

透射光栅在同步辐射光束线输出特性诊断中的应用*

赵屹东 崔明启 朱佩平 崔聪悟

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了透射光栅在北京同步辐射装置3W1B光束线光源输出特性诊断中的应用. 借助透射光栅进行了能量标定及分辨率的测量, 并定性地给出了束线的高次谐波情况.

关键词 同步辐射 透射光栅 能量标定 高次谐波

1 引言

由于透射光栅具有谱分辨较好、衍射效率较高^[1]、容易与测量系统匹配等优点, 因此可方便地用在同步辐射光束线光源输出特性诊断中. 本文介绍了在北京同步辐射装置3W1B光束线上, 借助透射光栅进行能量标定, 测量能量分辨率及高次谐波的情况.

2 原理与方法

2.1 能量标定

由光栅方程

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad (1)$$

有 $\lambda = d \sin \theta / m,$ (2)

当 θ 很小时, 设 $\sin \theta_m = Y_m / D$, 于是

$$\lambda = d \frac{Y_m}{mD}, \quad (3)$$

其中 d 为光栅常数, θ 为衍射角, m 为衍射级数, Y_m 为衍射场中第 m 级衍射峰到衍射中心的距离, D 为记录介质到透射光栅的距离. 所以, 只要精确测量 Y_m , 就可以由(3)式标定波长, 再由 $E = hc/\lambda$ 可得到单色器输出的 X 光光子能量. 实验上采取测量给定波长的相邻衍射峰间的平均距离 Y 的方法, 由下式定波长,

1999-09-15 收稿, 1999-12-01 收修改稿

* 国家自然科学基金(19675043)和国家高技术 863-416-3 专题资助

$$\lambda = d \frac{Y}{D}. \quad (4)$$

2.2 能量分辨

测量单色同步光的带宽及能量分辨要困难一些,有必要详细讨论.

(1) 若入射到透射光栅的同步光为完全单色的平行光,而且不考虑光源的扩展,则像面上记录到的峰为纯粹的衍射峰. 由衍射峰半角宽度公式^[2]:

$$\Delta\theta = \lambda / (Nd \cos\theta_m), \quad (5)$$

可知当 $\sin\theta \ll 1$ 时,衍射展宽 $D\Delta\theta$ 与衍射级数无关. 实验中 $D = 1050\text{mm}$, $d = 1/1050\text{mm}$, $Nd = 0.1\text{mm}$, N 为光栅有效周期数. 若 m 取 3, 对 $\lambda = 10\text{mm}$ 的单色软 X 光来说, $\cos\theta = 0.9996$. 所以,各级峰的衍射展宽可以认为相同. 而且光栅有效尺寸 Nd 越大,衍射展宽越小.

(2) 入射光仍是完全单色光,但考虑到光源的扩展. 这时光源尺寸和透射光栅有效尺寸一样,对峰宽有很大贡献,不妨称之为几何展宽(见图 1).

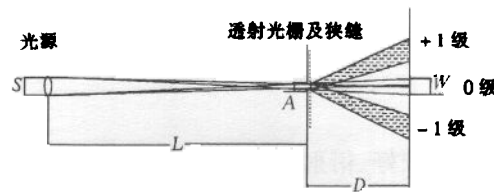


图 1 像面上的几何展宽

由几何关系可知^[3]

$$W = (L + D) \frac{A}{L} + D \frac{S}{L}, \quad (6)$$

其中 W 为几何展宽, A 为光源垂直线度, S 为透射光栅狭缝尺寸, L 为光源到透射光栅的距离, D 为记录介质到透射光栅的距离. 可见这两种因素造成的展宽交迭在一起,致使像面上的强度分布很复杂. 但不论强度分布有多复杂,几何展宽都与衍射级次无关.

(3) 若入射到透射光栅的同步光不是完全单色光,而是波长为 λ , 带宽为 $\Delta\lambda$ 的准单色光,则有

$$d \cos\theta_m \Delta\theta_m = m \Delta\lambda. \quad (7)$$

实验过程中 $\sin\theta \ll 1$, 所以

$$d \Delta\theta_m = m \Delta\lambda, \quad (8)$$

$$\Delta Y_m = m \Delta\lambda D / d, \quad (9)$$

式中 $\Delta\theta_m$ 和 ΔY_m 分别为第 m 级角色散展宽和线色散展宽,它们直接与单色同步光的带宽有关,与衍射级次成正比.

(4) 记录到的衍射峰宽是几何展宽、衍射展宽和色散展宽的迭加. 由前所述几何展宽和衍射展宽都与衍射级次无关,而色散展宽与衍射级次成正比,于是有:

$$\sigma_m - \sigma_0 = \Delta Y_m, \quad (10)$$

σ_0, σ_m 分别为记录到的第 0, m 级衍射峰半高全宽(FWHM).

这样,由(9),(10)式可得:

$$\Delta\lambda = d \frac{\sigma_m - \sigma_0}{mD}. \quad (11)$$

再根据(4)式,可得分辨率 R 为:

$$R = \Delta\lambda/\lambda = \Delta E/E = (\sigma_{m+1} - \sigma_m)/Y. \quad (12)$$

所以,只要精确测量 Y 及 σ_m ,就可以得到能量分辨率 R .

2.3 高次谐波

由 $d \sin\theta = m(\lambda/n)$ ($n=2,3$,为谐波次数),从衍射图中可了解高次谐波情况.

2.4 实验方法

实验所用记录介质可以选用软 X 光胶片或 CCD 相机. 但是用软 X 光胶片操作周期长,而对光束线做能量标定过程中,又要求记录介质在改变单色器聚焦参数后能及时反映出束线能点的变化情况. 所以用软 X 光胶片作记录介质标定能量不合适. CCD 相机是最好的,但设备昂贵,我们暂时不具备条件. 因此采用了一种简化办法:用加狭缝的硅光电二极管探测器

(AXUV100,IRD, USA)沿垂直光栅刻线方向扫描. R. Tatchyn, I. Lindau 等人在用透射光栅测量 Au 的光学常数实验^[4]中曾采用此法. 但这样会使衍射峰额外加宽,可以去卷积修正(详见 3.2 节). 实验所用透射光栅是 Au 无衬底透射光栅(1050l/mm, 中国科技大学研制),图 2 为其扫描电镜照片.

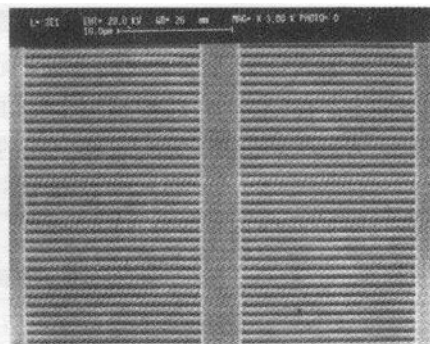


图 2 透射光栅的扫描电镜照片

图 3 给出测量装置示意图,从单色器出射的同步光经束线出射狭缝 AP1 和实验站入射狭缝 AP2 后,经透射光栅衍射,硅光电二极管在其后记录. 为减小光源尺寸的影响,透射光栅前加了 $100\mu\text{m}$ 的垂直狭缝. 探测器前也加了狭缝,为有足够的信噪比,探测器狭缝宽为 $400\mu\text{m}$. 探测器信号经低噪声同轴电缆馈入弱电流放大器(6517, KEITHLEY, USA),然后再由十路扫描卡(6521, KEITHLEY, USA)进入计算机记录. 实验数据用 Origin 软件包进行处理.

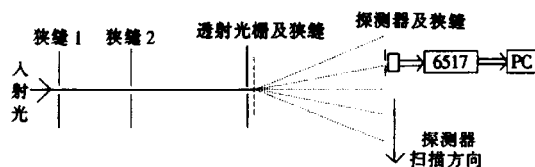


图 3 测量装置示意图

3 实验数据处理与结果

3.1 能量标定

能量标定过程就是调整 3W1B 光束线单色器^[5]参数¹⁾ Φ_C (平面镜与入射光方向夹角, 约为 10°) 和 Ω_C (变线距光栅与出射光方向夹角, 约为 87°), 使单色器输出 X 光能量与标称能量在误差范围内吻合. (a) 将单色器输出 X 光调到某一能点 (波长), 探测器在像面上垂直入射光方向上扫描, 记录下像面上的光强分布. (b) 由 (4) 式计算波长并换算成能量. 不改变单色器参数, 选定几个有代表性的能点重复进行. (c) 若计算出的能量与标称值之间的偏差超出误差范围, 重复上述步骤. 由 2.2 节所述, 记录到的衍射峰宽是几何展宽、衍射展宽和色散展宽的复杂迭加, 情况越复杂越趋近于高斯分布. 实验数据用 Origin 软件先画出图, 然后用高斯函数拟合处理, 处理后的结果见表 1. 为在标定过程中及时得到反馈结果, 这里没有考虑探测器狭缝的影响. 探测器狭缝对波长测量的影响详见 3.2 节.

表 1 单色器在不同参数下输出的 X 光波长及偏差

单色器参数		波长 (nm)		偏差	不确定度
$\Phi_C / (^\circ)$	$\Omega_C / (^\circ)$	标称值	测得值	(%)	(% 1σ)
9.650	86.624	8.27	8.81	+6.50	0.28
		17.10	17.31	+1.20	0.16
9.650	86.800	2.48	2.41	-2.80	0.93
		8.27	8.22	-0.60	0.30
		17.10	17.01	0.53	0.17
9.550	86.850	2.70	2.68	-0.74	0.86
		8.27	8.26	-0.12	0.30
		10.00	10.01	+0.10	0.25
		17.10	17.12	+0.12	0.17

由表 1 可见, 束线参数调整为 $\Omega_C = 86.85^\circ$, $\Phi_C = 9.55^\circ$ 后, 波长测得值与标称值在误差范围内符合得很好.

3.2 能量分辨

借助 Origin 软件, 用实验数据先画出图, 再用高斯函数拟合. 拟合的结果同时给出峰值位置和二倍标准差 W , 而半高全宽:

$$FWHM = 1.1775 \times 2\sigma = 1.1775W, \quad (13)$$

$$\Delta Y_\lambda = d \frac{\Delta\lambda}{D} = 1.1775(W_{m+1} - W_m), \quad (14)$$

1) 王培伟, 闫永康. 3W1B 光束线研制报告. 中国科学院高能物理研究所科学技术档案 BSRF 改进工程 3W1B1 束线 第一卷

$$\Delta\lambda = 1.1775 \frac{D}{d} (W_{m+1} - W_m). \quad (15)$$

用(12)式计算能量分辨 R , 见表 2:

表 2 带宽及能量分辨

波长(nm)	带宽(nm)	能量分辨 R (%)
2.68	0.081(± 0.023)	3.00(± 0.86)
8.26	0.054(± 0.025)	0.65(± 0.30)
10.01	0.065(± 0.025)	0.65(± 0.25)
17.16	0.045(± 0.029)	0.26(± 0.17)

由表 2 可见, 能量分辨 R 的误差很大, 详见第四部分误差分析.

3.3 高次谐波

要定量处理高次谐波还需要做很多工作, 这里只给出对 3W1B 束线高次谐波情况的定性了解. 从图 4 可见 $\lambda = 17\text{nm}$ 处二次谐波非常明显, $\lambda = 10\text{nm}$ 处二次谐波刚刚露头, 波长小于 10nm 段没有测出. 更高次谐波需另想办法. 所以在长波长段(低能区)实验中需加滤光片以抑制高次谐波.

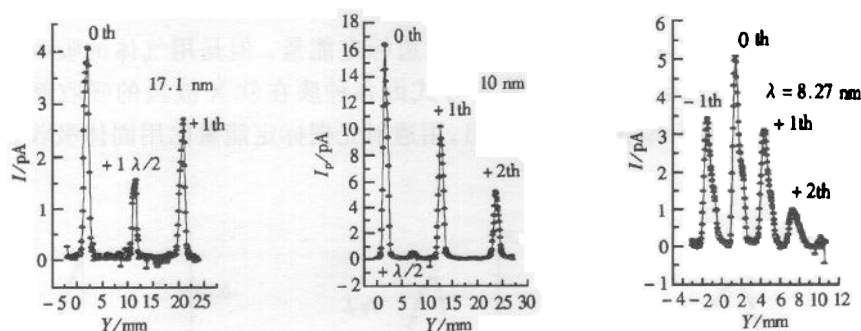


图 4 高次谐波情况

4 误差分析

实验及后续数据处理中多种因素都会对测量结果有影响:

(1) 数据处理中测量半高及峰值强度时会引入误差, 若 $Y_{1/2}/Y_m = 1/2$ 偏差 1%, 则对高斯型峰的半高宽会有 0.7% 的误差. 此外, 6517 弱电流放大器在 200pA 量程时精度为 1%, 温度系数为 0.5%/°C, 其读数误差计入此类误差中;

(2) 光栅常数 d 按 1050($\pm 1-5$)line/mm 计算, 其误差为(0.2—1)%;

(3) 衍射距离 D 为 1050mm, 误差为 $\pm 0.1\text{mm}$, 不确定度为 0.01%;

(4) 衍射角:

$$\sin\theta = \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + D^2}} \approx \frac{Y}{D} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{Y}{D} \right)^2 \right), \quad (16)$$

取第一项,舍第二项,引入误差小于 10^{-5} .

(5) 透射光栅与光束线夹角偏离 90° , 将导致有效光栅常数变小. 因为可保证 $(90 \pm 1)^\circ$ 的精度: $d_{\text{有效}} = d |\sin(90 \pm 1)^\circ| \approx 0.9999d$. 故它引起的误差可忽略.

表 1 中的测得值不确定度由

$$\Delta\lambda = (\Delta\lambda_d^2 + \Delta\lambda_Y^2 + \Delta\lambda_D^2)^{1/2} \quad (17)$$

得来. λ 的测量不确定度主要取决于 \bar{Y} 的测量误差. Y 综合测量误差小于 0.02mm . 若用软 X 光胶片做记录介质, Y 测量误差可降至 0.01mm , 可以使 λ 的测量精度有较大提高, 其中

$$\Delta\lambda_Y = \frac{d}{D} \Delta Y = \frac{1/1050}{1050} \times 0.02 = 0.023(\text{nm}), \quad (18)$$

$$\Delta\lambda_d = Y \frac{\Delta d}{D}, \quad (19)$$

$$\Delta\lambda_D = Y \frac{d}{D^2} \Delta D. \quad (20)$$

$\Delta\lambda$ 中, $\Delta\lambda_Y$ 占主要成份, 且与波长无关. $\Delta\lambda_d$ 取决于光栅制造工艺并与波长成正比, $\lambda = 17\text{nm}$ 时, $\Delta\lambda_d = 0.016\text{nm}$. $\Delta\lambda_D$ 与波长有关, 但只在 0.001nm 量级, 贡献很小. 所以, 适当增大衍射距离, 可以提高波长测量的精度.

在软 X 波段, 也可以用固体或气体的吸收边标定能量. 但是用气体的吸收边标定能量有很大难度: 无窗方式会破坏真空; 有窗方式因各种膜在软 X 波段的吸收都很强而难于做到. 比较表 1 与图 5 的结果, 可以看出, 用透射光栅标定能量比用固体吸收边法更具定量性(见图 5).

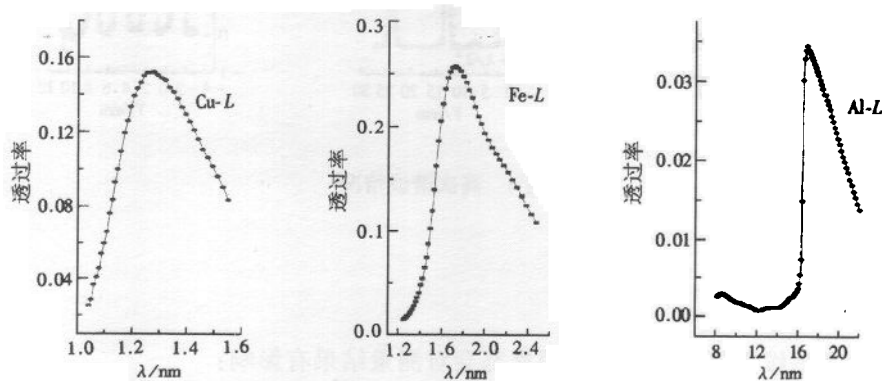


图 5 几种固体薄膜的吸收边

5 结论

在软 X 波段, 用透射光栅对同步辐射光束线单色器做能量标定是切实可行的, 而且要比用吸收边法标定能量更具有定量性. 用这种方法还可以测量带宽, 进而得到单色器的能量分辨, 并能方便地了解单色器光输出的高次谐波情况. 波长及带宽测量值的不确定度

主要取决于记录介质的空间分辨. 采用软 X 光胶片并适当增大衍射距离可提高准确度.

九院二所杨家敏同志提供了实验所用透射光栅, 杨家敏、曹磊峰等同志还在实验中给予我们很大帮助. 我室张菊芳、伊福廷同志帮助拍摄 SEM 照片, 在此一并表示感谢.

参考文献 (References)

- 1 YANG JiaMin, YI RongQing, MA HongLiang et al. *Acta Optica Sinica* (in Chinese) 1996, **11**(16):1631—1635
(杨家敏, 易荣清, 马洪良等 *光学学报*, 1996, **11**(16):1631—1635)
- 2 ZHAO KaiHua, ZHONG XiHua. *Optics*. Beijing: Beijing University Press (in Chinese), 1984. 19—21
(赵凯华, 钟锡华. *光学(下)*, 北京: 北京大学出版社, 1984, 19—21)
- 3 Ceglie N M, Roth M, Hawryluk A M. A Streaked X - Ray Transmitting Grating Spectrometer. In: Attwood D. T., Henke B. L. ed. *Low Energy X Ray Diagnostics - 1981*. American Institute of Physics, 1981
- 4 Tachyn R, Lindau I, Hecht M et al. Quality Fraunhofer Diffraction Spectra Taken at SSRL in soft X - Ray Range. In: Attwood D. T., Henke B. L. ed. *Low Energy X Ray Diagnostics - 1981*. American Institute of Physics, 1981.
- 5 TANG ESheng, YAN YongLian, XIA ShaoJian et al. *Journal of Synchrotron Radiation*. 1998, **5**:530—532

Application of Transmission Grating in Diagnoses of Synchrotron Radiation Beamline Output*

ZHAO YiDong CUI MingQi ZHU PeiPing CUI CongWu
(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

Abstract A new method that uses transmission grating (TG) for diagnosing the output character of synchrotron radiation beamline was introduced. Using TG the energy calibration was processed and the energy resolution was measured in 3W1B beamline of BSRF. The behavior of high order component of the beamline was qualitatively given.

Key words synchrotron radiation, transmission grating, energy calibration, high order light

Received 15 September 1999, Revised 1 December 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19675043) and National 863 High Technology Project (863 416 3)