavelengths.

1765 nm, 最佳衍射效率均在 25% 左右. 因此, 为了降低 X 射线调制所需的高宽比, 考虑实际加工<sup>[43]</sup>, 我们优选金作为多光栅调制屏的材料进行后续设计. 此外, 金质光栅衍射元件已被广泛应用于钱德拉 X 射线天文望远镜<sup>[44]</sup>、X 射线微分相衬成像<sup>[45]</sup>、X 射线光谱仪<sup>[46]</sup> 等领域.

针对金材质多光栅调制屏, 通过数值仿真模拟不同波长下的衍射特性, 分析了光源波长对最佳衍射效率和光栅厚度的影响, 结果如图 4(b) 所示. 蓝色曲线表示最佳衍射效率随波长的变化, 红色虚线表示波长改变对最佳厚度的影响. 短波长时, 需要较厚的光栅材料才能获得较高的衍射效率, 而较长波长时, 最佳光栅厚度减小, 对高宽比要求较低, 便于加工, 衍射效率优于 20%. 在实际加工过程中, 光栅的占空比与厚度可能存在一定工艺偏差. 占空比为  $0.5 \pm 0.03$  范围内, 厚度在  $(280 \pm 20)$  nm 范围内变化, 光强的降低小于 1%, 其对整体衍射性能的影响较为有限. 此外, 若光栅的边缘粗糙度控制在周期的 1% 以内, 其对一级衍射效率的影响亦可忽略, 衰减不足 0.5%<sup>[47]</sup>.

考虑到 1 nm 波长附近的 X 射线源, 如 Al 靶、Mg 靶等功率较低, 使用液态金属作为台式 X 射线源阳极靶材的材料<sup>[48]</sup>, 能够增强 X 射线源的散热性能, 提高通量. Excillum Metal Jet D2 + X 射线源, 采用镱合金作为阳极材料, 镱的  $L\alpha$  线特征波长为 1.13 nm. 针对该 X 射线源, 我们设计了一种多光栅调制屏, 用来调制其部分相干 X 射线, 生成具有聚焦特性的多角度光束. 该调制后的光束用于

照射尺度为  $10\ \mu\text{m}$  的样品, 旨在实现 100 nm 量级的空间分辨能力. 以下将详细介绍多光栅调制屏的结构参数设计过程及其依据.

从先前的仿真分析可知, 多光栅调制屏的材质优选金. 从图 4(b) 可知, 选取 280 nm 作为调制屏厚度, 此时衍射效率最佳. 考虑到子光栅加工的高宽比, 设定子光栅的缝宽不小于 100 nm, 此时子光栅周期最小为 200 nm. 综合考虑光源结构、真空管道以及真空腔体等装配因素, 调制屏与 X 射线源的间距  $z_1$  被设定为 0.36 m. 液态靶 X 射线焦斑尺寸  $D_s$  为  $20\ \mu\text{m}$ , 根据 (3) 式, 得知光源在调制屏面的空间相干尺寸为  $20\ \mu\text{m}$ . 为了匹配相干尺寸, 设计调制屏上的子光栅尺寸为  $20\ \mu\text{m}$ .

确定调制屏的前焦距  $z_1$  后, 需要设计调制屏的后焦距与尺寸. 在给定前焦距的基础上, 设定最小光栅周期 (200 nm) 与系统分辨率 (100 nm) 作为目标约束条件, 联合确定调制屏的后焦距与整体尺寸. 后焦距的初始选取范围为 0.1—0.3 m, 调制屏尺寸的初始范围为 1—2 mm, 通过参数匹配确保一级衍射光束在焦点处形成分辨率满足要求的聚焦光斑, 覆盖整个样品区域. 由 (7) 式, 在调制屏的前焦距  $z_1$  确定的情况下, 子光栅的最小周期  $d_{\text{low}}$  由调制屏后焦距  $z_2$  和调制屏尺寸  $P_g$  决定. 图 5(a)—(c) 展示了在调制屏的前焦距  $z_1$  分别为 0.2, 0.36 和 0.5 m 时, 调制屏尺寸和后焦距对最小光栅周期的影响. 从图 5(a)—(c) 均可以看出, 随着调制屏尺寸  $P_g$  增大或后焦距  $z_2$  减小, 最小光栅周期减小. 对比图 5(a)—(c) 可知, 前焦距由 0.2 m 增大

至 0.36 m 和 0.5 m, 当调制屏尺寸为 1 mm、后焦距为 0.2 m 时, 所需的最小光栅周期分别为 226, 291 和 323 nm, 呈现增大趋势.

由 (2) 式, 调制屏的后焦距与尺寸还会影响分辨率. 在最小光栅周期不小于 200 nm 的约束条件下, 图 5(d)—(f) 展示了在前焦距分别为 0.2, 0.36 和 0.5 m 的 3 种情况下, 调制屏的后焦距和尺寸对系统空间分辨率的影响. 在满足  $d_{\text{low}} \geq 200$  nm 的区域内, 随着调制屏尺寸的增加或后焦距的减小, 系统空间分辨率会提高. 对比图 5(d)—(f) 可以看出, 当调制屏尺寸为 1 mm、后焦距为 0.2 m 时, 3 种前焦距下的空间分辨率均为 144 nm, 保持不变. 在图 5(d)—(f) 中绘制了对应空间分辨率为 100 nm 的等值线, 用以指导调制屏尺寸和后焦距参数选

择. 随着前焦距由 0.2 m 增至 0.36 m 和 0.5 m, 在满足目标分辨率的前提下, 调制屏尺寸和后焦距的可选择范围相应扩大. 在实际设定前焦距为 0.36 m 的条件下, 为了获得 100 nm 的目标分辨率, 一个可能的参数选择是: 将调制屏尺寸设置为 1.5 mm, 后焦距设置为 0.21 m 时, 此时系统空间分辨率为 100 nm, 对应的最小光栅周期为 200 nm. 同时, 根据 (4) 式计算, 相干光束在样品面上的光斑尺寸为  $11.8 \mu\text{m}$ , 能够完全覆盖尺度为  $10 \mu\text{m}$  的样品区域.

基于以上设计参数, 采用电子束光刻技术<sup>[49]</sup>来制备多光栅调制屏. 具体工艺流程如下: 首先, 将电子敏感的光刻胶涂覆在厚度为 200 nm  $\text{Si}_3\text{N}_4$  衬底上; 然后, 用电子束将多光栅分布图案写入光

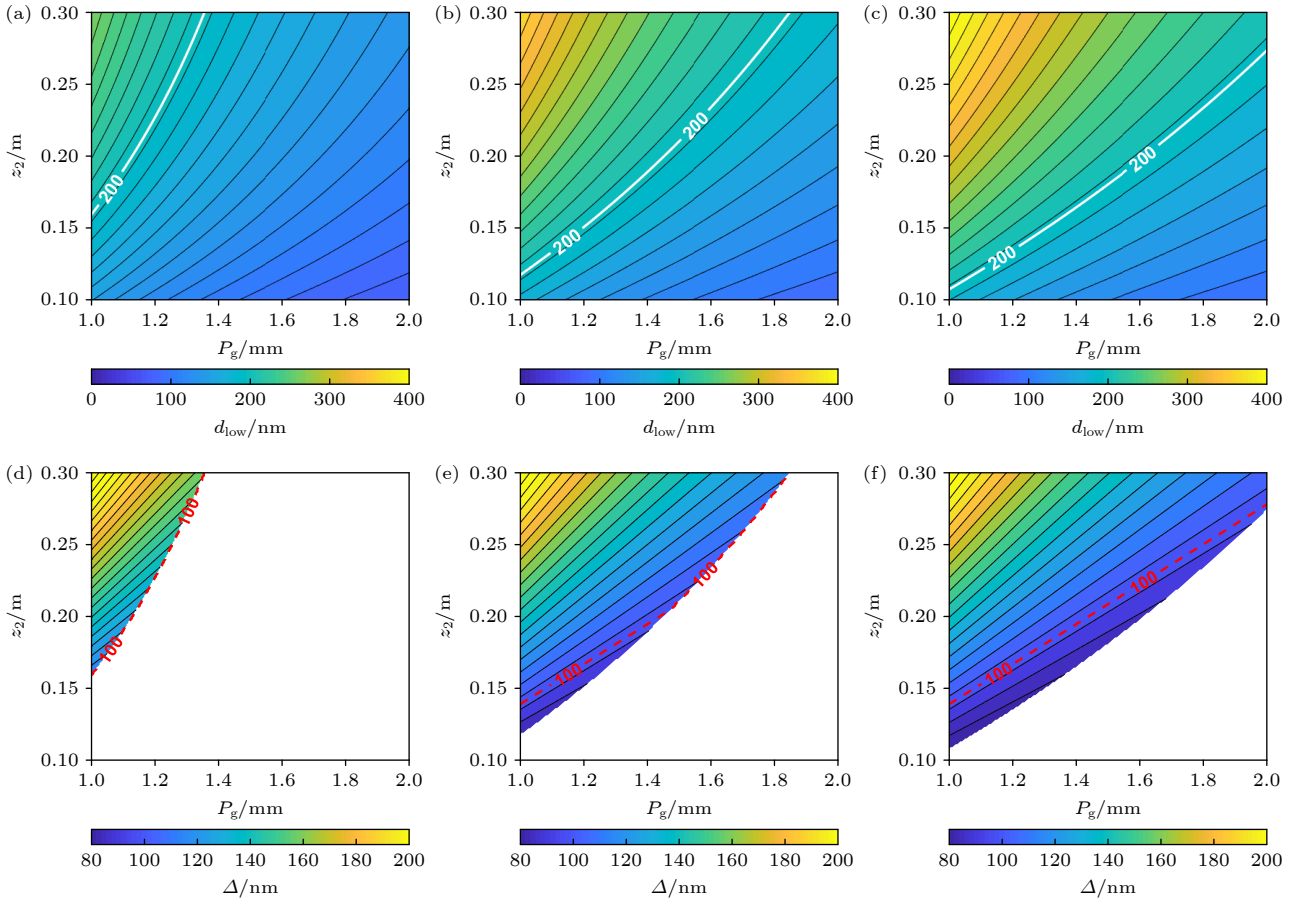


图 5 调制屏尺寸与后焦距对最小光栅周期和系统空间分辨率的影响 (a)—(c) 在调制屏前焦距分别为 0.2, 0.36 和 0.5 m 时, 最小光栅周期随调制屏尺寸与后焦距的变化关系; (d)—(f) 在最小光栅周期不小于 200 nm 的约束条件下, 当调制屏前焦距分别为 0.2, 0.36 和 0.5 m 时, 系统空间分辨率随调制屏尺寸与后焦距的变化情况

Fig. 5. Influence of the size of the modulation screen and the back focal length on the minimum grating period and the spatial resolution of the system: (a)—(c) When the focal lengths in front of the modulation screen are 0.2, 0.36 and 0.5 m, respectively, the minimum grating period varies with the size of the modulation screen and the back focal length; (d)—(f) under the constraint that the minimum grating period is not less than 200 nm, when the front focal length of the modulation screen is 0.2, 0.36 and 0.5 m, the spatial resolution of the system varies with the size of the modulation screen and the back focal length.

刻胶中, 实现显影光刻; 接着, 通过电镀从光栅凹槽的底部开始, 完整、均匀地填充金材质; 最后, 将光刻胶去除, 得到多光栅结构. 多光栅调制屏的实物照片如图 6(a) 所示. 图 6(b) 所示为调制屏上的光栅空间分布, 为避免直透光干扰, 光栅分布在内外直径分别为  $74\ \mu\text{m}$  和  $1.5\ \text{mm}$  的圆环区域. 在该圆环区域内, 子光栅按照特定规则分布, 以满足一级衍射光束的衍射角度均匀分布. 同时, 为确保各子光栅产生的衍射光束相互独立, 其中心间距均设计为大于  $40\ \mu\text{m}$ . 不同位置的子光栅具有不同的周期, 最小周期为  $200\ \text{nm}$ , 最大周期为  $4\ \mu\text{m}$ . 图 6(c) 所示为单个光栅在扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 下的图像, 光栅的尺寸  $l$  为  $20\ \mu\text{m}$ . 图 6(d) 所示为光栅的倾斜  $45^\circ$  视角下的 SEM 图像, 可以计算出加工出来的厚度约为  $280\ \text{nm}$ . 综上, 所加工光栅的结构完整性良好, 各子光栅的周期变化符合设计要求, 表明电子束光刻工艺能够精确控制光栅尺寸和分布, 该多光栅调制屏能够对 X 射线进行空间调制, 在保持高通量的前提下, 形成聚焦的多角度光束. 该调制屏的设计依据光源波长、尺寸和前焦距确定子光栅尺寸, 并结合周期与分辨率要求, 设计调制屏总尺寸与后焦距, 使一级衍射光束在焦点覆盖样品区域. 通过随

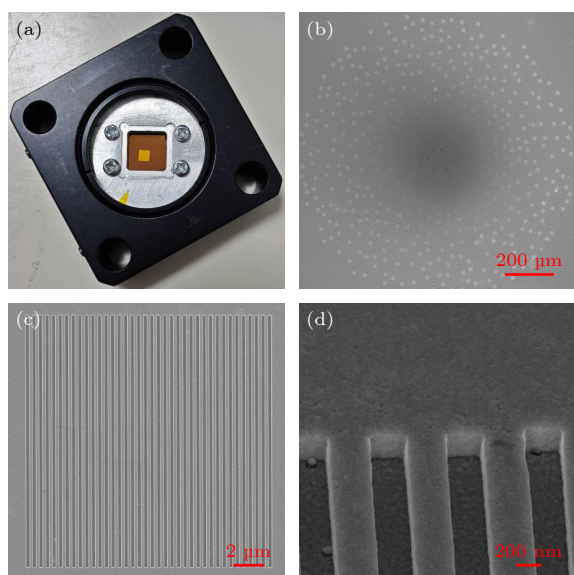


图 6 多光栅调制屏 (a) 调制屏实物图; (b) 调制屏的整体分布图像; (c) 单个光栅 SEM 平面图像; (d) 光栅的部分结构 SEM 图像

Fig. 6. Multi-grating modulation screen: (a) Photograph of the modulation screen; (b) overall distribution image of the modulation screen; (c) SEM image of a single grating plane; (d) SEM image of the partial structure of the grating.

机分布生成子光栅位置, 并设定对应方位角, 完成多光栅调制屏设计. 相比多孔透镜阵列<sup>[21]</sup>, 多狭缝<sup>[30]</sup> 和多孔径掩模<sup>[31]</sup> 等方案, 该设计结构简洁、加工便捷, 且无需辅助器件即可实现多光束聚焦, 便于实验应用. 在实际系统中, 光通量比其他复杂系统 (如多孔加上聚焦透镜) 略低, 后续所需的实验时间更长, 需要设计温控和隔振系统等系统, 提高系统稳定性.

## 4 结 论

本文提出一种多光栅调制屏的设计方案, 来调制 X 射线源的部分相干 X 射线形成聚焦的多角度光束. 该方案在结构上简洁紧凑, 具有灵活的角度调控能力, 同时有效减少了台式 X 射线系统的通量损失. 从理论上描述了多光栅的调制原理, 明确了关键设计参数及其选择依据. 通过数值仿真, 系统分析了部分相干 X 射线在调制屏后传播过程中的调制特性, 结果显示各一级衍射光束在样品面实现空间聚焦, 形成多角度汇聚结构, 并在焦点之后独立传播逐渐发散. 进一步, 通过对子光栅的尺寸、材料和厚度等参数进行优化分析, 研究了其对聚焦光斑的尺寸、均匀性及衍射效率的影响. 结果表明, 当子光栅尺寸与 X 射线源的空间相干尺寸相匹配时, 可显著提升光束的聚焦效果, 获得更小且均匀的焦斑. 基于理论与仿真结果, 针对液态靶 X 射线源, 设计金质多光栅调制屏, 整体结构尺寸为  $1.5\ \text{mm}$ , 厚度为  $280\ \text{nm}$ , 子光栅尺寸为  $20\ \mu\text{m}$ . 并采用电子束光刻工艺完成对调制屏的加工, 待后续实验条件满足时, 将进一步验证调制屏的聚焦性能. 该调制屏的设计与实现为小型化 X 射线系统中开展多角度衍射成像及相关应用提供了有效支持与可行路径.

## 参考文献

- [1] Chien C C, Tseng P Y, Chen H H, Hua T E, Chen S T, Chen Y Y, Leng W H, Wang C H, Hwu Y, Yin G C, Liang K S, Chen F R, Chu Y S, Yeh H I, Yang Y C, Yang CS, Zhang G L, Je J H, Margaritondo J 2013 *Biotechnol. Adv.* **31** 375
- [2] Zhang L, Tao F, Du G, Wang J, Gao R Y, Deng B, Xiao T Q 2023 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **1057** 168781
- [3] Yao S, Fan J, Chen Z, Zong Y, Zhang J, Sun Z, Zhang L, Tai R, Liu Z, Chen C, Jiang H D 2018 *IUCrJ* **5** 141
- [4] Foetisch A, Filella M, Watts B, Vinot LH, Bigalke M 2022 *J. Hazard. Mater.* **426** 127804
- [5] Miao J, Sandberg R L, Song C 2011 *IEEE J. Sel. Top.* **18** 399
- [6] Prosekov P A, Nosik V L, Blagov A E 2021 *Crystallogr. Rep.*

66 867

- [7] Pfeiffer F 2018 *Nat. Photonics* **12** 9
- [8] Yuan Q X, Deng B, Guan Y, Zhang K, Liu Y J 2019 *Physics* **48** 205
- [9] Withers P J, Bouman C, Carmignato S, Cnudde V, Grimaldi D, Hagen C K, Maire É, Manley M, Plessis A D, Stock S 2021 *R Nat. Rev. Methods Primers* **1** 18
- [10] Pushie M J, Sylvain N J, Hou H, Hackett M J, Kelly M E, Webb S M 2022 *Metalomics* **14** mfac032
- [11] Cheng J, Han S S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 093903
- [12] Yu H, Lu R H, Han S S, Xie H L, Du G H, Xiao T Q, Zhu D M 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 113901
- [13] Tan Z J, Yu H, Zhu R G, Lu R H, Han S S, Xue C F, Yang S M, Wu Y Q 2022 *Phys. Rev. A* **106** 053521
- [14] Zhang A X, He Y H, Wu L A, Chen L M, Wang B B 2018 *Optica* **5** 374
- [15] He Y H, Zhang A X, Li M F, Huang Y Y, Quan B G, Li D Z, Wu L A, Chen L M 2020 *APL Photonics* **5** 056102
- [16] Zhao C Z, Zhang H P, Tang J, Zhao N X, Li Z L, Xiao T Q 2024 *J. Synchrotron Radiat.* **31** 1525
- [17] Li P, Chen X, Qiu X, Chen B L, Chen LX, Sun B Q 2024 *Chin. Opt. Lett.* **22** 112701
- [18] Sun M J, Zhang J M 2019 *Sensors* **19** 732
- [19] Li H Q, Hou W T, Ye Z Y, Yuan T Y, Shao S K, Xiong J, Sun T X, Sun X F 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 141101
- [20] Wittwer F, Lyubomirskiy M, Koch F, Kahnt M, Seyrich M, Garrovet J, David C, Schroer C G 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 171102
- [21] Lyubomirskiy M, Wittwer F, Kahnt M, Koch F, Kubec A, Falch K V, Garrovet J, Seyrich M, David C, Schroer C G 2022 *Sci. Rep.* **12** 6203
- [22] Li Q Y, Tan Z J, Wang D, Yu H, Han S S 2025 *Phys. Rev. A* **111** 033531
- [23] Zholudev S I, Terentiev S A, Polyakov S N, Martyushov S Y, Denisov V N, Kornilov N V, Polikarpov M V, Snigirev A A, Snigireva I I, Blank V D 2016 *AIP Conf. Proc.* **1764** 020006
- [24] Das A, Heirwegh C M, Gao N, Elam W T, Wade L A, Clark B C, Hurowitz J A, VanBommel S J, Jones M W M, Allwood A C X 2025 *X-Ray Spectrom* **54** 203
- [25] Marshall F J, Bahr R E, Goncharov V N, Glebov V Y, Peng B, Regan S P, Sangster T C, Stoeckl C 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 093702
- [26] Ohba A, Nakano T, Onoda S, Mochizuki T, Nakamoto K 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 093704
- [27] Chen B Y, Yin G C, Lee C Y, Hsu M Y, Lin B H, Tseng S C, Li X Y, Chen H Y, Wu J X, Chang S H, Tang M T 2018 *Synchrotron Radiat. News* **31** 27
- [28] Mohacsí I, Vartiainen I, Rösner B, Guizar-Sicairos M, Guzenko V A, McNulty I, Winarski R, Holt M V, David C 2017 *Sci. Rep.* **7** 43624
- [29] Li T, Senesi A J, Lee B 2016 *Chem. Rev.* **116** 11128
- [30] Hirose M, Higashino T, Ishiguro N, Takahashi Y 2020 *Opt. Express* **28** 1216
- [31] Zhu Z, Ellis R A, Pang S 2018 *Optica* **5** 733
- [32] Born M, Wolf E 2013 *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (Elsevier) pp572–577
- [33] Moreau P A, Toninelli E, Morris P A, Aspden R S, Gregory T, Spalding G, Boyd R W, Padgett M J 2018 *Opt. Express* **26** 7528
- [34] Goodman J W 2005 *Introduction to Fourier Optics* (Roberts and Company publishers) pp80–82
- [35] Palmer C, Loewen E G 2005 *Diffraction grating handbook* (Newport Corporation) pp21–22
- [36] Harvey J E, Pfisterer R N 2019 *Opt. Eng.* **58** 087105
- [37] Pascarelli S, Mathon O, Munoz M, Mairs T, Susini J 2006 *J. Synchrotron Radiat.* **13** 351
- [38] Xu C W, Zhong L J, Qin Y X, Guo H P, Tang X H 2016 *Chin. J. Lasers* **43** 102001 (in Chinese) [许成文, 钟理京, 秦应雄, 郭海平, 唐霞辉 2016 中国激光 **43** 102001]
- [39] Xie C Q 2022 *Opt. Precis. Eng.* **30** 1815 (in Chinese) [谢常青 2022 光学精密工程 **30** 1815]
- [40] Qiu K Q, Xu X D, Liu Y, Hong Y L, Fu S J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6329 (in Chinese) [邱克强, 徐向东, 刘颖, 洪义麟, 付绍军 2008 物理学报 **57** 6329]
- [41] Gao Y Z, Wu L J, Lu W E, Liu H Y, Xia Y, Zhao L L, Li Y L, Kong X D, Han L 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 1111002 (in Chinese) [高雅增, 吴鹿杰, 卢维尔, 刘虹遥, 夏洋, 赵丽莉, 李艳丽, 孔祥东, 韩立 2021 光学学报 **41** 1111002]
- [42] Yang J M, Ding Y N, Cui Q M, Cao L F, Ding Y K, Zhu P P, Zhao Y D, Yang G H, Zheng Y J, Wang Y N, Zhang W H, Ni G 2000 *High Power Laser Part. Beams* **12** 723 (in Chinese) [杨家敏, 丁耀南, 崔明启, 曹磊峰, 丁永坤, 朱佩平, 赵屹东, 杨国洪, 郑志坚, 王耀梅, 张文海, 黎刚 2000 强激光与粒子束 **12** 723]
- [43] Pinzek S J 2023 *Ph. D. Dissertation* (Munich: Technische Universität München)
- [44] Burwitz V, Reinsch K, Greiner J, Rauch T, Suleimanov V, Walter F W, Mennickent R E, Predehl P 2007 *Adv. Space Res.* **40** 1294
- [45] Morimoto N, Fujino S, Ohshima K, Harada J, Hosoi T, Watanabe H, Shimura T 2014 *Opt. Lett.* **39** 4297
- [46] Moore A S, Guymer T M, Kline J L, Morton J, Taccetti M, Lanier N E, Bentley C, Workman J, Peterson B, Mussack K, Cowan J, Prasad R, Richardson M, Burns S, Kalantar D H, Benedetti L R, Bell P, Bradley D, Hsing W, Stevenson M 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10E132
- [47] Gross H, Henn M, Heidenreich S, Rathsfeld A, Bär M 2012 *Appl. Opt.* **51** 7384
- [48] Wansleben M, Zech C, Streeck C, Weser J, Genzel C, Beckhoff B, Mainz R 2019 *J. Anal. At. Spectrom.* **34** 1497
- [49] Tong X, Chen Y F, Mu C Y, Chen Q C, Zhang X Z, Zeng G, Li Y C, Xu Z J, Zhao J, Zhen X J, Mao C W, Lu H L, Tai R Z 2023 *Nanotechnology* **34** 215301

# Design and characteristics of multi-grating modulation screen for desktop X-ray system\*

WANG De<sup>1)2)</sup> TAN Zhijie<sup>1)†</sup> LI Qingyu<sup>1)2)</sup>  
YU Hong<sup>1)2)</sup> HAN Shensheng<sup>1)2)</sup>

1) (*Wangzhijiang Innovation Center for Laser, Aerospace Laser Technology and System Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 21 April 2025; revised manuscript received 25 June 2025 )

## Abstract

The desktop X-ray system has limitations such as low flux and poor coherence. It faces great challenges in application scenarios such as microscopic imaging and high-precision measurement. Fourier-transform ghost imaging (FGI) has low requirements for the coherence of the light source. Using this principle, multi-angle FGI based on spatial correlation can effectively improve the imaging efficiency and is suitable for desktop X-ray systems. However, this technology is still in the theoretical stage, and there is a lack of effective devices to modulate X-rays and form focused multiple beams. To this end, a multi-grating modulation method is proposed in this work. The partially coherent radiation of the X-ray source is modulated by arranging multiple sub-gratings in a specific direction. The X-ray emitted by a single sub-grating is spatially coherent light, and the X-rays between the sub-gratings are incoherently superimposed at the sample position to form a focused multi-angle beam. This effectively improves the flux utilization of the desktop system. The modulation principle of multi-grating is described theoretically, and the key design parameters and their selection basis are clarified. Through numerical simulation, the modulation characteristics of partially coherent X-rays in the propagation process behind the modulation screen are systematically analyzed. By optimizing the parameters such as the size, material and thickness of the sub-grating, the influences of the sub-grating on the size, uniformity and diffraction efficiency of the focused spot are investigated. The results show that when the sub-grating size matches the spatial coherence size of the X-ray source, the focusing effect of the beam can be significantly improved, and a smaller and uniform focal spot can be obtained. Based on the theoretical and simulation results, a gold multi-grating modulation screen is designed and fabricated for the liquid target X-ray source. The simulation and theoretical predictions will be validated experimentally, once the experimental conditions are met. The design and implementation of the modulation screen provide effective support and a feasible way for multi-angle diffraction imaging and related applications in miniaturized X-ray systems.

**Keywords:** tabletop X-ray system, multi-grating modulation screen, spatial modulation, diffraction imaging

**PACS:** 41.50.+h, 07.85.Fv, 42.30.Lr, 61.05.cp

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250512](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250512)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250512](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250512)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11627811).

† Corresponding author. E-mail: [tanzj@siom.ac.cn](mailto:tanzj@siom.ac.cn)

## 台式X射线系统多光栅调制屏设计与特性

汪德 谈志杰 李晴宇 喻虹 韩申生

### Design and characteristics of multi-grating modulation screen for desktop X-ray system

WANG De TAN Zhijie LI Qingyu YU Hong HAN Shensheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 174101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250512

CSTR: 32037.14.aps.74.20250512

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250512>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术

Dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter

物理学报. 2022, 71(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220229>

#### 基于矢量光场空间调制的光波偏振方向解算方法研究

Algorithms for calculating polarization direction based on spatial modulation of vector optical field

物理学报. 2023, 72(1): 010201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221745>

#### 基于超快激光调制的纳秒脉冲X射线发射源

Nanosecond pulse X-ray emission source based on ultrafast laser modulation

物理学报. 2024, 73(4): 040701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231505>

#### 基于高次谐波X射线光源的三维纳米相干衍射成像技术

Three-dimensional nano-coherent diffraction imaging technology based on high order harmonic X-ray sources

物理学报. 2022, 71(16): 164205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220976>

#### 上海软X射线自由电子激光单脉冲成像定时的设计与实现

Design and implementation of timing system for single-shot imaging at Shanghai soft X-ray free-electron laser

物理学报. 2024, 73(12): 120701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240383>

#### 晶体X射线劳厄衍射分束特性研究

Beam splitting characteristics of crystal X-ray Laue diffraction

物理学报. 2022, 71(4): 046101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211674>