

# 利用单光栅干涉仪表征同步辐射的光源特性\*

薛莲<sup>†</sup> 张海鹏 司尚禹 李中亮

(中国科学院上海高等研究院, 上海光源, 上海 201800)

(2025 年 6 月 24 日收到; 2025 年 7 月 25 日收到修改稿)

相干性作为前沿 X 射线研究技术的核心要素, 在过去二十年中推动了相干 X 射线衍射成像、X 射线全息术等众多实验的蓬勃发展, 并推动了第四代同步辐射光源与硬 X 射线自由电子激光的建设. 为了实现对同步辐射光束线相干性及光源尺寸的测量, 本文构建了基于二维单光栅干涉法的 X 射线测量系统, 深入探讨其测量原理与传播模型. 首先, 依据 VanCittert-Zernike 定理, 明确干涉点阵可见度与 X 射线空间相干度的内在联系; 其次, 运用单光栅 Talbot 自成像效应, 精确测量光栅平面处 X 射线空间相干长度, 并推导光源空间分布. 实验结果表明, 上海光源 X 光学测试线弯铁光源相干长度为  $4.2 \mu\text{m}(H) \times 13.8 \mu\text{m}(V)$  @15 keV, 光源尺寸为  $124 \mu\text{m}(H) \times 38 \mu\text{m}(V)$ . 该技术能够同时测量水平和垂直方向的相干长度, 有助于识别 X 射线源相干区域形状, 也可用于评估 X 射线光学器件的相干保持能力, 为 X 射线相干性研究提供了新的有效途径.

**关键词:** 同步辐射, 单光栅干涉法, 相干性, 光源尺寸

**PACS:** 07.85.Qe, 95.75.Kk, 42.25.Kb, 52.59.Px

**DOI:** 10.7498/aps.74.20250824

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250824

## 1 引言

相干性是众多前沿 X 射线研究技术的核心要素, 利用相干性的实验数量在过去二十年中急剧增加, 例如: 相干 X 射线衍射成像<sup>[1]</sup>、X 射线全息术<sup>[2]</sup>、X 射线光子关联谱学<sup>[3]</sup>, 以及 X 射线相衬成像<sup>[4]</sup>等. 此外, 相干 X 射线的独特优势促使科研人员积极开展软 X 射线自由电子激光的相关工作, 同时也大力推动了第四代同步辐射光源与硬 X 射线自由电子激光 (XFEL) 的建设. 目前, 学界已普遍认识到, 基于相干性的实验不仅需要通过表征工具对 X 射线束的稳定性、形状及尺寸进行监测, 而且光束本身的相干特性也至关重要. 因为光束线光学元件会显著影响 X 射线的相干性, 进而可能对测量数据的质量产生重大影响.

基于经典光学理论, 空间相干长度可通过测量杨氏双缝实验中干涉条纹的可见度获取, 该方法同

样适用于硬 X 射线领域. 然而, 由于硬 X 射线波长极短, 使杨氏双缝实验在实际测量过程中面临诸多挑战. Yoshio<sup>[5]</sup> 曾借此测量 SPring-8 成像光束线的空间相干长度. 相较之下, 基于光栅自成像 (Talbot 效应) 的测量方法, 因其简便性成为 X 射线空间相干性测量的重要手段. 其中, 由相位光栅与吸收光栅组合而成的双光栅干涉仪是常用的测量装置<sup>[6-9]</sup>. 不过, 该方法对光栅的制备工艺与准直精度要求较高, 而对成像分辨率的要求相对较低. 近些年来, CCD、CMOS 等成像探测器在分辨率、灵敏度和动态范围等方面取得了显著突破, 使成像系统能够捕捉到更为精细的图像信息. 在此背景下, 基于 Talbot 效应的单光栅干涉仪 (single grating interferometry, s-GI) 应运而生, 成为一种快速、低色差的波前测量技术<sup>[10-12]</sup>. s-GI 的突出优势在于其装置构造简单, 测量过程仅需单块光栅与 X 射线探测器两个关键器件. 从理论层面分析, 在光学检测系统中, 器件数量的减少有助于提升波前测

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2022YFF0709103) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: xuel@sari.ac.cn

量的精度.

本文将 s-GI 技术应用于测量上海光源 X 光学测试线光束线的空间相干长度和光源尺寸. 建立了单光栅干涉测量系统, 获得了沿垂直和水平方向的横向相干长度与光源尺寸. 实验证明, 该技术可同时测量光源水平和垂直两个方向的相干长度, 有助于识别 X 射线源相干区域的形状. 该技术也可用于评估 X 射线光学器件的相干保持能力.

## 2 二维单光栅干涉仪的工作原理

### 2.1 理论模型

在部分相干理论框架下, 空间两点光场的相干性由互相干函数或互强度描述, 归一化相干度函数可定量表征光场相干程度<sup>[13]</sup>. 同步辐射光束中, X 射线光束的时间相干性可由单色器获得. 假设 X 射线为单色光时, 从  $S_1$ ,  $S_2$  两点发射的光波, 在远离光源的  $P$  点叠加, 该点合成光强由两列波的振幅、相位及相干关系决定:

$$I(P) = I_1(P) + I_2(P) + 2\sqrt{I_1(P)I_2(P)}\text{Re}[\gamma_{12}(\tau)], \quad (1)$$

$$\text{Re}[\gamma_{12}(\tau)] = |\gamma_{12}(\tau)| \exp\{j[2\pi\nu\tau + \alpha_{12}(\tau)]\}, \quad (2)$$

其中,  $I_1(P)$ ,  $I_2(P)$  分别为  $S_1$ ,  $S_2$  点的光强,  $\tau$  为相干时间,  $\gamma_{12}(\tau)$  为复相干度,  $\nu$  为单色光的频率,  $\alpha_{12}(\tau)$  为光波在  $S_1$  和  $S_2$  的相位差, 与光源性质有关,  $2\pi\nu\tau$  为光波从  $S_1$  和  $S_2$  到达  $P$  点的相位差, 与光源性质无关.

干涉条纹的可见度是度量光源相干度的关键指标. 通常, 干涉条纹对比度的定义为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3)$$

其中,  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  分别为干涉条纹的极大值和极小值. 代入 (1) 式, 干涉条纹的对比度可表示为

$$V = \frac{2\sqrt{I_1(P)I_2(P)}}{I_1(P) + I_2(P)} |\gamma_{12}(\tau)|. \quad (4)$$

当  $I_1(P) = I_2(P)$  时, 对比度等于相干度的模:

$$V = |\gamma_{12}(\tau)|. \quad (5)$$

基于上述理论公式仅需精确测定两束光在  $P$  点的光强及干涉条纹对比度, 通过光学计算即可推导出光束的复相干度. 对于扩展准单色光源 (非理想单色光), 依据 VanCittert-Zernike 定理, 观测屏上任意两点  $Q_1$  与  $Q_2$  的相干度可进一步量化表征:

$$\gamma_{12} = \frac{J(x_1, y_1; x_2, y_2)}{\sqrt{I(x_1, x_2)^2 + I(y_1, y_2)^2}} = \frac{\exp(j\varphi) \iint_{-\infty}^{+\infty} I(\alpha, \beta) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(\Delta x\alpha + \Delta y\beta)\right] d\alpha d\beta}{\iint_{-\infty}^{+\infty} I(\alpha, \beta) d\alpha d\beta}, \quad (6)$$

其中,  $(\alpha, \beta)$  坐标系表示光源屏所在的坐标系,  $(x, y)$  坐标系表示观察屏所在的坐标系,  $J$  为互强度,  $\varphi$  为相位因子,  $\lambda$  为波长.

根据上述理论, 当光源尺寸及观测区域远小于二者间距时, 观测区域内的相干度与光源强度分布归一化傅里叶变换的绝对值成正比. 由于其中相位因子  $\exp(j\varphi)$  不影响复相干度的模, 因此相干度  $\gamma_{12}$  实际上仅取决于观察面上选定的  $Q_1$  和  $Q_2$  两点的坐标差值  $(\Delta x, \Delta y)$ .

对于第 3 代同步辐射光源, 其光强分布可由高斯公式表示. 基于 VanCittert-Zernike 定理, 对其光强分布进行归一化傅里叶变换并取绝对值, 即可获得光束的相干度为

$$|\gamma| = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta(x, y)^2}{2\xi_{x, y}^2}\right), \quad (7)$$

其中,  $\Delta(x, y)$  为光源上两点的距离,  $\xi_{x, y}$  为距光源  $z$  的光屏上辐射光的空间相干长度. 则光源大小为

$$\sigma_{\text{source}, x, y} = \frac{\lambda z}{2\pi\xi_{x, y}}. \quad (8)$$

其次, 非平面波波前会引起 Talbot 图像改变其间距和/或偏离规则间隔网格. 从干涉测量的角度来看, Talbot 图像可以被看作是由原始波前的剪切副本所形成的干涉图, 其中剪切角为

$$\theta_s = 2\lambda/p, \quad (9)$$

其中,  $p$  为光栅周期. 因此, Talbot 图像测量的是光源波前的相位梯度. 对于硬 X 射线能段,  $p$  的尺寸一般为微米量级以提供足够好的可见度. 如图 1(a) 所示, 光栅设计为棋盘格模式, 周期为  $4 \mu\text{m}$ . 当 X 射线光子波长为  $\lambda$  时, 使用相移为  $\varphi$  的光栅所需的厚度  $H$  为

$$H = \frac{\varphi\lambda}{2\pi\delta}, \quad (10)$$

其中,  $\delta$  为相移材料折射率的衰减量. 例如, Si 的折射率衰减量为  $2.16 \times 10^{-6}$ @15 keV. 因此, 对于  $\pi$  相移的光栅, 理论刻槽深度为  $19 \mu\text{m}$ . 图 1(b) 显示了在 GratXray AG 制造的二维 (2D) 棋盘格相位光栅中心部分的扫描电子显微镜图像. 光栅周期  $p = 4.0 \mu\text{m}$ , 深度  $H$  为  $18.85 \mu\text{m}$ . Talbot 自成像图像沿着棋盘格的边缘方向的周期  $p_\alpha = p_0/2$ , 沿着棋盘格对角线方向的周期为  $p_\alpha = p_0/\sqrt{2}$ . 对于  $p$  光栅, 边缘方向对比度较好, 而对于  $p/2$  光栅, 首选对角线方向.

## 2.2 二维单光栅干涉仪的硬件构成

二维 (2D) 单光栅干涉仪检测系统融合了光学、机械与电子技术, 能够实现高精度的 X 射线空间相干性测量. 该系统主要为上海光源 X 光学测试线 (BL09B)<sup>[14]</sup> 光束线的光学测试而设计, 同时也适用于其他光束线. 其所有机械部件与控制单元均为独立式, 包括仪器所需的驱动器、控制器和电缆. 图 2 展示了光学布局的示意图以及干涉仪的实

物照片. 该系统由四大核心部分构成, 以下将对这 4 个子组件进行详细描述.

二维棋盘  $\pi$  相位光栅 (GratXray AG), 其周期为  $4.0 \mu\text{m}$ , 深度为  $18.85 \mu\text{m}$ , 通过相位调制产生自成像干涉条纹, 为相干性分析提供信号支持.

光学成像子系统采用不同厚度的 LuAG:Ce ( $20 \mu\text{m}$  或  $100 \mu\text{m}$ ) 闪烁体晶体, 将 X 射线信号转换为可见光. 这些可见光经反射镜垂直反射至校正物镜, 随后在相机传感器上形成图像. 该子系统的所有组件均采用模块化设计, 不仅能轻松更换不同的闪烁体和物镜, 而且对可见光均不透明. 系统共配备了 3 个物镜, 分别对应 2 倍、10 倍和 20 倍的放大倍数. 借助闪烁体-镜头结构, 光学成像子系统可高效完成 X 射线到电信号的转换.

图像采集子系统运用 sCMOS 相机与高速采集卡, 实现对图像的精准捕捉和数字化处理. 目前, 干涉仪上使用了两台相机: Hamamatsu ORCA-Flash4.0 和 Hamamatsu ORCA-Quest, 单像素尺寸分别为  $6.5 \mu\text{m}$  和  $4.6 \mu\text{m}$ . 每台相机都安装了一个适配器板, 使其能与探测器框架形成通用接口, 其他相机也可通过其他适配器板轻松适配.

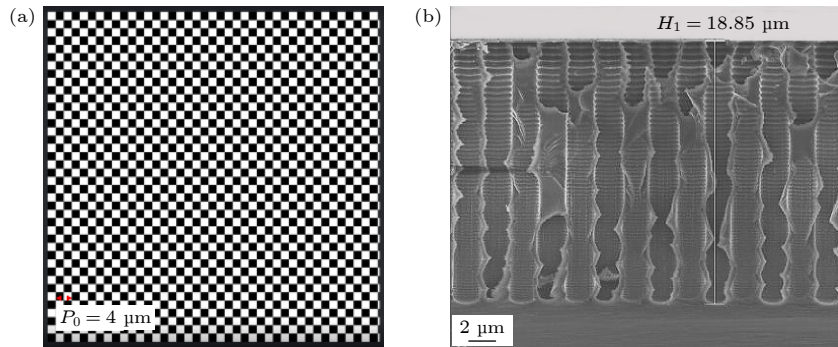


图 1 2D 光栅设计图和光栅剖面扫描电子显微镜图像 (a) 设计图; (b) 光栅剖面扫描电子显微镜图像  
Fig. 1. The central part of the 2D grating diagram and the SEM image: (a) Design drawing; (b) grating profile SEM image.

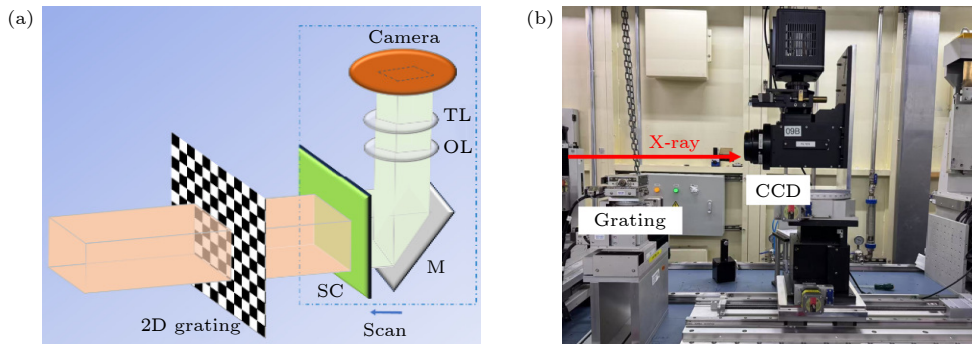


图 2 二维单光栅干涉仪检测系统 (a) 示意图; (b) 实物图  
Fig. 2. 2D grating interferometry measuring system: (a) Schematic; (b) photographic.

机械运动子系统依托多维电动平台,保障测量时的微米级定位精度.位于光束上游的光栅载物台,由6个独立电机组成,可实现光栅的六自由度定位;位于光束下游的成像载物台,由4个独立电机组成.其中,沿光轴方向的直线导轨由步进电机驱动,最小步长为 $4\ \mu\text{m}$ ,行程可达 $0.5\ \text{m}$ .在测量过程中,运动控制系统会驱动各部件协同运作,成像系统则实时采集干涉图像,为光源特性分析提供坚实的数据基础.

### 2.3 二维单光栅干涉测量系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:当二维相位光栅垂直放置于X射线光束中时,在光栅下游的不同Talbot距离处可获得干涉图案.基于部分Talbot效应,干涉图的对比度随高次傅里叶谐波的变化而变化.因此,利用傅里叶变换,可从每个干涉图的谐波峰值中提取对比度值.其次,从对比度值的变化中可重构光栅到探测器距离的函数,提取出沿某个方向的相干长度.同时,基于VanCittert-Zernike定理,空间相干函数是源分布函数的傅里叶变换.对于高斯弯铁光源,X射线在光源下游距离 $z$ 处的横向相干函数也是高斯函数.因此,该系统直接测量的是X射线光束的相干函数,再通过提取出的相干长度得到光源的尺寸.由于光栅的二维结构,该方法可同时测量水平和垂直两个方向的相干长度与尺寸.

## 3 测量结果与讨论

本实验在上海光源BL09B展开.弯铁光源所发出的X射线经双晶单色器单色化后,其单色性( $\Delta E/E$ )通常为 $10^{-3}$ — $10^{-4}$ 范围.测量使用的成像子系统包括一个低失真透镜(OPTIC PETER Inc, 20X放大倍数)、一个 $0.1\ \text{mm}$ 厚的LuAG:Ce闪烁体(Konoshima Chemical Co., Ltd.)和一个sCMOS传感器(ORCA-Flash4.0, Hamamatsu,  $2048\times 2048$ 像素,单像素尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}$ ),探测器系统的有效像素尺寸为 $0.325\ \mu\text{m}$ .整个成像子系统为定焦系统,合适的可见光透镜可以为s-GI提供几乎无成像误差的X射线检测.

如图2所示,将2D棋盘格相位光栅放入待测光束线中,光栅距离弯铁光源 $39.5\ \text{m}$ .光子能量调整为 $15\ \text{keV}$ ,用于匹配相位光栅,探测器放置于Talbot距离处.调整光栅姿态,使其垂直于X射线

光束的传播方向.同时旋转光栅,使棋盘格图案的边缘方向沿着横向光束的方向.此时,将获得水平与垂直周期最大化的干涉图(如图3(a)所示).沿着光束传播方向移动探测器系统,并在不同的距离 $d$ 处记录干涉图案,使每个方向上至少覆盖5个峰位.图3显示了 $d_{2,0^\circ} = 157\ \text{mm}$ 和 $d_{6,45^\circ} = 947\ \text{mm}$ 处获得的干涉图案的中心部分,它们对应于沿 $\theta = 0^\circ$ 方向的第2个和 $\theta = 45^\circ$ 方向的第6个峰值位置.

图3(c), (d)分别是通过快速傅里叶变换(FFT)获得的谐波峰值,谐波峰值代表干涉图沿不同方向的周期性.由于FFT图像的中心对称性,沿4个方向存在4个独立的一阶峰,即 $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 $135^\circ$ .每个方向上的周期性可以根据相对于中心0阶峰值的峰值位置来确定.以图3(c)为例,沿 $0^\circ$ 方向的一阶谐波峰值揭示了 $p_{0^\circ} = 4\ \mu\text{m}$ 的周期性结构.能见度由一阶峰值与0阶峰值的振幅之比给出.显然,图3(d)中 $0^\circ$ 处的一阶峰值强度远小于图3(c)中的强度,基本不可见,这表明 $d = 947\ \text{mm}$ 处的水平周期能见度降低.图3(b)中沿 $0^\circ$ 缺乏周期性结构也证明了这一点.

图3(e)—(h)显示了沿所有4个方向的能见度随 $d$ 的变化.对峰位周围数据进行高斯拟合,给出水平和垂直方向的光源相干长度和尺寸,如表1所示.显然,与 $0^\circ$ 方向相比, $90^\circ$ 方向具有更高的相干长度.这与弯铁光源的特征相符.光源的均方根尺寸为 $124\ \mu\text{m}(H)\times 38\ \mu\text{m}(V)$ .根据SHADOW模拟结果可知(如图4所示),光源点的理论尺寸为 $75\ \mu\text{m}(H)\times 31\ \mu\text{m}(V)$ .主要归因于以下两个方面:其一,X射线传输过程中光学元件对空间相干性的破坏.在X射线从弯铁光源传输至光栅的路径上,需依次经过单色器与铍窗.由于这些光学元件表面存在粗糙度和面形误差,会直接削弱光束的相干度.其二,光束具有一定的发散角,使得到达光栅的X射线无法呈理想的平行状态.当X射线能量为 $15\ \text{keV}$ 时,经过白光狭缝限制后,实际光束的发散角约为 $0.5\ \text{mrad}(H)\times 0.08\ \text{mrad}(V)$ .因此,光束发散角的影响无法忽略,且对水平方向的影响更显著.对于第3代同步辐射而言,光子能量越低发散角较大,所以,能量较高时测量的结果更为准确.

值得注意的是,对于表征良好的光栅,仅需要自成像距离处的干涉图或周围的少量图像即可获得相干长度.但这种技术的局限性之一是,在特定能量下进行横向相干测量需要针对该能量定制光栅.

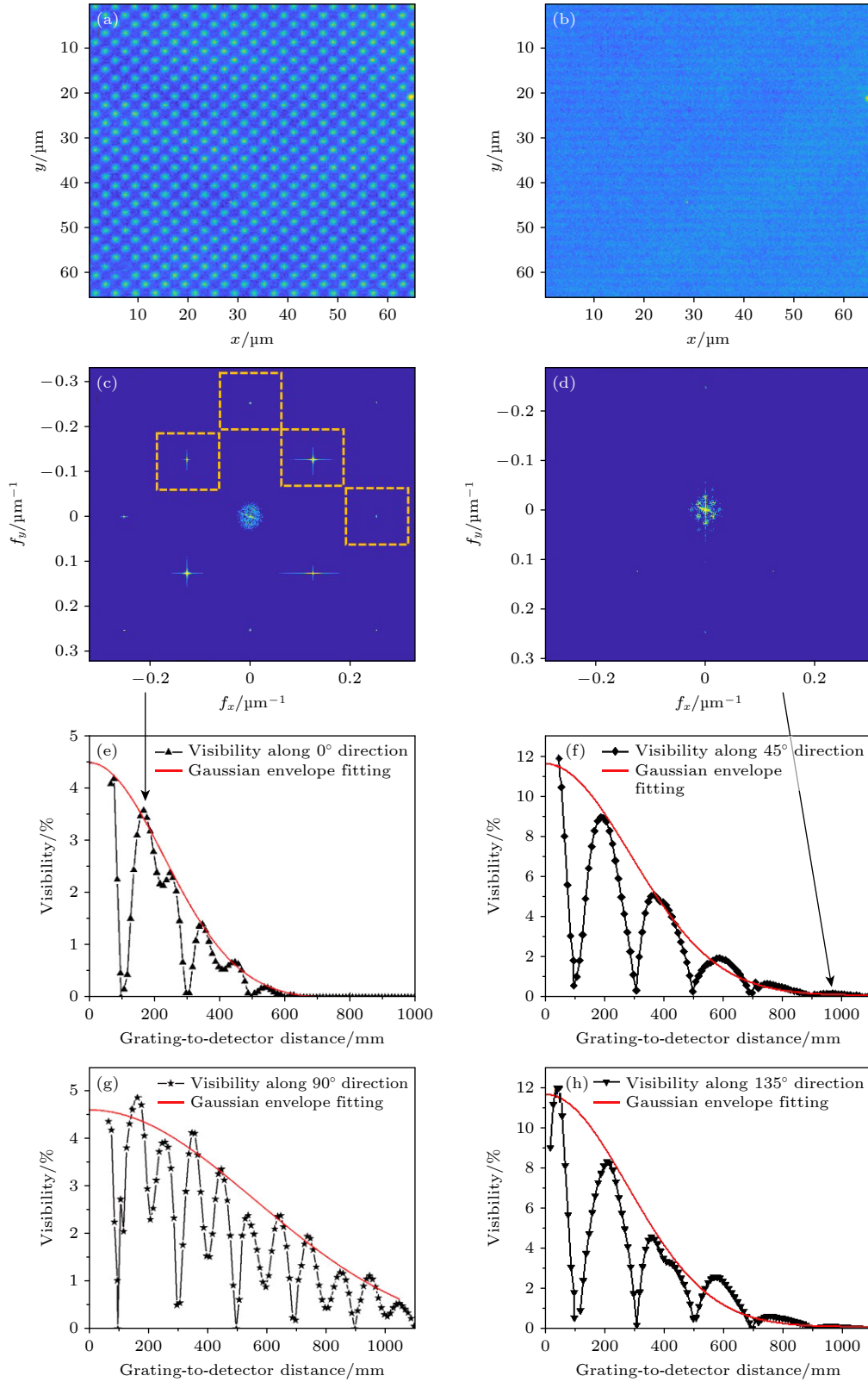


图 3 (a)  $d_{2,0^\circ} = 157$  mm 和 (b)  $d_{6,45^\circ} = 947$  mm 处获得的干涉图案的中心部分; (c), (d) 对应的傅里叶变换图像, 黄色虚线区域表示不同的方向; (e)–(h) 2D 光栅不同方向能见度随  $d$  的变化, 黑线是实验数据, 红线是峰值处的高斯拟合数据

Fig. 3. Interferograms recorded at  $d_{2,0^\circ} = 157$  mm (a) and  $d_{6,45^\circ} = 947$  mm (b); (c), (d) their Fourier transform images, with the yellow dashed regions indicating the different directions; (e)–(h) the visibility evolution as a function of the grating-to-detector distance,  $d$ , the black lines are the experimental data, while the red lines are data selected around each Talbot distances for the Gaussian envelope fitting.

表 1 2D 单光栅干涉测量中提取的光源相干长度和尺寸

Table 1. Extracted source coherence length and beam sizes from 2D single grating interferometry measurements.

$\theta/(\circ)$	相干长度/ $\mu\text{m}$	光源尺寸/ $\mu\text{m}$
0	$4.2\pm 0.1$	$124\pm 2$
45	$7.2\pm 0.1$	$72\pm 1$
90	$13.8\pm 0.8$	$38\pm 2$
135	$6.9\pm 0.1$	$75\pm 1$

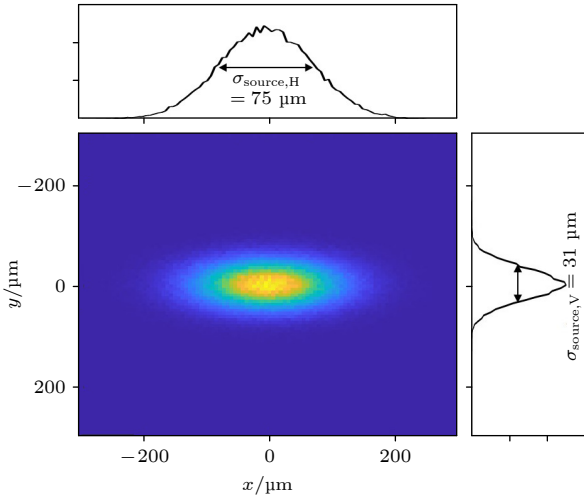


图 4 光子能量为 15 keV 时, BL09B 弯铁光源尺寸的模拟结果

Fig. 4. Simulation results of BL09B bending magnet source size at a photon energy of 15 keV.

## 4 结 论

为了实现对同步辐射光源大小及束线相干性的测量, 建立了基于二维单光栅干涉法的 X 射线干涉测量系统, 分析了干涉点阵可见度的变化. 测量结果表明, 上海光源 X 光学测试线弯铁光源尺

寸为  $124\ \mu\text{m}(H)\times 38\ \mu\text{m}(V)$ , 所发出的 X 射线在水平与垂直方向的相干长度分别为:  $4.2\ \mu\text{m}(H)\times 13.8\ \mu\text{m}(V)$  @15 keV. 随着同步加速器和 XFEL 源的相干亮度不断增加, 该技术可以成为测量光束波前横向相干性和光源尺寸的好工具. 也可用于评估 X 射线光学器件的相干保持能力.

## 参考文献

- [1] Zhou G Z, Tong Y J, Chen C, Ren Y Y, Wang Y D, Xiao T Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 028701 (in Chinese) [周光照, 佟亚军, 陈灿, 任玉琦, 王玉丹, 肖体乔 2011 *物理学报* **60** 028701]
- [2] McNulty I, Kirz J, Jacobsen C, Anderson E H, Howells M R, Kern D P 1992 *Science* **256** 1009
- [3] Grubel G, Zontone F 2004 *Alloys. Compd.* **362** 3
- [4] Wilkins S W, Nesterets Y I, Gureyev T E 2014 *Phil. Trans. R. Soc. A* **372** 0021
- [5] Yoshio S 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 1026
- [6] Guigay J P, Zabler S, Cloetens P, David C, Mokso R, Schlenker M 2004 *J. Synchrotron Rad.* **11** 476
- [7] Rutishauser S, Samoylova L, Krzywinski J, Bunk O, Grünert J, Sinn H, Cammarata M, Fritz D M, David C 2012 *Nat. Commun.* **3** 947
- [8] Wang H, Sawhney K, Berujon S 2014 *Opt. Lett.* **39** 2518
- [9] Qi J C, Ye L L, Chen R C, Xie H L, Ren Y Q, Du G H, Deng B, Xiao T Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104202 (in Chinese) [戚俊成, 叶琳琳, 陈荣昌, 谢红兰, 任玉琦, 杜国浩, 邓彪, 肖体乔 2014 *物理学报* **63** 104202]
- [10] Matsuyama S, Yokoyama H, Fukui R, Kohmura Y, Tamasaku K, Yabashi M, Yashiro W, Momose A, Ishikawa T, Yamauchi K 2012 *Opt. Express* **20** 24977
- [11] Liu Y, Seaberg M, Zhu D, Krzywinski J, Seiboth F, Hardin C, Cocco D, Aquila A, Nagler B, Lee H J, Boutet S, Feng Y, Ding Y, Marcus G, Sakdinawat A 2018 *Optica* **5** 967
- [12] Inoue T, Matsuyama S, Kawai S, Yumoto H, Inubushi Y, Osaka T, Inoue I, Koyama T, Tono K, Ohashi H, Yabashi M, Ishikawa T, Yamauchi K 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 043106
- [13] Born M, Wolf, E 1999 *Principles of Optics* (7th Ed.) (Cambridgeshire: Cambridge University Press) pp554-632
- [14] Li Z, Fan Y, Xue L, Zhang Z, Wang J 2019 *Proceedings Of The 13th International Conference On Synchrotron Radiation Instrumentation—Sri 2018* Taipei, Taiwan, China, June 11-15, 2018 p060040

# Characterization of synchrotron radiation source properties using a single-grating interferometer\*

XUE Lian<sup>†</sup> ZHANG Haipeng SI Shangyu LI Zhongliang

(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

( Received 24 June 2025; revised manuscript received 25 July 2025 )

## Abstract

Coherence, as a core element of cutting-edge X-ray research technology, has driven the vigorous development of many experiments such as coherent X-ray diffraction imaging and X-ray holography in the past two decades, as well as the construction of fourth-generation synchrotron radiation sources and hard X-ray free electron lasers. To measure the size of synchrotron radiation light source and coherence of beamline, an X-ray measurement system based on two-dimensional (2D) single grating interferometry is established in this work, and the measurement principles and propagation models used in the system are also investigated. Firstly, based on the VanCittert-Zernike theorem, the relationship between the visibility of the interference lattice and the spatial coherence of X-rays is established. Secondly, by combining the Talbot self imaging effect of a single grating, the X-ray spatial coherence length of the grating plane is measured, and the spatial distribution of the corresponding light source is obtained through further calculation. The relevant measurement experiments of this study are conducted at the BL09B bending magnet beamline of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). A 2D checkerboard  $\pi$  phase-shift grating is used as the core device in the experiment. This setup can not only enable the acquisition of transverse coherence lengths in the vertical and horizontal directions but also further measure the transverse coherence lengths in the directions forming  $45^\circ$  and  $135^\circ$  angles with respect to the horizontal direction. The experimental process strictly follows the technical specifications outlined in this paper: measuring interferograms at different positions downstream of the phase grating along the beam propagation direction. For each interferogram, the corresponding visibility values are extracted by analyzing the harmonic peaks in its Fourier-transformed image. Ultimately, the transverse coherence length in each direction is derived based on the evolution law of visibility as a function of the grating-to-detector distance. The experimental results show that the coherence length of the emitted X-rays on SSRF testline is  $4.2 \mu\text{m}(H) \times 13.8 \mu\text{m}(V)$  at 15 keV, and the size of the bending magnet source is  $124 \mu\text{m}(H) \times 38 \mu\text{m}(V)$ . The results obtained by this method can provide important references for measuring the electron source size and developing experimental methods with high requirements for uniform illumination.

**Keywords:** synchrotron radiation, X-ray single-grating interferometry, coherence, source size

**PACS:** 07.85.Qe, 95.75.Kk, 42.25.Kb, 52.59.Px

**DOI:** [10.7498/aps.74.20250824](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250824)

**CSTR:** [32037.14.aps.74.20250824](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250824)

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2022YFF0709103).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xuel@sari.ac.cn](mailto:xuel@sari.ac.cn)

利用单光栅干涉仪表征同步辐射的光源特性

薛莲 张海鹏 司尚禹 李中亮

**Characterization of synchrotron radiation source properties using a single-grating interferometer**

XUE Lian ZHANG Haipeng SI Shangyu LI Zhongliang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 200702 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250824

CSTR: 32037.14.aps.74.20250824

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250824>

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

飞秒激光诱导分子准直相干性的度量分析

Measurement analysis of coherence in femtosecond laser-induced molecular alignment

物理学报. 2025, 74(3): 033301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241400>

类氢原子核质量对电子状态的影响

Influence of hydrogen-like nucleus mass on electronic state

物理学报. 2021, 70(7): 070301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201754>

内壳层体系的X射线腔量子光学

X-ray cavity quantum optics of inner-shell transitions

物理学报. 2024, 73(24): 246101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241218>

机器学习在光电子能谱中的应用及展望

Application and prospect of machine learning in photoelectron spectroscopy

物理学报. 2024, 73(21): 210701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240957>

Fe基合金应力感生不可逆磁各向异性机理

Mechanism of stress induced irreversible magnetic anisotropy in Fe-based alloy ribbons

物理学报. 2022, 71(24): 247501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221509>

局部塑性变形下铁基金属玻璃的致密化和非均匀性增强

Densification and heterogeneity enhancement of Fe-based metallic glass under local plastic flow

物理学报. 2022, 71(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211304>