

高分辨掠入射软 X 射线- 真空紫外单色仪

卢启鹏

(中科院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 介绍了用于束箔光谱实验中研制的一台高分辨掠入射软 X 射线- 真空紫外单色仪基本原理及仪器组成, 给出了仪器性能的测试及初步实验结果。

关键词 单色仪 软 X 射线 真空紫外 束箔光谱学

1 引言

近年来, 高离化态原子光谱实验和理论的研究发展迅速, 是原子物理学最为活跃的领域之一。对于高离化态原子光谱的研究能够对 X 射线激光光源、等离子体诊断、日冕光谱分析提供大量的科学数据。利用串列加速器及高分辨掠入射软 X 射线- 真空紫外单色仪, 采用束箔光谱技术是进行高离化态原子光谱研究的重要手段。下面对用于束箔光谱实验而研制的高分辨掠入射软 X 射线- 真空紫外单色仪的光学系统, 仪器组成及测试结果进行介绍。

2 仪器的光学系统

2.1 基本原理

束箔光谱实验中要分析的光谱大都在软 X 射线- 真空紫外波段。在这个谱段范围内的单色仪需要采用掠入射工作方式, 用凹面光栅完成分光和聚焦功能。

根据凹面光栅理论^[1], 凹面光栅的衍射方程可表达为:

$$\sin\alpha + \sin\beta = m\lambda/\sigma \quad (1)$$

式中 α 为入射角, β 为衍射角, m 为衍射级次, λ 为波长, σ 为刻线密度。

要在出缝处得到清晰的谱线, 应满足子午聚焦方程:

$$\frac{\cos^2\alpha}{r_\alpha} + \frac{\cos^2\beta}{r_b} - \frac{\cos\alpha}{R} - \frac{\cos\beta}{R} = 0 \quad (2)$$

式中 r_a 为入臂长度, r_b 为出臂长度, R 为凹面光栅的曲率半径。对(2)式稍作变化, 得到

$$\cos\alpha\left(\frac{\cos\alpha}{r_a} - \frac{1}{R}\right) + \cos\beta\left(\frac{\cos\beta}{r_b} - \frac{1}{R}\right) = 0 \quad (3)$$

由上式不难得出:

$$r_a = R\cos\alpha, r_b = R\cos\beta \quad (4)$$

是满足方程(2)的解

式(4)确定了入射狭缝 A 点和出射狭缝 B 点到凹面光栅顶点 O 的距离。A 点和 B 点位于和凹面光栅顶点 O 相切的圆上, 圆的直径等于光栅的曲率半径 R , 这个圆称为罗兰圆。掠入射罗兰圆装置是采用凹面光栅单色仪所能达到最好分辨本领的结构形式。

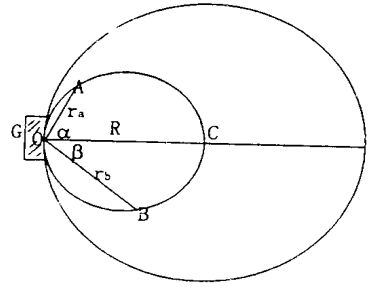


Fig. 1 Schematic diagram of the optical system

2.2 扫描方程

单色仪采用不同形式会有不同的扫描方程, 由(1)(4)式可推导出本仪器的光谱扫描程:

$$\lambda = \sigma \sqrt{1 - (r_a/R)^2} - \sqrt{1 - (r_b/R)^2} \quad (5)$$

式(5)表征出, 在运动扫描过程中, 随着 r_b 的变化, 单色仪出射狭缝处可得到相应波长的单色光。

2.3 光谱分辨率

分辨率是单色仪的重要指标, 要想仪器获得高分辨率, 就必须对影响单色仪分辨率的因素进行分析。单色仪的带宽可表示为^[2]:

$$(\Delta\lambda) = [(\Delta\lambda_1)^2 + (\Delta\lambda_2)^2 + (\Delta\lambda_3)^2 + (\Delta\lambda_4)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中各项分别为由入缝宽度、出缝宽度、系统象差增宽以及光学元件斜率误差引起的带宽分量。各带宽分量可分别表示为:

$$\Delta\lambda_1 = \frac{s_1}{r_a} \cdot d\cos\alpha \quad (7)$$

$$\Delta\lambda_2 = \frac{s_2}{r_b} \cdot d\cos\beta \quad (8)$$

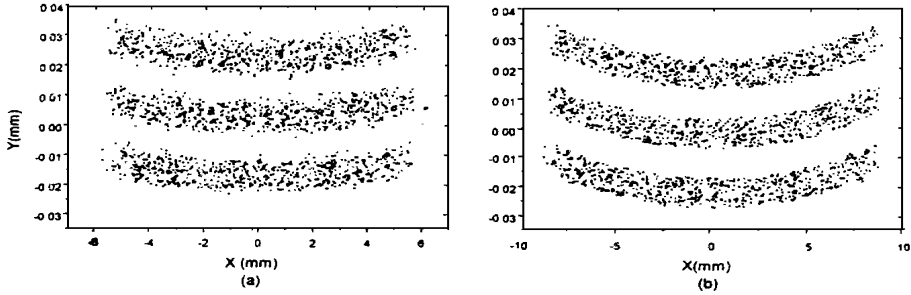
$$\Delta\lambda_3 = d \cdot \frac{\delta F}{\delta w} \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_4 = 2\sigma_T \cdot \text{ctg}\theta \cdot \lambda \quad (10)$$

由以上几式可看出, 要想获得仪器的高分辨率 S_1, S_2 要尽可能小, 而 r_a, r_b 要尽可能大。但由于 S_1, S_2 的减少将严重影响谱仪的光通量, 而 r_a, r_b 也要受到实际仪器结构的制约。

在仪器应用中, 如果采用 600g/mm 光栅, 分辨率要求为 0.015nm , 采用曲率半径 R 为 2217.6mm 的标准规格凹面光栅, 入缝宽度和出缝宽度都为 $10\mu\text{m}$ 时, 可以达到这一指标。图2是采用 SHADOW 程序^[3]对系统进行的光学追迹结果, 图2(a)为 $19.985\text{nm}, 20\text{nm}, 20.015\text{nm}$ 三波长的追迹结果, 图2(b)为 $79.985\text{nm}, 80\text{nm}, 80.015\text{nm}$ 三波长的追迹结果。追迹中, 入射角为 86° ; 光栅使用面积为 $22\text{mm(W)} \times 5\text{mm(H)}$ 。追迹结果清楚的表明在 20nm 和 80nm 处分辨率

都优于 0.015nm 。



(a) $\lambda = 20\text{nm}$, $\Delta\lambda = 0.015\text{nm}$ (b) $\lambda = 80\text{nm}$, $\Delta\lambda = 0.015\text{nm}$

Fig. 2 Spot diagrams obtained by tracing rays

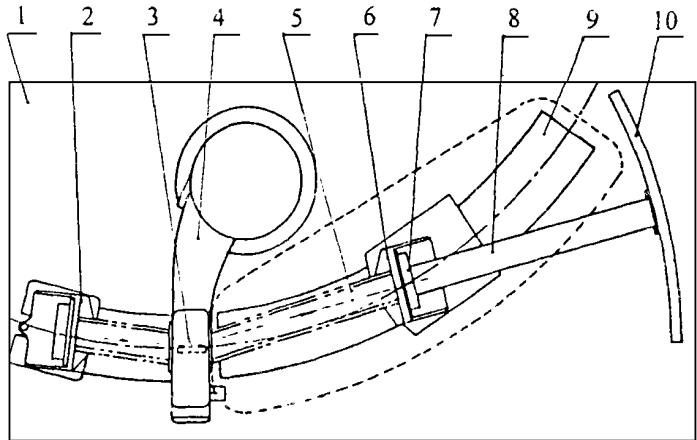
3 仪器组成

掠入射软 X 射线- 真空紫外单色仪主要由单色仪主体, 电控系统, 真空系统及光源四部分构成。下面仅对单色仪主体及电控系统进行介绍。

3.1 单色仪主体

单色仪主体主要包括凹面光栅及微调架、光栅室、精密出入射狭缝、狭缝转台、滚动丝杠及传动系统、转动臂、圆弧形导轨、大理石工作平台等。如图3所示。

在仪器中凹面光栅顶点要精确地调整到与罗兰圆相切的位置, 这是仪器获得高分辨率的关键, 因此, 装夹光栅的微调架设计就极为关键。为保证光栅处于正确位置调节架需要有4维精密调节, 即绕 X、Y、Z 轴转动 R_x , R_y , R_z , 沿法线 Z 向平移, 如图4所示。 R_x 调节使光栅法线与罗兰圆平面重合, R_y 调节使光栅法线经过罗兰圆的圆心, R_z 调节使光栅刻槽方向垂直于罗兰圆平面, 而 Z 向移动则使光栅顶点处在罗兰圆上。



1. marble base plane 2. entrance slit assembly 3. concave grating
4. main vacuum chamber 5. ball screw 6. rotate plane 7. exit slit assembly
8. straight edge 9. curved ways 10. straight edge guide

Fig. 3 Monochromator pictorial

在光谱扫描过程中,出射狭缝部件安装在密珠转动平台上,出射狭缝同转动平台一起沿圆弧形滚动导轨运动,其运动轨迹严格符合罗兰圆,通过高精度直线滚动丝杠改变出射狭缝与光栅顶点间的距离改变出射角度,出射角可由 $68^\circ \sim 88^\circ$ 连续变化,出射狭缝在沿圆弧形导轨运动的同时并绕自身转动保证其缝口平面始终垂直于出射光束轴。整个扫描运动系统轻便舒适,稳定性很好。出射狭缝沿罗兰圆导轨精密运动是仪器设计制造的难点。

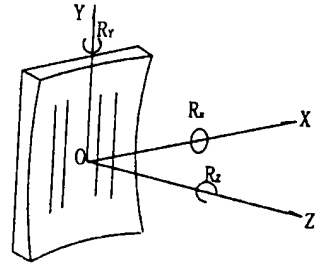


Fig. 4 Grating coordinates

仪器中用不锈钢制作的主真空室,用来放置凹面光栅部件,真空室与真空泵等部件之间采用无氧铜圈密封,入射狭缝,出射狭缝同主真空室之间采用超薄焊接波纹管连接,用以满足系统在超高真空条件下出射狭缝能在精密圆弧形导轨上灵活运动。仪器主体安装在大理石工作平台上,保持整机光学性能的稳定性,减小真空机组及外界震动对仪器的影响。

3.2 仪器电控系统

单色仪电控系统包括光谱扫描驱动,数据采集及束流监测等部分,原理框图如图5所示。

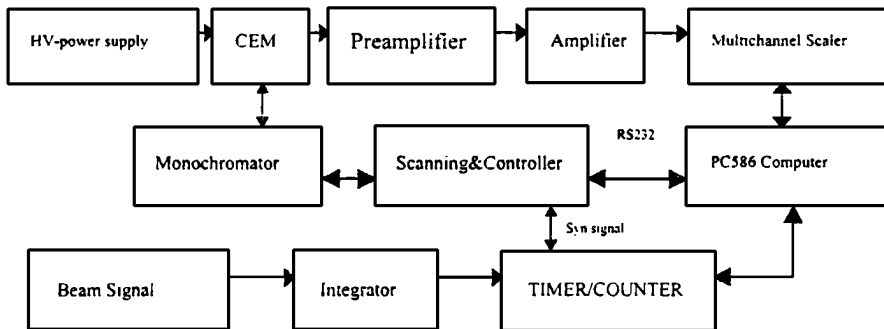


Fig. 5 Monochromator control block diagram

单色仪的光谱扫描由扫描控制器完成。扫描控制器控制步进电机驱动精密丝杠转动,带动出射狭缝沿罗兰圆运动。单色仪输出的光信号,由通道电子倍增器(CEM)接收,采用光子计数技术,通过电荷前放,整形主放,阈值甄别器及多路定标器,最后由微机完成对光子信号的处理。由于束箔光谱实验一次常常需要几十个小时才能完成,这期间束流强度会发生变化。为减少和消除束流变化对实验结果的影响,采用束流归一的方法。用法拉第筒测量束流粒子数,通过束流积分器,定时器和扫描控制器相互配合构成束流归一闭环控制,使整台仪器在每个波长处光子积分时间同束流强度成反比,经过束流归一处理,即可消除束流强度变化对实验结果的影响。整个测试和数据处理过程由一台PC586微机控制完成。

4 测试及实验结果

这台高分辨掠入射软X射线—真空紫外单色仪已成功地安装在中国原子能研究院核物理研究所串行加速器实验室中。安装后对单色仪的仪器性能进行了测试。测试时光源采用空心阴极光源,工作气体分别为氦和氖气,接收器为CEM,在光栅室中选用的凹面光栅刻槽密度分

别为600g/mm 和1200g/mm, 入射和出射狭缝缝宽均为0.01mm, 扫描速度为0.012mm/s, 谱线分辨率的测试结果如表 所示。波长重复精度30.3nm 处对于600g/mm 光栅为0.0019nm, 1200g/mm 光栅为0.0009nm。这些指标已同国外同类仪器水平相当。

Table 1 The resolution of spectrum lines

| $\sigma=600\text{g/mm}$ grating | | | | $\sigma=1200\text{g/mm}$ grating | | | |
|---------------------------------|-------------------|---------|--------------------|----------------------------------|-------------------|---------|--------------------|
| gas | λ (nm) | classi. | resolution (nm) | gas | λ (nm) | classi. | resolution (nm) |
| He | 25.630 | He | 0.013 | He | 24.30 | He | 0.0084 |
| He | 30.378 | He | 0.014 | He | 25.63 | He | 0.0086 |
| Ar | 93.205 | Ar | 0.014 | He | 30.378 | He | 0.0091 |

采用本仪器已在原子能院核物理所进行了束箔光谱实验。图6是核物理所曾宪堂先生领导的研究组对130MeV 高电荷态 Br 原子进行的测试结果。

致谢: 感谢陈今涌研究员, 李福田研究员的指导和帮助, 感谢曾宪堂研究员及其课题组在仪器安装调试中给予的大力支持和提供的最新实验结果。

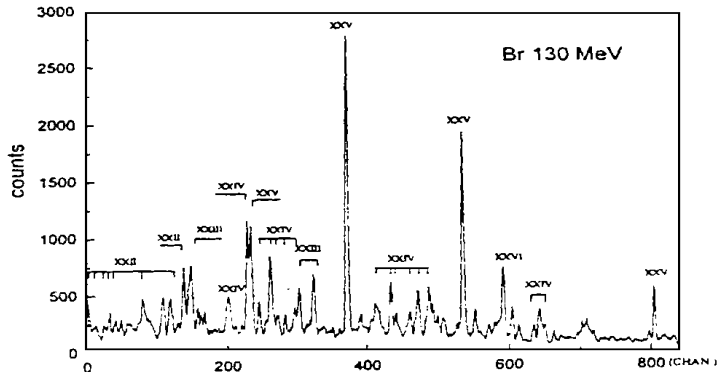


Fig. 6 The spectrum of 130MeV Br

参 考 文 献

- 1 Namioka T. J Opt Soc Am, Res, 1959, 49: 446
- 2 Chen C T. Nucl Instrum Methods Phys. 1987, A 256: 595
- 3 Lai B, Chapman K, Cerrina F. Nucl Instrm Methods Phys Res, 1998, A 266: 544

High Resolution Grazing Incidence Soft X-ray and VUV Monochromator

LU Qi-Peng

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper introduces the principle and the instrument of a high-resolution grazing-incidence soft x-ray and VUV monochromator for beam-foil spectroscopy experiment. Test results of instrumental performances and spectral experiments are presented.

Key words: Monochromator, Soft x-ray, VUV, Beam-Foil Spectroscopy

卢启鹏 男, 1964年6月生, 1987年毕业于浙江大学光学仪器专业, 1990年于中国科学院长春光机所获硕士学位。1990年后一直从事光谱仪器的研制工作。