

透射光栅对软 X 射线衍射效率的研究^{*}

杨家敏 易荣清 陈正林 孙可煦 丁耀南 郑志坚 李朝光

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

崔明启 朱佩平 崔聪悟

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

(1997 年 7 月 31 日收到; 1997 年 10 月 20 日收到修改稿)

在北京同步辐射源上, 对无底衬透射光栅在 844 eV X 射线能量点的绝对衍射效率进行了实验标定, 利用光栅模型, 得到了光栅所有结构参数, 并由此得到了透射光栅对 100—2000 eV 能区软 X 射线的各级绝对衍射效率理论计算曲线.

PACC: 4280F; 4272; 4285

1 引 言

透射光栅在软 X 射线能谱测量中作为一种重要的色散元件得到了广泛的应用^[1], 但要用透射光栅进行软 X 射线能谱的定量测量, 必须准确知道其各级绝对衍射效率. 对透射光栅的各级绝对衍射效率的确定有两类方法: 一类是通过在足够多的 X 射线能量点进行绝对效率的实验标定, 直接给出透射光栅的各级衍射效率随入射 X 射线能量的变化曲线; 另一类方法就是通过在几个有限 X 射线能量点进行透射光栅各级衍射效率的实验标定, 给出透射光栅的结构参数, 然后由适当的理论模型及透射光栅的结构参数, 理论计算给出透射光栅的各级绝对衍射效率曲线. 国内外分别用两类方法对透射光栅衍射效率进行过一系列的研究^[2-5]. 在北京同步辐射源上, 我们采用与国外不同的实验方法对透射光栅在 844 eV 能量点的各级绝对衍射效率进行了实验标定, 给出了透射光栅的全部结构参数, 用理论模型计算了透射光栅在 100—2000 eV 能区的各级绝对衍射效率曲线, 并对理论模型及参数的有效性进行了讨论.

2 透射光栅的结构

透射光栅是由中国科学技术大学同步辐射实验室制作的无底衬自支撑透射光栅, 光栅结构如图 1 所示, 标称光栅线数为 $1050 \text{ L} \cdot \text{mm}^{-1}$. 它由周期排列的金栅线及较宽的金支撑条结构组成.

^{*} 中国工程物理研究院基金和国家高技术研究发展计划资助的课题.

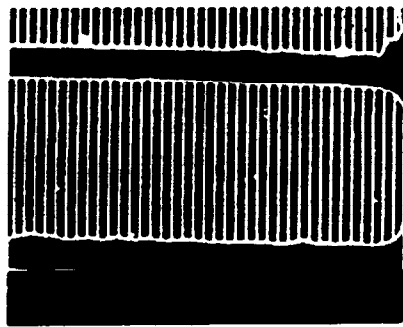


图 1 透射光栅结构的电子显微镜扫描图

3 透射光栅衍射效率的实验标定

3.1 透射光栅各级相对衍射效率的实验标定

实验排布如图 2, 同步辐射光经滤片滤光后掠入射到多层镜上, 通过调整掠入射角, 在多层镜反射方向可得到能量为 844 eV 的单色 X 射线^[5]. 多层镜后的铜滤片可去除可见光及其他能区的 X 射线, 提高多层镜反射方向 X 射线的单色性. 在多层镜反射方向放置带狭缝的透射光栅, 单色 X 射线正入射到透射光栅上, 经透射光栅衍射和干涉, 在远场不同空间位置上形成该单色 X 射线的各级衍射象, 用上海 5 FW 软 X 射线胶片记录各衍射级的黑密度, 透射光栅与记录面的垂直距离为 156.2 mm, 透射光栅对 844 eV 能量点 X 射线的衍射谱黑密度扫描如图 3. 利用上海 5 FW 胶片的响应曲线, 将各级衍射谱黑密度转换成 X 射线曝光量, 即得到透射光栅的各级相对衍射效率, 两次实验结果见表 1.

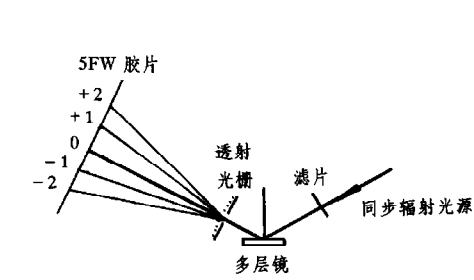


图 2 透射光栅相对衍射效率标定实验布置

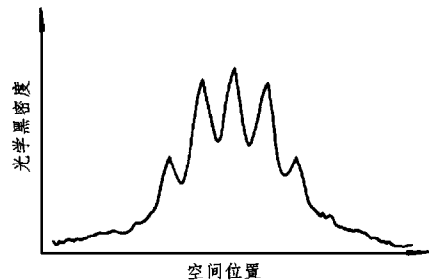


图 3 透射光栅对 844 eV 能量点 X 射线的衍射谱黑密度扫描图

表 1 透射光栅相对衍射效率和光栅周期的实验标定结果

No.	$I[1]/I[0]$	$I[2]/I[1]$	$d/\mu\text{m}$
1	0.762	0.220	0.909
2	0.781	0.312	0.918

注:表中光栅周期参数 d 由各衍射级峰值位置 y_m 通过光栅公式计算得到.

3.2 透射光栅对单能 X 射线透过率的实验标定

实验排布如图 4 所示. 在多层镜反射方向并垂直于出射单色 X 射线的平面旋转器上不同位置分别安装上透射光栅和狭缝, 狭缝尺寸与透射光栅上狭缝尺寸一致. 通过旋转器的转动, 可使狭缝和透射光栅交替位于多层镜出射光路上, 在旋转器后离旋转器 40 mm 处用硅光二极管标准探测器测量透过狭缝或透射光栅的单色 X 射线信号, 标准探测器暗电流为小于 3 pA, 探测器灵敏面尺寸为 10 mm×10 mm. 由于硅光二极管标准探测器对单能 X 射线的响应在其动态范围内成线性关系, 并且探测器能全部记录透射光栅与各级衍射 X 射线, 所以测得的透过透射光栅与狭缝的信号比值即为透射光栅的透过率. 通过选取多层镜前不同的滤片材料和调整多层镜的掠入射角, 在三个能量点处对透射光栅的透过率进行了多次实验测量, 结果见表 2.

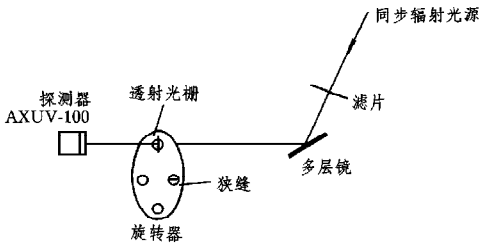


图 4 透射光栅对单能 X 射线透过率测量实验布置

表 2 透射光栅对三个能量点 X 射线的透过率实验测量结果

能量点/eV	I_0/nA	I_1/nA	I_1/I_0	$(I_1/I_0)_a$
270	6.38	1.27	0.199	0.204 ± 0.022
	6.30	1.16	0.184	
	6.20	1.22	0.197	
	5.00	1.18	0.236	
660	0.740	0.173	0.234	0.223 ± 0.007
	0.750	0.162	0.216	
	0.690	0.153	0.222	
	0.690	0.152	0.220	
	0.690	0.154	0.223	
844	5.05	1.300	0.257	0.248 ± 0.010
	3.97	1.010	0.254	
	3.85	0.940	0.244	
	4.30	1.010	0.235	

该透射光栅高于二级的衍射效率很低, 所以只考虑透射光栅零到二级衍射, 则透射光栅的透过率为

$$T \cong \eta_0 + 2 \eta_1 + 2 \eta_2,$$
(1)

其中 η_0 , η_1 和 η_2 分别为各级绝对衍射效率, 由实验标定的各级相对衍射效率和透射光栅对 844 eV 能量 X 射线的透过率可得到透射光栅在 844 eV 能量点处的零到二级绝对衍射

效率,两次实验测量结果见表 3.

表 3 透射光栅对 844 eV 能量点 X 射线的绝对衍射效率测量结果

No.	零级	一级	二级
1	0.0905	0.0690	0.0152
2	0.0813	0.0635	0.0198

4 光栅模型^[3]

光栅栅线截面采用矩形近似,则光栅 m 级的绝对衍射效率为

$$n^{(m)}(q)/N_0(q) = [\sin(M\mu m\pi)/M\sin m\pi]^2 [\sin((a/d)m\pi)/m\pi]^2 \times [1 + \exp(-2qzk) - 2\exp(-qzk)\cos(qz\delta)] \quad m \neq 0, \quad (2)$$

$$n^{(0)}(q)/N_0(q) = (a/d)^2 + (1 - a/d)^2 \exp(-2qzk) + 2(a/d)(1 - a/d) \times \exp(-qzk)\cos(qz\delta) \quad m = 0, \quad (3)$$

且 $N_0(q) = n_0(q)(1 - f)T(q)$, 其中 $q = E/\hbar c$; $n_0(q)$ 为入射到光栅上的光强; f 为光栅支撑条所占面积比; $T(q)$ 为有底衬光栅底衬对 X 射线的透过率(对无底衬自支撑透射光栅, $T(q) = 1$); E 为 X 射线光子能量, M 为光栅线数(X 射线照射部分); a/d , z 分别为光栅的透光部分与光栅周期之比和栅线厚度; k 为栅线材料光学常量的虚部, $n = 1 - \delta$ 是栅线光学常量的实部.

5 透射光栅的结构参数 a/d , z , f 的确定

从(2)式可得到透射光栅的二级与一级相对衍射效率为

$$n^{(2)}(q)/n^{(1)}(q) = [\sin[2(a/d)\pi]/2\sin(a/d)\pi]^2. \quad (4)$$

利用(4)式和表 1 中的透射光栅的二级与一级相对衍射效率的两次实验结果,可以拟合给出光栅的透光部分与光栅周期的比值 a/d 为 0.325.

从(2), (3)式可得到透射光栅的一级与零级的相对衍射效率表达式如下:

$$n^{(1)}(q)/n^{(0)}(q) = [\sin(a/d)\pi/\pi]^2 \times \frac{1 + \exp(-2qzk) - 2\exp(-qzk)\cos(qz\delta)}{(a/d)^2 + (1 - a/d)^2 \exp(-2qzk) + 2(a/d)(1 - a/d)\exp(-qzk)\cos(qz\delta)}. \quad (5)$$

由上面已知的 a/d 值,利用(5)式及表 1 中的实验结果,拟合给出透射光栅栅线厚度 z 为 0.163 μm .

由(1), (2)和(3)式可以知道,透射光栅对单能 X 射线的透射率为

$$T \cong (1 - f)[n^{(0)}(q)/N_0(q) + 2n^{(1)}(q)/N_0(q) + 2n^{(2)}(q)/N_0(q)]. \quad (6)$$

由已确定的透射光栅 a/d , z 参数,通过(2), (3), (6)式和表 2 中实验测得的 844 eV 单能量点处 X 射线的透射率,给出透射光栅的支撑结构占整个光栅面积比 f 为 0.323.

由确定的透射光栅的结构参数 a/d , z 和 f 值,由(2), (3)式可以计算得到透射光栅的各级绝对衍射效率 $n^{(m)}(q)/n_0(q)$ 在 100—2000 eV 能区曲线见图 5.

6 讨 论

由确定的透射光栅结构参数通过(2)式计算可知:在 100—2000 eV 能区该透射光栅的高于二级的衍射效率只有一级衍射效率的 5% 以下,所以在前面确定透射光栅的结构参数 f 值和给出透射光栅在 844 eV 能量点处各级绝对衍射效率时,不考虑高于二级的衍射的处理是合理的,在用该透射光栅进行能谱测量时,数据处理高级衍射时也只需考虑到二级衍射。

如果透射光栅栅线截面偏离矩形近似较大,对不同能量的 X 射线其结构参数等效 a/d 和 z 将不同,由(2),(3)和(6)式用在 844 eV 能量点处实验结果确定的透射光栅结构参数,计算得到该透射光栅对 100—2000 eV 能区的单能 X 射线的透过率曲线与实验测量结果的比较见图 6。从图 6 中看到,在几个能量点的透过率结果与用同一结构参数等效值计算的透过率曲线在实验误差范围内符合较好,说明该透射光栅对不同能量 X 射线具有同一等效结构参数,因此,该透射光栅栅线截面采用矩形近似较好,用上述结构参数及光栅模型计算得到的光栅各级绝对衍射效率曲线(见图 5)是可靠的。

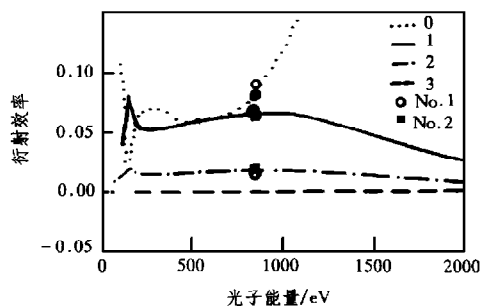


图 5 透射光栅的各级绝对衍射效率计算曲线

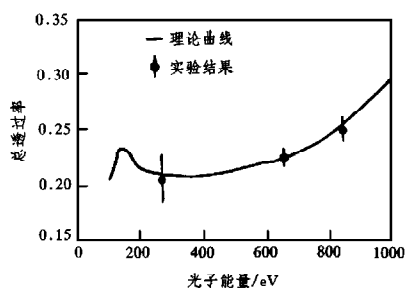


图 6 透射光栅对单能 X 射线的透过率计算曲线与测量值的比较

7 结 论

在同步辐射源上对透射光栅进行实验标定,得到了透射光栅的结构参数,通过适当的光栅模型及确定的光栅结构参数,最后得到了透射光栅在 100—2000 eV 能区的各级绝对衍射效率曲线。

- [1] N. M. Ceglio, R. L. Kauffman *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**(1983), 318.
- [2] H. Brauning, P. Presehl *et al.*, *Appl. Opt.*, **18**(1979), 368.
- [3] H. W. Schnopper, L. P. van Speybroeck *et al.*, *Appl. Opt.*, **16**(1977), 1088.
- [4] Li Yao-lin, Bai Wen-gan *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **9**(1989), 550 (in Chinese).
- [5] Yang Jia-min, Yi Rong-qing *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **16**(1996), 1631 (in Chinese).

STUDY OF TRANSMISSION GRATING DIFFRACTION EFFICIENCIES FOR SOFT X-RAYS *

YANG JIA-MIN YI RONG-QING CHEN ZHENG-LIN SUN KE-XU

DING YAO-NAN ZHENG ZHI-JIAN LI CHAO-GUANG

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003*)

CUI MING-QI ZHU PEI-PING CUI CONG-WU

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

(Received 31 July 1997; revised manuscript received 20 October 1997)

ABSTRACT

Absolute diffraction efficiencies of a transmission grating at a photon energy of 844 eV have been calibrated on synchrotron radiation source. With the aid of grating model, all structure parameters of the grating are obtained and absolute diffraction efficiencies for soft X-rays in the range of 100—2000 eV are calculated and discussed.

PACC: 4280F; 4272; 4285

* Project supported by the China Academy of Engineering Physics and the National High Technology Development Program of China.