

多层膜光栅衍射效率的同步辐射研究

骆钧尧^{1,2,4}, 郭智^{1,2*}, 黄浩^{3,4,5**}, 欧欣³, 张祥志^{1,2}¹中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;²中国科学院上海高等研究院上海光源科学中心, 上海 201204;³中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;⁴中国科学院大学, 北京 100049;⁵上海科技大学, 上海 201210

摘要 多层膜光栅具有优异的衍射性能,能够成为同步辐射软 X 射线波段重要的色散元件。为了测量多层膜光栅的衍射效率,在上海同步辐射光源上设计并搭建了小型化的衍射效率检测装置,实现在现有谱学显微实验腔体中对光栅衍射效率的快速检测。在 480~730 eV 的光子能量范围内,测得多层膜光栅的 0 级衍射效率峰值为 1.11%,+1 级次的衍射效率峰值为 0.52%,并分析影响多层膜光栅衍射效率的因素。使用微分理论数值计算多层膜光栅的衍射效率,验证了实验方案的正确性。衍射效率的测量和模拟计算为多层膜光栅的制备和应用提供了重要依据。

关键词 衍射; X 射线光学; 同步辐射; 多层膜光栅; 衍射效率

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1405001

Synchrotron Radiation Research on Diffraction Efficiency of Multilayer Coated Grating

Luo Junyao^{1,2,4}, Guo Zhi^{1,2*}, Huang Hao^{3,4,5**}, Ou Xin³, Zhang Xiangzhi^{1,2}¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;² Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;³ Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;⁵ ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract Multilayer coated gratings have excellent diffraction performance and can be an important dispersion optical element in synchrotron radiation soft X-ray band. In order to measure the diffraction efficiency of multilayer coated gratings, a miniaturized device for measuring diffraction efficiency of the grating was designed and installed in Shanghai Synchrotron Radiation Facility. The diffraction efficiency of the grating can be detected quickly in the existing spectroscopic microscopic experimental chamber. In the photon energy range of 480–730 eV, the zero-order diffraction efficiency peak of the multilayer grating is 1.11%, while the 1st order diffraction efficiency peak is 0.52%. The factors affecting the diffraction efficiency of multilayer coated gratings were analyzed. The diffraction efficiency of multilayer coated gratings was calculated numerically by differential theory, proving the rationality of the experimental scheme. The diffraction efficiency measurement and simulations will contribute to the preparation and application of multilayer coated gratings.

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-02-08; 录用日期: 2021-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(U1732268,12075304)

通信作者: *guozhi@zjlab.org.cn; **huanghao@mail.sim.ac.cn

Key words diffraction; X-ray optics; synchrotron radiation; multilayer coated grating; diffraction efficiency

OCIS codes 050.1950; 340.6720; 040.7480

1 引言

衍射光栅是同步辐射和自由电子激光的主要光学元件,用于真空紫外和软 X 射线能量范围内单色器^[1]或能谱仪^[2]的分光,能够对同步辐射弯铁光源白光、波荡器粉光(带宽~2%)以及自由电子激光粉光(带宽 0.1%)进行色散分光,能量分辨率($E/\Delta E$, 其中 E 为中心能量, ΔE 为中心能量处所能分辨的带宽)可达 10^5 。衍射光栅在同步辐射近边吸收谱、共振非弹性 X 射线散射、谱学显微和自由电子激光单脉冲成像等应用中起核心作用^[3-6]。光栅根据刻槽形状不同可分为矩形光栅和闪耀光栅,根据线密度分布可分为等线间距和变线间距光栅,根据基底形状不同可分为平面光栅和凹面光栅,根据镀层不同可分为单层和多层膜光栅。其中多层膜光栅在同步辐射软 X 射线波段有很好的应用前景,在衍射效率与色散方面具有优势,并且能使光谱仪或单色器的设计不使用掠入射模式,以减小几何像差和整个系统的尺寸^[7]。在 1~4 keV 的波段上,相比于常规光栅组成的准直平面光栅单色器(cPGM),基于多层膜光栅的 cPGM 能使有效效率提高一个量级;同时通过增加闪耀角使光栅工作在更高的衍射级次,能够提高单色器分辨率,因此在未来同步辐射光束线升级中有望采用多层膜光栅作为色散元件升级 cPGM^[8]。光栅的衍射效率是衡量光栅性能的重要指标,2014 年柏林的同步辐射光源 BESSY-II 实现新的光束线^[9]并将新型多功能 UHV 反射仪^[10]投入使用,研究用于同步辐射、自由电子激光和天文学的衍射光栅。同步辐射软 X 射线实验站均采用超高真空固定腔体,在原有聚焦光路中增加新的大型衍射效率测试腔体需要进行拆除、安装、定位、准直等工作,难以在空间狭小、用户实验机时紧张的软 X 射线同步辐射束线上实施。因此有必要设计一种针对现有聚焦光路可快速安装和定位的小型光栅衍射效率测量装置,以节约用户机时、提高实验效率,对多层膜光栅制备提供高效及时的反馈。

多层膜光栅衍射效率理论计算可采用标量理论^[11]、微分理论^[12]、积分理论^[13]等。标量理论是一种近似理论,适用于近正入射情况,但要确定衍射效率曲线的形状和位置,必须使用微分理论和积分理论进行计算。微分方法本质上是一种频域方法,它

可以很好地解决横电波的衍射光栅问题^[14],之后发展的快速傅里叶分解方法解决了横磁波入射与金属光栅存在的数值收敛性问题^[15]。本文使用微分理论,对多层膜光栅入射角、光子能量和衍射效率的关系进行了理论计算,所得结果为闪耀光栅的制备和检测提供了理论依据。

本文介绍了一种小型化的光栅衍射效率检测装置,以现有 STXM (Scanning Transmission X-ray Microscope) 腔体为基础,搭建光栅效率检测装置;以多层膜闪耀光栅为基础,开展光栅衍射效率测试;基于经典的微分理论求解光栅衍射效率,分析多层膜闪耀光栅的衍射效率及其特性,以及多层膜光栅因制备引起的光栅闪耀角变化对衍射效率的影响,这些结果有助于多层膜闪耀光栅的研究。

2 仿真实验与实验设计

2.1 多层膜闪耀光栅基本理论

图 1 为多层膜闪耀光栅衍射示意图,光栅衍射满足光栅方程:

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中: α 、 β 、 d 、 m 和 λ 分别为入射角、衍射角、光栅常数、光栅级次和衍射波长。

闪耀光栅能够实现干涉零级和衍射中央主极大方向的分离,干涉主极大由光栅方程[(1)式]决定,将主极大移动至 m 级次需满足:

$$2d \sin \theta \sin \alpha = m\lambda, \quad (2)$$

式中: θ 为闪耀角。

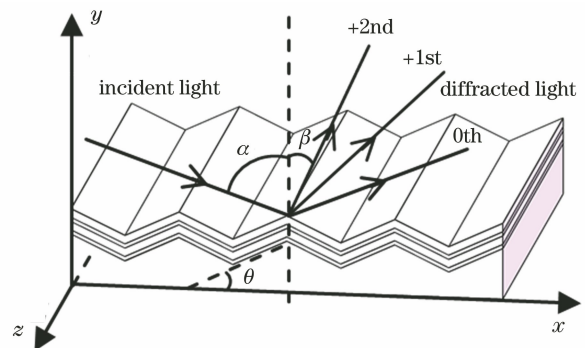


图 1 闪耀光栅衍射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blazed grating diffraction

分析多层膜光栅的衍射效率需要求解严格的波导方程,一般可采用微分法进行光栅衍射效率的计算^[16]。假设入射光是 TE 极化的平面波,TE 波的磁

场强度 \mathbf{H} 在 xy 平面内, 电场强度 \mathbf{E} 沿 z 轴方向的分量是一个非周期场, 可表示为傅里叶级数形式:

$$E_z(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} E_n(y) \exp(ia_n x), \quad (3)$$

式中: $E_n(y)$ 为 n 阶项的傅里叶系数; a_n 为第 n 阶项的光波矢在 x 方向上的投影。

在光栅的内部, 相对介电常数 ϵ 在 x 方向上有周期性, 因此引入周期函数 $k^2(x, y) = k_0^2 \epsilon(x, y)$, 其中 k_0 为真空波矢量的模量, $\epsilon(x, y)$ 为 (x, y) 处介质的相对介电常数。根据麦克斯韦方程组建立 TE 极化平面波的基本传播方程, 可以得到两个耦合的一阶微分方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{E}_z}{\partial y} = H_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial y} = -k^2(x, y) \tilde{E}_z - \frac{\partial^2 \tilde{E}_z}{\partial x^2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\tilde{E}_z = E_z / (j\omega\mu_0)$, 其中 ω 为角频率, μ_0 为真空介电常数; H_x 为磁场强度 \mathbf{H} 沿 x 轴方向的分量。

(4) 式是光栅微分理论的基本方程, 引入 \tilde{E}_z 、 H_x 和 k^2 的傅里叶分量 \tilde{E}_n 、 H_n 和 ϵ_n , 可以写出该方程组在傅里叶空间中的形式为

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{E}_n}{dy} = H_n \\ \frac{dH_n}{dy} = \alpha_n^2 \tilde{E}_n - k_0^2 \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \epsilon_{n-m} \tilde{E}_m \end{cases}, \quad (5)$$

传播方程被转换成(5)式所示的无穷多个耦合差分方程^[14]。 ϵ 和 \tilde{E}_z 都是分段光滑的有界周期函数, 不会同时出现阶跃点, 因此 $\epsilon \tilde{E}_z$ 可以使用 Laurent 规则进行分解^[17], 对 $\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \epsilon_{n-m} \tilde{E}_m$ 的 $-N$ 至 N 项进行截断近似。近似后在误差范围内截去高阶次衍射项, 将包含无穷个方程的耦合微分方程组变为包含有限个方程的耦合微分方程组, 得到一组傅里叶空间中的一阶微分方程。周期结构的电磁场求解没有求解麦克斯韦方程组的本征解, 而是转化为求解麦克斯韦方程组在傅里叶空间中的特征值问题^[14]。得到传播方程后, 需要将光栅轮廓分解为薄的水平切片, 创建水平界面, 并结合周期结构上下底的边界条件求解传播方程^[18], 最后借助 \mathbf{S} 矩阵传播算法^[19], 得到多层膜光栅的理论衍射效率。

2.2 检测装置和方法

衍射效率检测装置安装于上海光源软 X 射线 STXM 光束线站。上海光源储存环电子能量为 3.5 GeV, 运行束流强度为 240 mA。上海光源软 X

射线 STXM 光束线站如图 2(a) 所示, 光源为椭圆偏振波荡器 (EPU), 能量范围为 200~2000 eV, 前置弧矢聚焦镜 (CM)、变包含角等间距平面光栅单色器 (PGM) 和后置超环面镜 (TM) 分别距光源点 30, 32, 34 m, 经单色器色散后的单色光经超环面镜聚焦在单色光狭缝 (S2) 处 (距光源点 42 m)。S2 开口尺寸为 0.03 mm(h) × 0.01 mm(v) (其中 h 表示水平方向, v 表示垂直方向), 光束水平发散角为 1.0 mrad, 垂直发散角为 0.4 mrad, STXM 腔体 Si₃N₄ 窗口 (W1) 尺寸为 0.5 mm(h) × 0.5 mm(v), 距光源点 44 m, 光栅放置于窗口后 5 cm。STXM 光束线能量分辨率 ($E/\Delta E$) 约为 5000@500 eV, 样品光子通量能够达到 10¹¹ photon/s^[20]。

实验测试的多层膜光栅是基于“反向外延”原理在砷化镓 (GaAs) 衬底表面生长的超高线密度纳米平面光栅^[21-22], 区别于传统刻蚀光栅, 其线密度达到 20000 line/mm 以上, 是目前已知的大面积光栅中线密度最高的光栅样品之一, 其光栅周期为 46.7 nm, 闪耀角为 4.9°。样品衬底为 GaAs, 镀膜为 W/Si 膜, 其中 W 和 Si 的厚度分别为 1.38 nm 和 2.03 nm, 共镀膜 80 层, 样品大小为 0.5 cm (h) × 0.5 cm (v)。

由光栅方程[(1)式]可知, 在入射角 α 不变的情况下, 不同波长 λ 的衍射光对应不同的衍射角 β , 如图 2(a) 所示, 不同级次的衍射光被色散到不同角度。根据光栅衍射的原理, 设计如图 2(b) 所示的装置, 图 2(c) 为实物图。

光栅检测装置包括: 1) 光栅调节机构, 包括支架、光栅角度调节转台 (rotator 1) 和电机控制系统等, 转台控制光栅的转角, 型号为 Q-614, 最小位移为 100 μ rad, 转动范围 > 360°; 2) 狭缝, 二极管前放置狭缝 [尺寸为 6 mm(h) × 8 mm(v)], 用于隔离杂散光和限制特定级次衍射光, 狭缝距离二极管 4.4 cm; 3) 光子通量探测系统, 包括直通光和衍射光探测光电二极管 (PD)、支架、探测器角度调节转台 (rotator 2)、电机控制系统和皮安计等, 转台型号为 RS-40, 精度为 87 μ rad, 转动范围 > 360°。转台 1 与转台 2 分离无接触, 整体搭载在 STXM 三维移动平台上。

使用 SHADOW 软件追迹入射光斑和光栅衍射光斑, SHADOW 是一款主要用于同步辐射领域的光学系统仿真软件, 它基于几何光线跟踪方法, 能够超越几何光学系统的有效范围来确定波的特征^[23]。假设入射光的光子能量为 500 eV, Si₃N₄ 窗

口前入射光斑的追迹结果如图 3(a)所示,其中 X 和 Y 分别为光斑的横向尺寸和纵向尺寸,光斑尺寸为 1.95 mm(h)×0.50 mm(v),光栅面入射光斑的追迹结果如图 3(b)所示,光斑尺寸为 1.84 mm(h)×

0.50 mm(v),远小于光栅样品的尺寸。0 级衍射光斑追迹结果如图 3(c)所示,光斑尺寸为 0.51 mm(h)×0.50 mm(v);+1 级衍射光斑追迹结果如图 3(d)所示,光斑尺寸为 0.76 mm(h)×0.50 mm(v)。

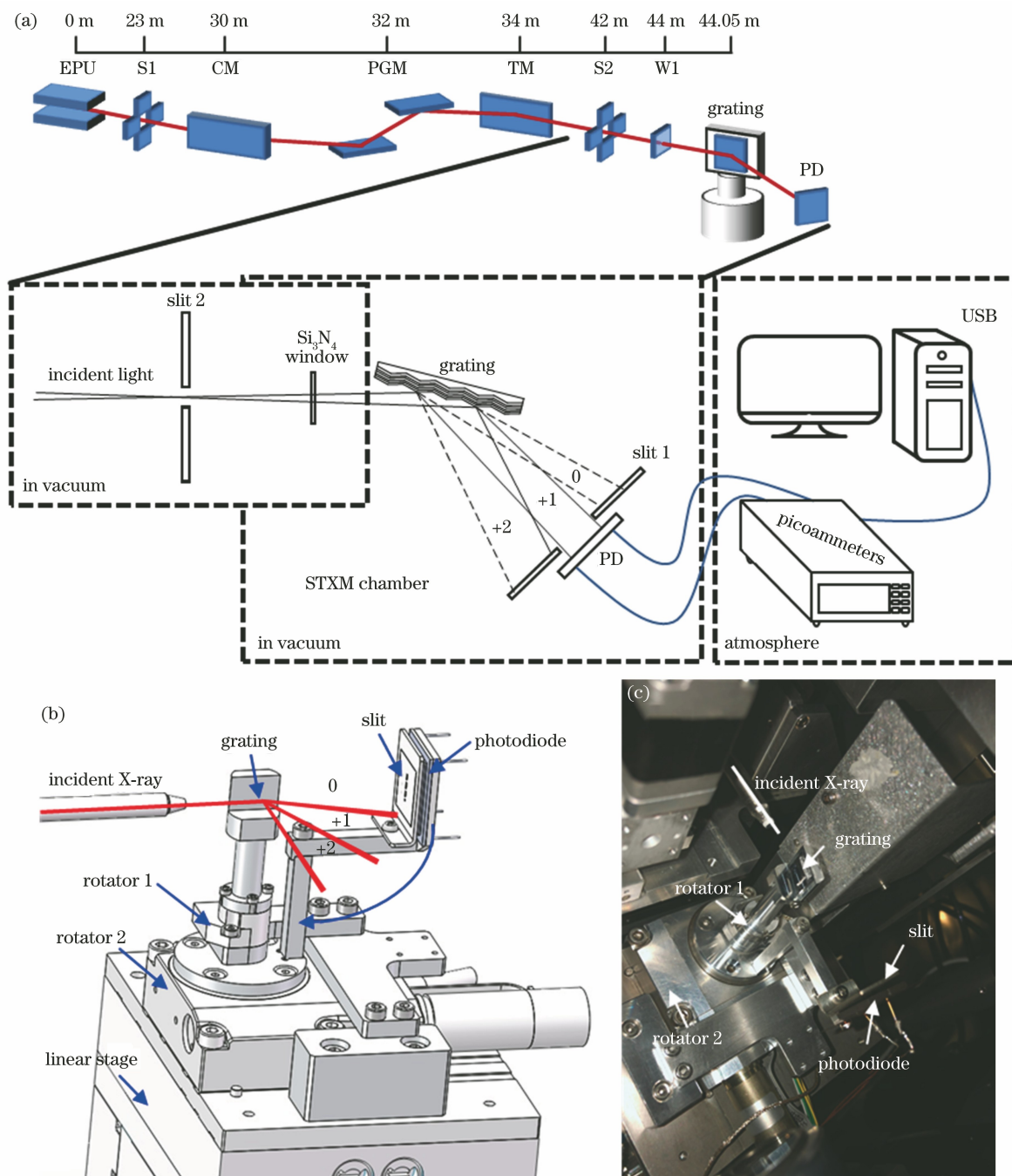


图 2 光栅衍射效率测试装置图。(a) STXM 光束的传播示意图;(b)装置 3D 图;(c)装置组装图
 Fig. 2 Experimental setup for testing grating diffraction efficiency. (a) Propagation of STXM beam;
 (b) 3D sketch-map of setup; (c) picture of setup assembly

光栅同一衍射级的衍射角会随着光子能量的改变而变化,在该级次衍射角范围内,转动二极管与狭缝进行扫描,选取二极管信号最大值作为对应的衍射效率。改变入射光光子能量,重复上述操作,记录

不同能量入射光入射时的衍射光电流信号,进行数据处理后得到衍射效率曲线。实验过程中入射光存在强度起伏,多次读取皮安计的计数并取平均值作为实验结果;STXM腔体内存在激光干涉仪等发光

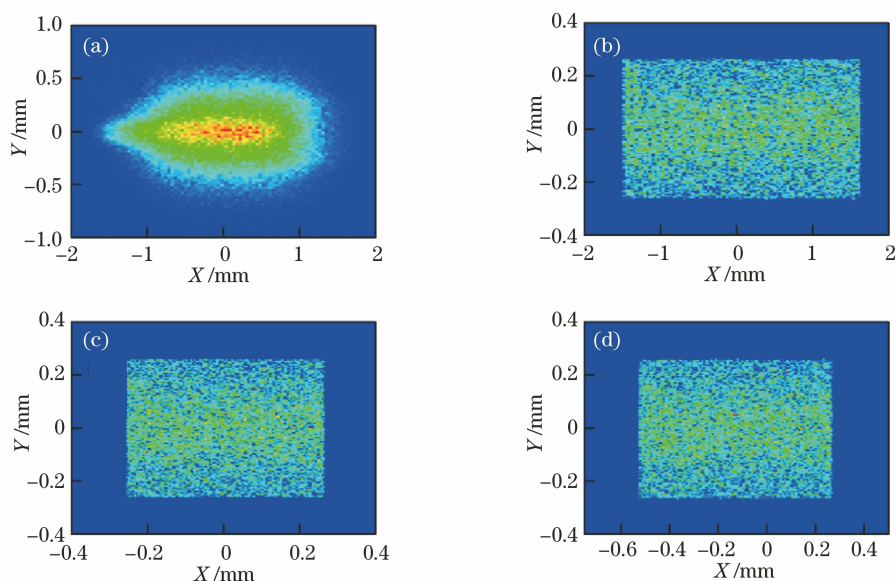


图 3 500 eV 能量下 SHADOW 追迹结果。(a) Si_3N_4 窗口前入射光光斑;(b)光栅上光斑;
(c)二极管上 0 级衍射光斑;(d)二极管上 +1 级衍射光斑

Fig. 3 Ray-tracing results at 500 eV simulated by SHADOW. (a) Incident beam cross-section before Si_3N_4 window;
(b) spot on grating; (c) 0th order diffraction spot on photodiode; (d) +1st order diffraction spot on photodiode

设备,由于光电二极管对可见光存在响应,因此实验前关闭腔体发光设备,遮挡腔体窗口,以保证腔体内部无其他光源;同时二极管暗电流与温度等相关,每次实验都在无光入射情况下测试二极管的平均信号,在实验处理时对其进行扣除。

3 分析与讨论

衍射效率仿真按照实验样品的参数,选取实际样品表面的闪耀角,光栅表面假定为理想的锯齿形,入射光为 TE 极化的软 X 射线。图 4 为计算得到的

不同入射角和不同光子能量下的 0 级和 +1 级次的衍射效率曲面图。由于多层膜的作用,多层膜光栅的衍射效率曲线呈现峰状,不同级次的峰会随着入射角的增大而分开,导致衍射光只存在 0 级光或 +1 级光,其他级次的衍射光因为不满足布拉格条件或没有被主极大光覆盖导致强度接近为 0。在如图 4 所示的能量和角度范围内,0 级衍射效率峰值对应的光子能量为 1000 eV,掠入射角为 10.80° (对应的入射角 α 为 79.20°),+1 级峰值对应的光子能量为 1000 eV,掠入射角为 6.84° 。

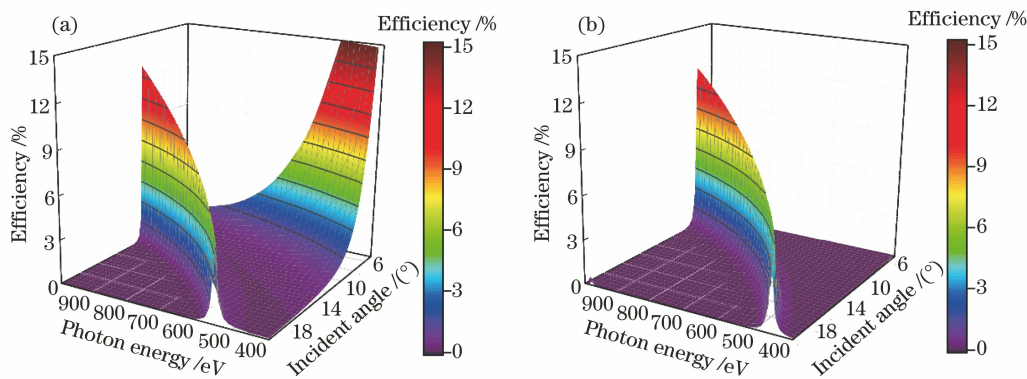


图 4 衍射效率随光子能量和入射角的变化。(a) 0 级次;(b) +1 级次

Fig. 4 Diffraction efficiency versus photon energy and incident angle. (a) 0th order; (b) 1st order

图 5 是从图 4 选取入射角为 13° 和 15° 时的光栅衍射效率曲线。多层膜光栅能够在入射光不使用掠入射模式下产生衍射光,同一入射角匹配窄带的峰。随着入射角的增加,0 级和 +1 级衍射峰往低能级移

动,当角度从 13° 增加到 15° 时,0 级和 +1 级的峰位分别移动了 110 eV 和 66 eV,这种特点对设计符合光学系统需求的多层膜光栅提出了更高的要求^[24]。

用衍射效率测试装置测试多层膜光栅样品在固

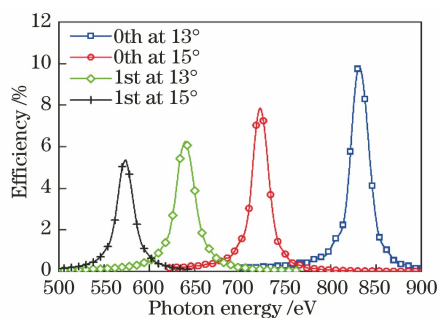


图 5 13°和 15°入射时 0 级和 +1 级次衍射效率与光子能量的关系

Fig. 5 Diffraction efficiency of 0th and 1st orders versus photon energy at incident angles of 13° and 15°

定掠入射角下的衍射效率。掠入射角为 15.8°, 单色器光子能量扫描范围为 480~730 eV, 步长为 5 eV, 测得衍射效率如图 6(a) 所示, 图 6(b) 为仿真结果。多层膜光栅实际制备的闪耀角与膜厚和理论值有偏差, 以及掠入射角的测量误差, 都会导致实际

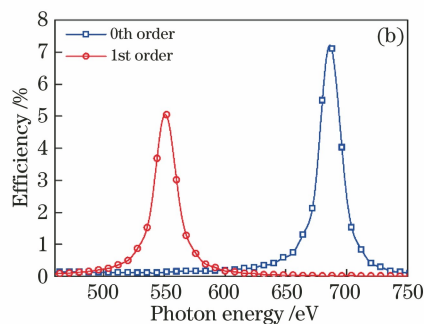
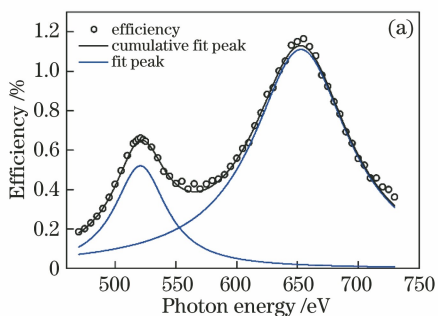


图 6 15.8°入射时 0 级、+1 级衍射效率与光子能量的关系。(a) 实验结果; (b) 计算结果

Fig. 6 Relationship between diffraction efficiency of 0th and 1st orders and photon energy at incident angle of 15.8°.

(a) Experimental results; (b) calculated results

在入射角分别为 15.8°、16.4°、16.8° 的情况下测试 +1 级次不同光子能量的衍射效率曲线, 所得

结果如图 7(a) 所示, 图 7(b) 为仿真结果, 可以看到实验测得峰值的变化趋势与仿真结果相同。

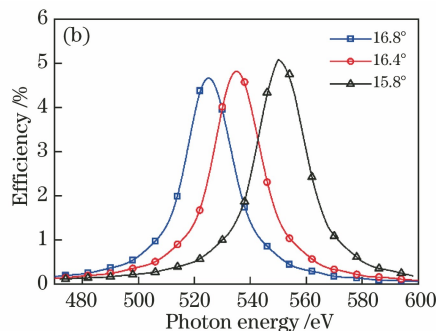
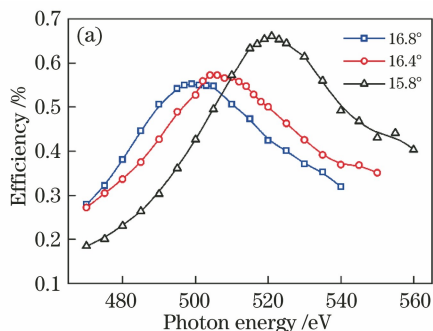


图 7 不同入射角下 +1 级衍射效率与光子能量的关系。(a) 实验结果; (b) 计算结果

Fig. 7 Relationship between 1st order diffraction efficiency and photon energy at different incident angles.

(a) Experimental results; (b) calculated results

测量的衍射峰相比仿真结果发生偏移。

实验过程中发现: 当光子能量处于两峰之间时, 0 级与 +1 级衍射光斑在空间位置上无法分离。为了描述衍射效率峰, 使用 Lorentz 函数对图 6(a) 进行拟合并分峰, Lorentz 函数为

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{\omega}{4(x - x_c)^2 + \omega^2}, \quad (6)$$

式中: ω 、 x_c 和 $2A/(\pi\omega + y_0)$ 分别为峰的半峰全宽、峰中心位置和峰高度。对原始数据进行分峰, 可以得到如图 6(a) 所示的两个峰与其叠加值。图 6(a) 中 0 级和 +1 级次峰中心 x_c 分别位于 653 eV 和 521 eV, 峰中心差值为 132 eV, 衍射效率峰值 $2A/(\pi\omega + y_0)$ 分别为 1.11% 和 0.52%; 图 6(b) 中 0 级和 +1 级次峰中心分别位于 686 eV 和 551 eV, 峰中心差值为 135 eV, 衍射效率峰值分别为 7.51% 和 5.23%, 实验得到的 0 级和 +1 级衍射效率分别达到理论仿真结果的 15% 和 10%。

在固定光子能量的情况下,改变入射光的入射角度,测试多层膜光栅入射角与衍射效率的关系曲线,实验结果和仿真结果分别如图 8(a)和图 8(b)所示。提取实验结果峰值位置与仿真结果峰值位置,

绘制图 9 所示对比图,可以看到实验结果与仿真结果中入射角相对于光子能量具有相同的变化趋势,实验测得变化斜率为 $-0.0443 (^{\circ})/\text{eV}$,仿真中变化斜率为 $-0.0425 (^{\circ})/\text{eV}$ 。

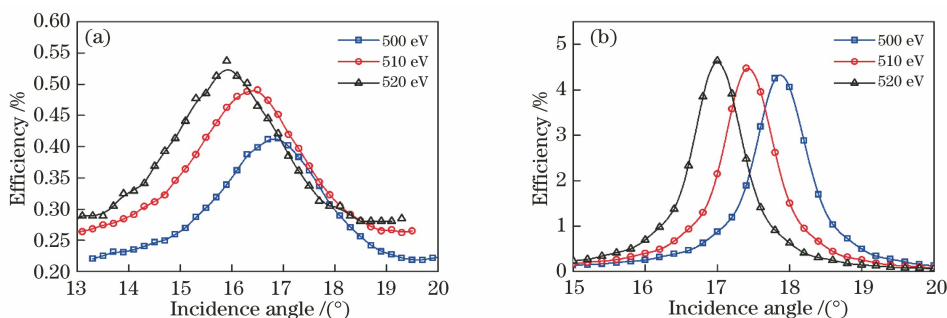


图 8 不同光子能量下+1 级衍射效率与入射角的关系。(a)实验结果;(b)仿真结果

Fig. 8 Relationship between 1st order diffraction efficiency and incident angle at different photon energy.

(a) Experimental results; (b) calculated results

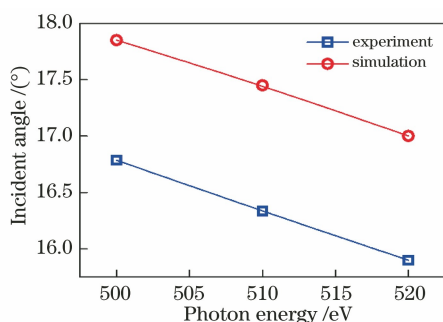


图 9 实验与仿真得到的峰值位置处入射角与光子能量的变化关系

Fig. 9 Relationship between incidence angle and photon energy at peak value obtained by experiment and simulation

多层膜光栅的衍射效率强烈依赖于整体复合结构中锯齿状层是否足够理想,沟槽轮廓畸变和多层界面的粗糙化程度会影响衍射效率^[25-26]。理想情况下,在衬底上镀制 W/Si 多层膜后,多层膜光栅的表面结构会与衬底结构一致。但是实际情况下,在镀

制多层膜的过程中,多层膜的轮廓会逐步发生变化,基底的闪耀角会逐渐退化。从图 10(a)所示的光栅切面透射电镜图可以看出:闪耀光栅的槽顶与槽底出现了圆角。其次,膜层与膜层之间存在一定融合,这些都会对多层膜光栅的衍射效率产生影响;光栅刻槽的粗糙度会造成部分衍射光变为杂乱的漫反射,影响衍射效率;另外,样品在大气环境中的转运会附着灰尘等杂质颗粒,因此会影响粗糙度,降低衍射效率。这也是测试结果与仿真结果出现差异的原因之一。

同时结果显示软 X 射线多层膜闪耀光栅展现了与常规单层膜光栅不同的特点:多层膜光栅的衍射效率曲线在特定光子能量处出现峰值;衍射效率峰会随着入射角的变化而移动;多层膜光栅只会展现某些级次的衍射光,而其他级次的衍射光由于不满足多层膜的布拉格条件而趋于消失。图 10(b)为表面原子力显微镜(AFM)测试结果。

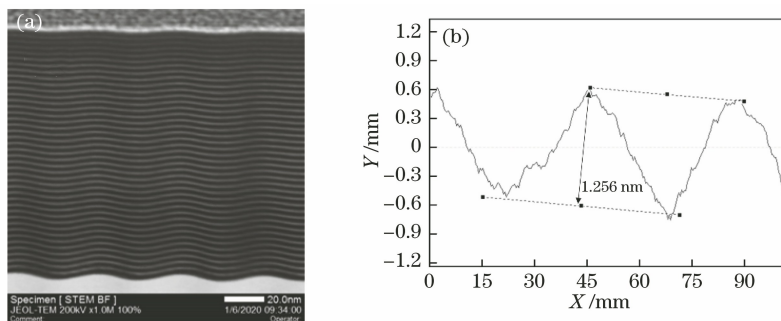


图 10 多层膜光栅结构测试。(a)光栅截面透射电镜测试图;(b)表面原子力显微镜(AFM)测试结果

Fig. 10 Structure test of multilayer coated grating. (a) Cross-sectional TEM image of grating; (b) AFM result of grating

4 结 论

介绍了一种小型的测试多层膜光栅衍射效率的同步辐射光检测装置,该装置适用于现有的 STXM 腔体,可快速安装拆卸并可用于测试光栅衍射效率。在 480~730 eV 波段使用同步辐射光完成 W/Si 多层膜光栅的衍射效率的测试,实验测得 0 级和 +1 级峰值光子能量差值为 132 eV, +1 级衍射效率为 0.5%。实验结果显示该装置可有效测量多层膜光栅的衍射效率,多层膜光栅受到多层膜的影响,随着光子能量的改变,光栅衍射效率曲线会呈现峰状,测试结果符合预期的衍射规律。后续可基于该装置研制独立腔体,内置高精度电机控制的反射仪与光电二极管等探测器,进行精确的角度扫描,以表征各类光栅的衍射效率,从而为实用光栅的研制提供测试手段。

参 考 文 献

- [1] Lü L J. Study of ultraviolet and soft X-ray varied line-space plane grating monochromator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(1): 141-144.
吕丽军. 极紫外、软 X-射线变线距平面光栅单色仪的研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(1): 141-144.
- [2] Li Z, Li B. Design of novel keV-range grating spectrometer with ultra-high resolving power [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0822001.
李卓, 李宾. 一种新型 KeV 波段超高分辨光栅光谱仪设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0822001.
- [3] Guo Z, Meng X Y, Wang Y, et al. Effects of temperature, mechanical motion and source positional jitter on the resolving power of beamline 02B at the SSRF [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, 24(4): 877-885.
- [4] Meng X Y, Guo Z, Wang Y, et al. Design and performance of bending-magnet beamline BL02B at the SSRF [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2019, 26(2): 543-550.
- [5] Zhang X M, Guo Z, Meng X Y, et al. Design of an online spectrometer for the diagnosis of free-electron lasers [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2020, 27(4): 870-882.
- [6] Chen Z H, Li J Q, Zhao Z L, et al. Establishment and application of testing method for fluorescence based soft X-ray absorption spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0330002.
陈振华, 李俊琴, 赵子龙, 等. 软 X 射线荧光吸收谱测试方法的建立与应用[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0330002.
- [7] Voronov D L, Ahn M, Anderson E H, et al. High-efficiency 5000 lines/mm multilayer-coated blazed grating for extreme ultraviolet wavelengths [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2615-2617.
- [8] Yang X W, Wang H C, Hand M, et al. Design of a multilayer-based collimated plane-grating monochromator for tender X-ray range [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, 24(1): 168-174.
- [9] Schäfers F, Bischoff P, Eggenstein F, et al. The at-wavelength metrology facility for UV-and XUV-reflection and diffraction optics at BESSY-II [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2016, 23(1): 67-77.
- [10] Eggenstein F, Bischoff P, Gaupp A, et al. A reflectometer for at-wavelength characterization of XUV-reflection gratings [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9206: 920607.
- [11] Goray L I, Seely J F. Wavelength separation of plus and minus orders of soft-X-ray-EUV multilayer-coated gratings at near-normal incidence [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5900: 59000C.
- [12] Nevière M. Bragg-Fresnel multilayer gratings: electromagnetic theory [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(6): 1835-1845.
- [13] Goray L I. Numerical analysis of the efficiency of multilayer-coated gratings using integral method [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 536(1/2): 211-221.
- [14] Nevière M. Multilayer coated gratings for X-ray diffraction: differential theory [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(9): 1468-1473.
- [15] Popov E, Nevière M. Grating theory: new equations in Fourier space leading to fast converging results for TM polarization [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2000, 17(10): 1773-1784.
- [16] Nevière M, Popov E. Grating electromagnetic theory user guide [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 1997, 41(4): 315-323.
- [17] Li L F. Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(9): 1870-1876.
- [18] Lin H. Multilayer-coated gratings in the extreme-ultraviolet wavelength region: fabrication of bare grating substrates and measurement and analysis of diffraction efficiency [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009: 20-30.

- 林慧. 极紫外多层膜光栅的浮雕衬底制作及衍射效率测量与分析[D]. 北京: 清华大学, 2009: 20-30.
- [19] Li L F. Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(5): 1024-1035.
- [20] Zhang L J, Xu Z J, Zhang X Z, et al. Latest advances in soft X-ray spectromicroscopy at SSRF [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, 26(4): 040101.
- [21] Huang Q S, Jia Q, Feng J T, et al. Realization of wafer-scale nanogratings with sub-50 nm period through vacancy epitaxy [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2437.
- [22] Zhu J T, Zhang S M, Wang B, et al. SiC/Mg multilayer film reflective mirror at 30.4 nm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 735-738.
朱京涛, 张淑敏, 王蓓, 等. 30.4 nm 波长 SiC/Mg 多层膜反射镜 [J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 735-738.
- [23] del Rio M S, Canestrari N, Jiang F, et al. SHADOW3: a new version of the synchrotron X-ray optics modelling package [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2011, 18(5): 708-716.
- [24] Voronov D L, Salmassi F, Meyer-Ilse J, et al. Refraction effects in soft X-ray multilayer blazed gratings [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11334-11344.
- [25] Voronov D L, Anderson E H, Gullikson E M, et al. Ultra-high efficiency multilayer blazed gratings through deposition kinetic control [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1628-1630.
- [26] Deng Q W, Zhang R Z, Sun N C. Influence of partial structure error of rectangular grating on diffraction efficiency [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(5): 45-50.
邓启威, 张蓉竹, 孙年春. 矩形光栅局部结构误差对衍射效率的影响 [J]. *激光技术*, 2019, 43(5): 45-50.