

# SSRF 弧矢聚焦双晶单色器

何建华<sup>1</sup> 夏绍建<sup>1</sup> 侯铮迟<sup>1</sup> 巩金龙<sup>1</sup> 姜晓明<sup>2</sup> 赵雁<sup>1</sup>

1(中国科学院上海原子核研究所 上海 210800)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 弧矢聚焦双晶单色器采用分离式运动机构设计实现了双晶体多维自由度的独立调节,可工作在固定光束出口高度和可变光束出口高度两种模式.其中聚焦晶体压弯和双晶体方位调节采用了3种不同的柔性铰链机构,单色器第一晶体的冷却采用了轴心馈入直接水冷却机构.研制完成的装置经测试,晶体方位角微调精度好于 $0.5''$ ,聚焦光斑水平弥散小于25%.

**关键词** 单色器 晶体 弧矢聚焦 柔性铰链

## 1 引言

晶体单色器是硬X射线光束线的核心部件.弧矢聚焦双晶单色器在对X射线束进行单色化的同时还在水平方向上对光束进行聚焦,并且在水平方向上能接收较宽的光束,得到高通量的聚焦X光束.此外,通过选用高指数晶体衍射面,弧矢聚焦单色器还能对高能X射线束进行有效聚焦.由于弧矢聚焦单色器所具有的这些优点,使其在国外同步辐射装置光束线上得到了较为广泛的应用,弧矢聚焦技术已成为重要的同步辐射光束线技术之一.

高热负载光学元件的热缓释也是同步辐射光束线关键技术之一.设计中的上海同步辐射装置的高流强和较高电子能量,使SSRF弯铁光束线的热功率密度超过了我国现有的两台同步辐射装置上插入件光束线的热功率密度.上海同步辐射装置弧矢聚焦双晶单色器研制目标确定为研制一台既能实现弧矢聚焦又可承受高热负载的双晶单色器,掌握相关关键技术,为将来在SSRF上推广应用该类型单色器奠定基础 and 进行技术贮备.研制完成的装置现阶段可用于BSRF弯铁和Wiggler束线,将来可用于SSRF弯铁光束线开展衍射和XAFS等实验研究.

## 2 单色器主要性能指标

为满足在 SSRF 和 BSRF 开展衍射和 XAFS 等实验研究的需要, 要求单色器达到表 1 所列出的主要性能要求.

表 1 弧矢聚焦双晶单色器主要性能要求

|          |                                    |
|----------|------------------------------------|
| 波长扫描范围   | 5—20keV (Si(111)晶体)                |
| 波长分辨率    | $\leq 4 \times 10^{-4}$ (10 keV 处) |
| 最小波长调节步长 | $\leq 0.5\text{eV}$                |
| 波长重复精度   | $\leq 2\text{eV}$                  |
| 第一晶体冷却方式 | 直接水冷                               |
| 聚焦光斑水平尺寸 | 与光源尺寸接近或更小                         |

基于上述物理要求, 提出表 2 所列的弧矢聚焦双晶单色器主要技术指标.

表 2 弧矢聚焦双晶单色器主要设计指标

|                     |                                    |
|---------------------|------------------------------------|
| Bragg 角转动范围         | $5.5^\circ - 25^\circ$             |
| 最小转动角步长             | $\leq 0.36''$                      |
| 转动重复精度              | $\leq 2''$                         |
| 晶体滚角与摆角调节精度         | $\leq 10''$                        |
| 晶体滚角与摆角调节范围         | $\pm 30'$                          |
| 晶体投角调节精度            | $\leq 0.5''$                       |
| 晶体投角调节范围            | $\pm 10'$                          |
| 可承受的最大热负载(第一晶体直接水冷) | $0.5 \text{ W/mm}^2$               |
| 聚焦光斑水平弥散            | $\leq 100\%$                       |
| 聚焦比适用范围             | 1/1—3/1                            |
| 系统真空度               | $\leq 6 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ |

## 3 单色器结构

单色器双晶体采用无色散排列和分离式运动机构, 经第一晶体反射后的 X 光束在第二晶体上再次反射得到平行于入射光束的出射单色光束. 将第二晶体在弧矢面内压弯而在子午方向上保持与第一晶体平行, 可将出射光束在弧矢(水平方向上进行聚焦).

单色器第一晶体固定在测角仪转盘上, 随转盘转动来改变入射光束的 Bragg 角, 转盘转轴位于第一晶体表面中心. 第二晶体随转盘转动的同时可分别沿平行(x)和垂直(y)于晶面的方向移动, 以保证输出光的高度不变(见图 1). 第二晶体上加有压弯机构, 可将晶体在水平方向压弯至一定曲率得到对光束水平方向的聚焦. 由于第一晶体要承受较高的热负载, 需要采用直接水冷方式冷却晶体以减小晶体的热变形, 因此在设计上尽量减

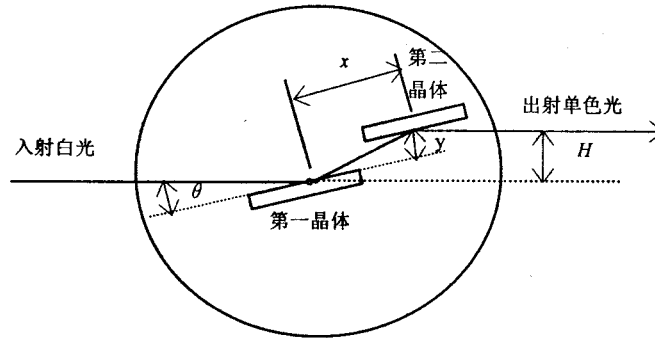


图 1 双晶运动机构原理示意图

少第一晶体的运动自由度以方便实施冷却。单色器第一晶体设置滚角微调机构，第二晶体设置投角和摆角微调机构，用以保证 Bragg 角的调节精度及双晶的平行精度。

单色器晶体的转动、移动、压弯及方位微调均可独立调节，其运动关联由控制软件设定。单色器可工作在固定光束出口高度和可变量束出口高度两种模式。

要保证输出光的高度不变，第二晶体表面中心的位置需满足以下关系式<sup>[1]</sup>：

$$x = H/2\sin\theta, \quad y = H/2\cos\theta, \quad (1)$$

则入射出射光高差为固定值  $H$ 。现允许最大高差  $H$  为 30mm，则第二晶体要求的移动范围为

$$\Delta x = \frac{H}{2} \left( \frac{1}{\sin\theta_{\min}} - \frac{1}{\sin\theta_{\max}} \right) = 121 \text{ mm}, \quad \Delta y = \frac{H}{2} \left( \frac{1}{\cos\theta_{\min}} - \frac{1}{\cos\theta_{\max}} \right) = -1.48 \text{ mm}, \quad (2)$$

设计选取  $x$  方向移动范围为 150mm， $y$  方向移动范围为 40mm。 $y$  方向移动留有较大余地是为了在不需单色光时可将晶体移出光路，使同步光直接从两块晶体之间穿过以得到白光光束。

弧矢压弯半径需满足以下聚焦条件：

$$R = \frac{2F_1F_2\sin\theta}{F_1+F_2}, \quad (3)$$

其中  $F_1$  和  $F_2$  分别为物距与象距。按光束线总长度( $F_1+F_2$ )为 28m 估算，若要求  $F_1/F_2 = 1-3$ ，则  $R$  的调节范围为 1—6m，设计选取  $R$  的调节范围为 1—10m。

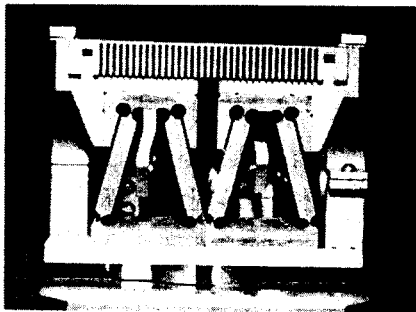


图 2 压弯晶体与柔性铰链压弯机构

晶体压弯采用复合四连杆柔性铰链压弯机构<sup>1)</sup>(图2)，晶体滚角和投角调节采用直方形柔性铰链机构，晶体摆角调节采用圆形柔性铰链机构。三种柔性铰链均采用进口铍青铜制作，经特殊热处理工艺处理以提高材料弹性模量。单色器第一晶体采用直接水冷方式，冷却环路由转动轴心馈入。水冷晶体背面刻制冷却槽<sup>[2]</sup>(图3)，冷却槽宽 1.5mm，间隔 1.5mm，冷却槽底部至晶体反射面厚度为 1mm。有

1) B.Jenniger. ESRF Internal Report

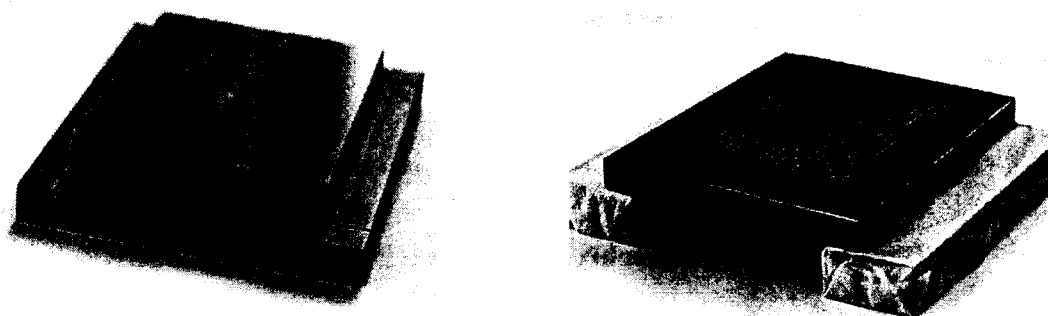


图3 单色器水冷晶体

左:反射面;右:冷却结构.

限元分析表明该结构可承受  $1\text{W}/\text{mm}^2$  的热负载<sup>2)</sup>. 压弯晶体背面刻制加强筋以抑制鞍形形变, 筋片厚度为  $0.6\text{mm}$ , 间距  $1.4\text{mm}$ , 槽底部至晶体反射面厚度为  $0.8\text{mm}$ .

#### 4 测试结果

利用自准直方法对晶体微调精度进行了检测, 检测结果表明晶体三个方位角的调节精度均小于  $0.5''$ , 其中晶体投角的微调精度达到了  $0.2''$ , 晶体方位角调节范围均大于  $\pm 1^\circ$ .

利用激光对单色器的弧矢聚焦性能进行了模拟测试, 在光源尺寸为  $1.2\text{mm}$ , 物距为  $17.5\text{m}$ , 像距为  $7\text{m}$ , 入射角为  $15^\circ$  的条件下, 测到的聚焦光斑水平宽度为  $0.6\text{mm}$ (见图4), 比理想光斑的水平宽度偏大约  $0.12\text{mm}$ , 相对水平弥散为  $25\%$ .

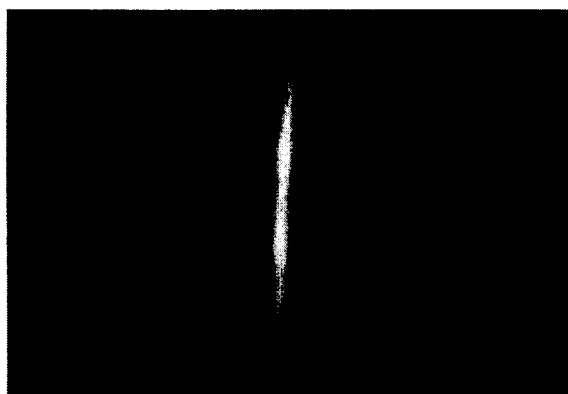


图4 聚焦光斑尺寸

每格宽度为  $1\text{mm}$ , 光斑水平宽度为  $0.6\text{mm}$ .

中国科学院西安光机所周泗忠、周仁魁, 中国科学院上海光机所韩放华, 沈阳超高真空技术研究所刘世闯等参加了研制工作, 在此表示衷心感谢.

2)王纳秀, SSRF 内部技术报告

**参考文献(References)**

- 1 Oyanagi H, Haga K. Rev. Sci. Instrum., 1996, 67(2):350—354
- 2 Oyanagi H, Kuwahara Y, Yamaguchi H. Rev. Sci. Instrum., 1995, 66:4482—4486

**A Double Crystal Monochromator of Sagittal Focusing at SSRF**

HE Jian-Hua<sup>1</sup> XIA Shao-Jian<sup>1</sup> HOU Zheng-Chi<sup>1</sup> GONG Jin-Long<sup>1</sup>  
JIANG Xiao-Ming<sup>2</sup> ZHAO Yan<sup>1</sup>

1 ( Shanghai Institute of Nuclear Research, CAS, Shanghai 201800, China )

2 ( Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China )

**Abstract** A double crystal monochromator of sagittal focusing has been designed, based on the idea of the separate movements of the crystal and the independent adjustment of crystal orientations, to be able to work in both the fixed beam exit and the variable beam exit cases. Three sorts of flexure hinge mechanisms have been used to bend the focusing crystal and to adjust the crystal orientations independently. The first crystal of the monochromator is cooled directly by water feeding through the rotation axis. The performance of the monochromator has been tested off-line, and the results show that the adjusting precision of the crystal orientations is better than 0.5 arcsecond and the horizontal width of the focusing image deviates from the theoretical width by less than 25%.

**Key words** monochromator, crystal, sagittal focusing