

透射光栅衍射率的实验标定和数值计算*

杨家敏 易荣清 马洪良 陈正林 王红斌 孙可煦 温树槐 郑志坚 唐道源

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

崔明启 黎 刚 崔聪悟

(中国科学院北京高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要 简要介绍了实验室中使用的三种透射光栅的结构。在北京同步辐射源上实验标定了这些光栅的相对衍射效率。借助于光栅模型, 得到了光栅的重要结构参数, 并对光栅的绝对衍射效率进行了模拟计算和讨论。

关键词 透射光栅, 相对衍射效率, 绝对衍射效率, 结构参数.

1 引 言

由于透射光栅具有测谱范围宽, 谱分辨较好及与记录元件匹配简单等特点, 被广泛应用于软 X 光能谱测量中。在惯性约束聚变研究中, 它也是一种重要的测谱工具^[1,2], 为了能用透射光栅进行软 X 光能谱的定量测量, 必须知道其衍射效率。为此, 国内外多家实验室对自己使用的透射光栅进行过一系列的实验标定和理论模拟计算^[3~5]。在北京同步辐射源上, 作者利用单色性很好的软 X 光源, 对用于惯性约束聚变研究的三种透射光栅进行了实验标定, 给出了三种光栅的重要结构参数, 并用相应的光栅模型, 计算了三种光栅的绝对衍射效率。

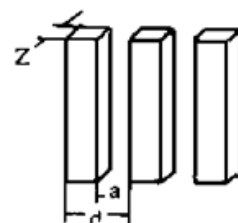


Fig. 1 Schematic configuration of transmission grating (TG)

2 透射光栅的结构

透射光栅是按周期平行排布的金栅线构成, 如图1。假设栅线截面为矩形, 光栅结构参数

Table 1. Nominal structure parameters for three kinds of TG (transmission grating)

TG	substrate and thickness (μm)	f	d (μm)	a/d	Z (μm)
1 [#]	no	0.176	1.40	1/4~ 1/2	0.6
2 [#]	CH 0.27	0.0	1.14	0.5	0.5
3 [#]	no	unknow	1.00	0.5	0.5

* 国家科委863高科技资助项目。

收稿日期: 1995年7月18日; 收到修改稿日期: 1996年3月4日

为: 光栅周期常数 d ; 栅线间空隙 a ; 栅线厚度 Z 。三种透射光栅中一个是有底衬的狭缝光栅 ($2^\#$); 另外两个是无底衬光栅, 其中一个为自支撑狭缝光栅 ($1^\#$), 另一个为自支撑针孔光栅 ($3^\#$)。这三个光栅的标称结构参数见表1。

3 透射光栅的实验标定

3.1 实验标定原理与方法

实验装置如图2所示。连续的同步辐射 X 光先通过滤片膜除去可见光(滤片也能降低低能 X 光, 从而减少多层镜对低能 X 光的全反射份额, 提高单色性)后, 掠入射到多层镜上, 在多层镜的反射方向得到单色 X 光。单色 X 光的波长 λ 与掠入射角 θ 满足布喇格公式:

$$2 d' \sin \theta = \lambda \tag{1}$$

式中: d' 为多层镜的周期厚度。

调整掠入射角 θ , 可在反射方向得到不同波长的单色 X 光作为 X 光源。单色软 X 光正入射到透射光栅上, 经透射光栅的衍射和干涉, 在远场不同空间位置形成该单色光的各级衍射像, 各衍射级峰位置 Y_m 由下式决定:

$$Y_m = m D N d \tag{2}$$

式中: m 为衍射级数; d 为光栅周期常数; λ 为入射单色光波长; $D = 156.2 \text{ mm}$ 为光栅到记录平面垂直距离。

在记录平面上, 用上海产软 X 光胶片记录各衍射级的黑密度, 同时, 在位标定了软 X 光胶片的相对响应特性。

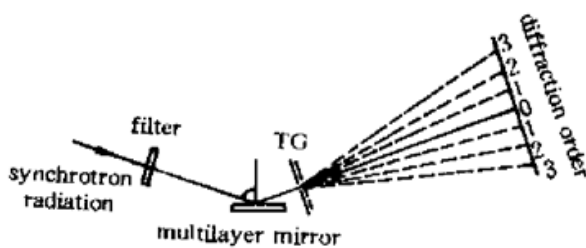


Fig. 2 Experimental arrangement for TG calibration

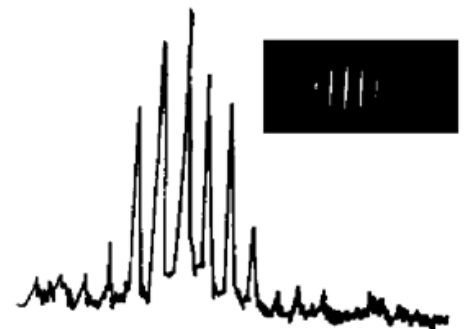


Fig. 3 Typical spectrogram and microdensitometer scan of TG ($1^\#$) calibration

3.2 透射光栅相对衍射效率的实验标定结果

Table 2. Experimental results for the three kinds TG

TG	photon energy	$I(1)/I(0)$	$I(2)/I(1)$	$I(3)/I(1)$	$d (\mu\text{m})$
$1^\#$	276eV	0.796	0.390	0.0496	1.37
	930eV	unknow	0.336	0.0544	
$2^\#$	276 eV	0.451	0.0151	0.0419	1.12
	930 eV	0.681	0.0572	0.0617	
$3^\#$	276 eV	0.602	0.414	0.127	0.990
	930 eV	0.712	0.431	0.0613	

在多层镜前分别加 C 膜和 Cu 膜, 并调整多层镜掠入射角, 在多层镜反射方向分别得到 276 eV 和 930 eV 两能点的单色 X 光, 对三种透射光栅的相对衍射效率进行了实验标定, 标定结果见表 2。典型的谱图及黑度扫描见图 3。表 2 中, 光栅的周期常数由 (2) 式和 Y_m 实验值计算得到; 取光栅的各衍射级的峰值黑密度, 按在位标定的软 X 光胶片的响应特性将黑密度转换为光强值, 该光强值之比就是表 2 中光栅各衍射级的衍射效率比。

4 透射光栅绝对衍射效率的数值计算

4.1 光栅模型^[3,4]

假设光栅栅线截面为矩形, 并考虑软 X 光对栅线的穿透和软 X 光波通过栅线后的相移, 则光栅 m 级的绝对衍射效率为:

$$\frac{n^{(m)}(q)}{N_0(q)} = \left[\frac{\sin(Mm\pi)}{M \sin(m\pi)} \right]^2 \left| \frac{\sin[(a/d)m\pi]}{(m\pi)} \right|^2 [1 + \exp(-2qZk) - 2\exp(-qZk) \cos(qZ\delta)] \quad m \neq 0 \quad (3)$$

$$\frac{n^{(0)}(q)}{N_0(q)} = (a/d)^2 + (1 - a/d)^2 \exp(-2qZk) + 2(a/d)(1 - a/d) \exp(-qZk) \cos(qZ\delta) \quad m = 0 \quad (4)$$

$$\text{且: } N_0(q) = n_{(0)}(q)(1 - f)T(q) \quad q = E/hc$$

其中: $n_{(0)}(q)$ 为入射到光栅上的光强, f 为光栅支撑条所占的面积比, $T(q)$ 为有底衬光栅底衬对 X 光的透过率, E 为 X 光光子能量, M 为光栅线数(X 光照射部份), a/d 、 Z 是光栅结构参数, k 为栅线材料光学常数的虚部, $n = 1 - \delta$ 是栅线光学常数的实部。

(3) 式中, 第一项为 M 个狭缝干涉项, 当 m 取整数时为 1; 第二项是单个狭缝的衍射项; 第三项是考虑来自光栅狭缝的 X 光波与穿过栅线有一定相移的 X 光波干涉的结果。

所有三种光栅栅线材料都是金, 金的光学常数用平均原子散射因子计算得到^[6]。

4.2 光栅的结构参数 a/d 、 Z 的确定

由 (3) 式、(4) 式得:

$$\frac{n^{(m)}(q)}{n^{(1)}(q)} = (1/m)^2 \left| \frac{\sin(m\pi a/d)}{\sin(\pi a/d)} \right|^2, \quad m \neq 0 \quad (5)$$

$$\frac{n^{(1)}(q)}{n^{(0)}(q)} = \left[\frac{\sin(a/d)\pi}{\pi} \right]^2$$

$$\frac{1 + \exp(-2qZk) - 2\exp(-qZk) \cos(qZ\delta)}{(a/d)^2 + (1 - a/d)^2 \exp(-2qzk) + 2(a/d)(1 - a/d) \exp(-qzk) \cos(qz\delta)} \quad (6)$$

由 (5) 式和表 2 中实验测得的高级与一级衍射效率之比, 可计算得光栅的 a/d 值; 由 (6) 式和 a/d 值及表 2 中一级与零级衍射效率之比, 可计算光栅栅线厚度 Z 。结果见表 3。

Table 3. Calibrated structure parameters for the three TG

	1 [#]		2 [#]		3 [#]	
	276 eV	930	276 eV	930 eV	276 eV	930 eV
a/d	0.281	0.288	0.444	0.421	0.277	0.271
Z (μm)	0.350	unknow	0.360	0.390	0.410	0.445

由于高能点 X 射线穿过金栅线比低能点的强, 若栅线截面偏离矩形较大将引起两个能点的光栅 a/d 值显著不同。从表 3 结果看: 1[#]、3[#] 光栅栅线截面能用矩形很好近似, 2[#] 光栅栅线

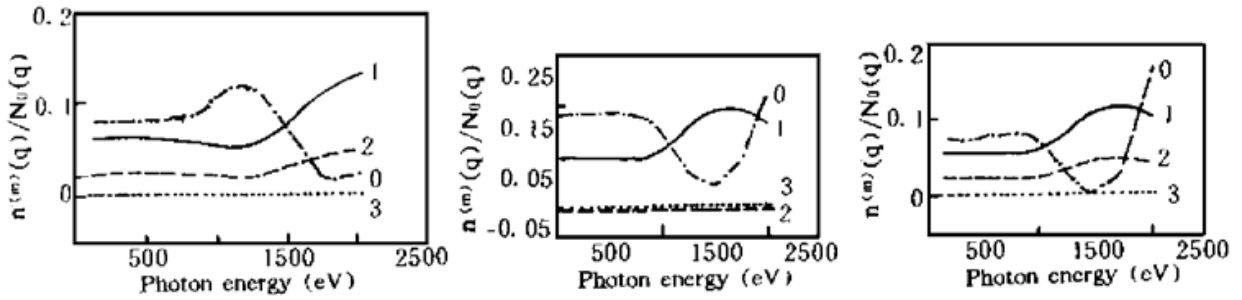


Fig. 4 Calculated diffraction efficiency as a function of photon energy. The number represents diffraction order. (a) for 1st grating ($a/d = 0.285, Z = 0.6 \mu\text{m}$); (b) for 2nd grating ($a/d = 0.433, z = 0.39 \mu\text{m}$) (X-ray absorption of CH substrate not included); (c) for 3rd grating ($a/d = 0.274, Z = 0.445 \mu\text{m}$)

截面用矩形近似稍差。

4.3 光栅绝对衍射效率的模拟计算

根据(3)、(4)式,光栅的结构参数取表3中两个能点的平均值(其中1st光栅栅线厚度取标称值 $0.6 \mu\text{m}$, 2nd光栅未考虑底衬吸收)进行模拟计算,得到三种光栅的零级、一级、二级和三级衍射效率与光子能量的关系曲线,如图4所示。

5 讨 论

由表2与表1比较可看出:

各光栅周期常数的标定值与标称值基本一致,其微小的差别在于实验测量的误差(包括胶片到光栅的距离误差,单色X光源波长的确定误差及衍射峰位取值误差)。

光栅的 a/d 和 Z 值, 1st光栅标称值只给一个范围,其实验标定值在其范围内; 2nd光栅标定值与标称值有一定偏差; 3rd光栅标定值与标称值差别很大。

为研究2nd、3rd光栅结构参数的标定值与标称值的偏差对衍射效率的影响,计算了结构参数取标称值(未计入底衬对X光的吸收)时的各级衍射效率,如图5所示。由图4(b),图4(c)与图5的比较得到:

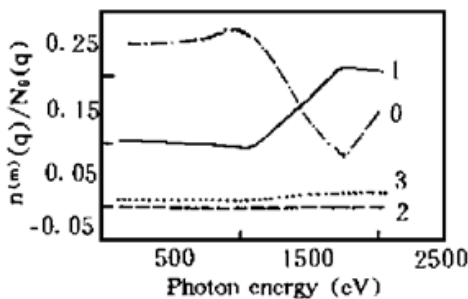


Fig. 5 Same as Fig. 4. But for grating ($a/d = 0.5, z = 0.5 \mu\text{m}$, no substrate)

1) 光栅结构参数取标称值时,单边一级衍射效率达10%,二级为0,三级为1.1%;

2) 2nd光栅标定的单边一级效率与取标称值时差别较小,单边二级、三级差别大。在实际应用中,对有较严重的高级衍射叠加情况,如采用标称值解谱,会造成较大误差;

3) 3rd光栅的各级衍射效率在取标定值和标称值时差别很大,如采用标称值解谱,将引入大的偏差;

4) 光栅的 a/d 取0.5, $Z \geq 0.5 \mu\text{m}$ 时,一级效率较高,而高级效率很低。同时,在亚千电子伏X光能区,各级衍射效率基本为常数,是一种实际应用中很好的光栅结构。

结 论 在同步辐射源上用单色性很好的软X光作光源,

在两个能点对三种透射光栅进行了实验标定,得到了较好的结果,证明北京同步辐射源是作光栅标定的一种很好的软X光源。

通过三种光栅的实验标定,对光栅的部份标称结构作了大的修正,对提高测谱的准确性打下了基础。

通过用透射光栅结构参数的实验标定值和标称值分别对各级衍射效率的模拟计算,看到2[#]光栅较适合应用于软X光能谱测量;用1[#]和3[#]光栅测谱可能会由于高级衍射的叠加,带来较大误差,不太适宜测谱应用,但由于它们各级衍射的强度逐次适度降低,用胶片记录时,一张胶片上可同时记录下很多衍射级,适合在同步辐射源上标定胶片时用作色散元件。

对三种透射光栅的标定还需要作进一步的工作。这主要有:1[#]光栅栅线厚度的进一步标定;1[#]和3[#]光栅支撑条占面积比的实验标定;2[#]光栅底衬厚度的标定。同时,对三种光栅,还需采用更多能点(包括较高能量点)的单色X光进行实验标定,以进一步提高光栅的标定精度。

在北京高能物理研究所实验期间,本工作得到了同步辐射实验室唐鄂生主任的支持和帮助,作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] N. M. Ceglio, R. L. Kauffman, A. M. Hawryluk *et al.*, Time-resolved X-ray transmission grating spectrometer for studying laser-produced plasmas. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(2) ·318~ 327
- [2] N. Ikeda, K. A. Tanaka, K. Okada, *et al.*, Diode-array coupled time-resolved transmission grating spectrometer. *Rev. Sci. Instrum.*, 1986, **57**(10) ·2489
- [3] H. Brauninger, P. Presehl, P. Beuermann, Transmission grating efficiencies for wavelengths between 5.4 Å and 44.8 Å. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(3) ·368~ 373
- [4] H. W. Schnopper, L. P. Van Speybroeck, J. P. Delvaile *et al.*, Diffraction grating transmission efficiencies for XUV and soft x rays. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(4) ·1088~ 1091
- [5] 李跃林, 白文安, 陈时胜等 针孔透射式光栅光谱仪衍射效率的理论模拟. *光学学报*, 1989, **9**(6) ·550 ~ 555
- [6] B. L. Henke, P. Lee, T. J. Tanaka, *et al.*, Atomic data and nuclear data table. 1982, **27**(1)

Experimental Calibration and Calculation of Diffraction Efficiency for Transmission Grating

Yang Jiamin Yi Rongqing Ma Hongliang Chen Zhenglin

Wang Hongbin Sun Kexu Wen Shuhuai Zheng Zhijian Tan Daoyuan

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

Cui Mingqi Li Gong Cui Congwu

(Beijing Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

(Received 18 July 1995; revised 4 March 1996)

Abstract Configurations of the three transmission gratings used in our laboratory are introduced briefly. Relative diffraction efficiencies for these gratings have been calibrated on synchrotron radiation source. With the help of grating model, the important structure parameters of grating are obtained, and absolute diffraction efficiencies for these gratings are calculated and discussed.

Key words transmission grating, relative diffraction efficiency, absolute diffraction efficiency, structure parameter.