

文章编号 1004-924X(2002)04-0411-05

弧矢(Sagittal)聚焦双晶单色器设计

汤琦, 马健康, 周泗忠, 傅翎

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘要:介绍了弧矢聚焦双晶单色器系统性能要求,详细分析了满足系统性能要求的光学设计、机械设计
和控制系统设计方案。具体介绍了单色化和压弯聚焦等光学设计, Bragg角的转动和固定高差的移动等
关键部件的机械设计,以及以直圆柔性铰链为基础的投角、滚角、摆角调节结构。

关键词:弧矢聚焦;单色器;同步辐射;衍射

中图分类号:TH741 文献标识码:A

1 引言

同步辐射(SR)是环型加速器中做循环运动的高速电子在经过弯转磁铁时,沿电子轨道切线方向上的电磁辐射。同步辐射光由于其高光强、高准直性、波段广、线偏振、亚纳秒时间结构和高稳定性等许多优异性能,已在物理、材料、化学、生

命、微加工技术及其相关学科的研究与应用方面成为强有力的工具,是现代科学和高新技术发展中最有力和应用最广泛的一种研究手段,近二十多年来,在世界科学技术高速发展中起了重要的作用;光束线是同步辐射应用的主要部分,它通过不同的光学系统将同步光“裁剪”成所需能量(波长)、束斑尺寸、能量分辨率、偏振度和发散度的光束,提供给实验站开展应用研究。

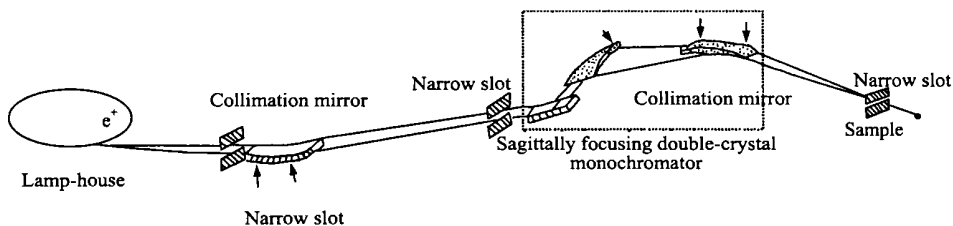


图1 光束线系统示意图

Fig.1 Sketch map of the light beam line system.

Sagittal 聚焦双晶单色器具有对同步辐射入射 X 射线束进行单色化和对出射单色 X 光束在弧矢方向聚焦的双重功能,能接收较宽的水平光束,得到高通量的聚焦 X 光束,是光束线的核心设备(见图1所示)。所以对弧矢聚焦双晶单色器的研究具有十分重要的科研与经济价值。

2 光学设计

Sagittal 聚焦双晶单色器光学原理如图2所

示。采用两块平行晶体无色散排列;第1晶面衍射确定出射单色 X 光的波长,第2晶面衍射确定单色 X 光束的方向,即平行于入射光束和固定高差。将第2晶体在弧矢面内压弯而在子午方向上保持与第1晶体平行,即能对出射光束在弧矢方向上进行聚焦,得到高强度的单色 X 光束。

2.1 系统性能要求

1) 投角、滚角、摆角的定义

如图3所示,绕 X 轴转动的角为投角(yaw),主要调节 Bragg 角 B ;绕 Y 轴旋转的角为摆角

(pitch), 主要调节晶格缺陷; 绕 Z 轴转动的角为滚角 (roll), 主要调节双晶平行。

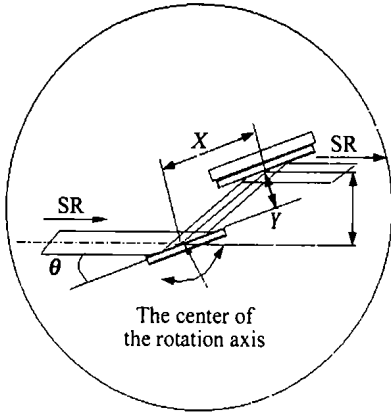


图 2 单色器单色化光学原理
Fig. 2 Homochromatism principle.

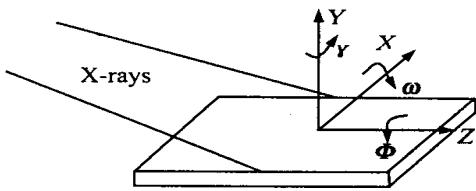


图 3 投角、滚角、摆角示意图
Fig. 3 Sketch map of yaw, pitch and roll.

2) 系统性能要求

弧矢聚焦双晶单色器系统性能要求: 晶体台转角步距为 0.36° , 晶体台转角步距精度为 2° ; 第 1 晶体滚角微调系统调节精度为 $0.2\mu\text{m}$; 第 2 晶体投角微调系统调节精度为 $0.2\mu\text{m}$; 第 2 晶体摆角微调系统调节精度为 $0.25\mu\text{m}$; 沿晶面方向 (X) 精度: 1mm ; 沿晶面法向 (Y) 精度: 1mm 。

2.2 单色化和聚焦设计

由布喇格定律可知, 当一束 X 射线入射到晶体表面时, 对选定的晶面, 波长满足 Bragg 衍射条件的 X 射线将被晶体反射。改变光束的入射角, 可得到不同波长的反射 X 光束:

$$2d\sin\theta = N\lambda \quad (1)$$

式中 d 为晶面间距, N 为阶数, 通常当 $N=1$ 所对应的波长是光束线实验站所需波长, $N>1$ 所对应的波长为高次谐波。在实际设计过程中, 取 $N=1$, $d=1\text{mm}$ 。

由于同步辐射光源的发散性以及光源和样品

之间距离较远, 必须聚焦同步光以增强有用光光强。因为聚焦晶体在水平方向聚焦的光强是垂直方向的 100 倍, 因此常用的都是对同步光在弧矢方向聚焦。当单色器的放大倍数 M 为 $1/3$ 时, 弧矢聚焦单色器引起的像差最小, 在实际设计过程中, 根据实验站的需求, 将晶体的衍射面压成圆柱面进行聚焦。

3 机械设计

弧矢聚焦双晶单色器总体结构实物图如图 4 所示。单色器第 1 晶体固定在测角仪晶体台上, 只能随晶体台转动来改变入射光束的 Bragg 角, 并承受较高的热负载, 需要采用直接水冷方式冷却晶体, 以减小晶体的热变形, 同时尽量减少第 1 晶体的运动自由度, 以便实施冷却, 因此, 第 1 晶体上只设有滚角精密微调机构保证两晶体衍射面始终保持平行。第 2 晶体可分别沿平行晶面 (X) 和垂直晶面 (Y) 的方向移动, 以保持恒定的出、入射光高差; 第 2 晶体上设有压弯机构, 用于对第 2 晶体在水平方向上进行压弯聚焦; 第 2 晶体上设有对投角微调装置从而抑制输出光束的高次谐波; 同时还对摆角进行微调来弥补晶体晶格的缺陷。

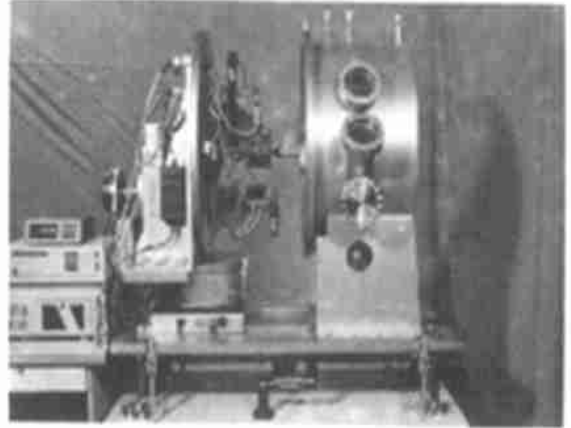


图 4 弧矢聚焦双晶单色器总体结构实物图
Fig. 4 Whole practicality chart of the monochromator.

3.1 Bragg 角转动设计

Bragg 角转动分系统是弧矢聚焦双晶单色器的核心部分。第 1 晶体表面中心位于晶体台 Bragg 角旋转中心, 与第 2 晶体同时绕轴心旋转。为便于准直、调试和避让光束, 选晶体台转角

(Bragg 角) 范围为 $- 2^{\circ} \sim 30^{\circ}$; 为达到 0.5ev 以下的波长调节步长, 最小 Bragg 转角转动步长为 0.36 ; 在整个波长扫描范围, 波长重复精度为 2ev。Bragg 角输入轴长达 300mm, 轴与轴承配合处不同轴度 0.01mm, 长轴两端采用特制的大直径、高精度 C 级轴承支撑, 轴承运动精度 0.003mm, 轴承定位精度 0.003mm, 以确保轴系的传动精度, 整体镀二硫化钼, 适应于超高真空中使用。

Bragg 角输入轴采用空心轴、法兰密封结构, 可容四路 10 水管通过, 在第 1 晶体中实现水冷环路。轴承支撑两端采用唇形密封装置, 形成差分抽气结构, 比磁流体密封结构简单, 还可适应 10^{-7} Torr 超高真空度工作。

Bragg 角轴系由直角弯板和测角仪构成轴承座, 独立支撑在底板上, 与真空室大法兰支撑互不干涉, 以保证真空室开启与关闭不影响 Bragg 角输入的精度。

3.2 出入射光高差固定设计

两块晶体转动的同时, 第 2 晶体需沿 X、Y 方向移动, 以保证出、入射光高差 H 不变, 第 2 晶体衍射面中心座标 (X、Y) 和 Bragg 角 满足以下关系,

$$X = H/2\sin\theta \quad (2)$$

$$Y = H/2\cos\theta \quad (3)$$

取 $H = 30\text{mm}$, 由(2)、(3)式得在 Bragg 角范围在 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时, 座标中 X、Y 之间关系如图 5 所示。由图 5 知, 随着 X 的增大(低能区), 曲线变得非常平缓; 当 在 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围变化时, Y 变化小于 2mm; 当 X 在大于 40mm 的范围变化, Y 的变化小于 0.5mm。

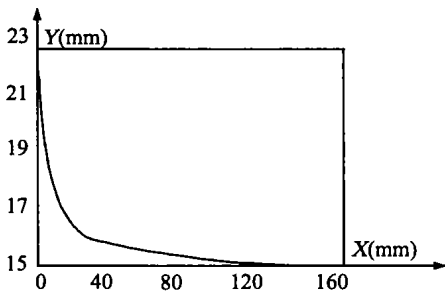


图 5 X、Y 之间的关系图
Fig. 5 Relations between X and Y.

取 $H = 30\text{mm}$, 由(2)、(3)式得在 Bragg 角

范围在 $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时, X、Y 与 之间的关系如图 6 所示。由图 6 知, 随着 的增加, Y 增加缓慢, 而 X 快速减小, 但当 $> 20^{\circ}$ 时, X 变化缓慢, 甚至趋于饱和; 实际上, 对 Si(111) 晶体, 在典型的 XAFS 实验能区范围 5.8 ~ 22.7keV 内, X 的变化是 Y 变化的 1 ~ 2 个数量级, 因此, 对 X 传输台的控制是至关重要的, 因为 X 传输台大范围的移动极易引起两晶体衍射晶面的不平行。在整个角度扫描过程中, 要求出射光高度变化必须远小于垂直光斑尺寸。其中由 Y 方向移动引起高差 H 40μm 可满足要求。由(3)式:

$$H = 2 Y \cos\theta \quad (4)$$

因此, 要求 Y 方向位移精度 $Y = 20\mu\text{m}$ 。

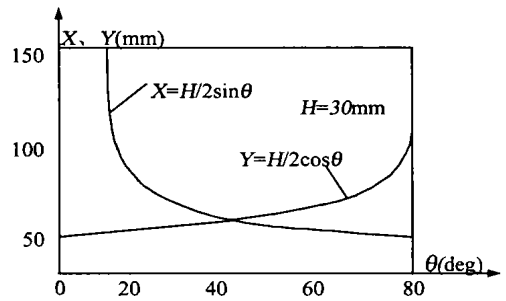


图 6 X、Y 传输台和 Bragg 角之间关系图
Fig. 6 Relations between X, Y and Bragg.

当光束投影范围不超出二晶有效长度时, 第 2 晶体沿 X 方向平移不改变出射高度, 只当第 2 晶体不能全部接收入射光束时, 沿 X 方向的移动才会影响出射光束的中心位置。在我们研制的弧矢聚焦单色器中, 为保持输出输入光线的高差固定, 采用了控制相互独立的两个传输台, 其实物图如图 7 所示。

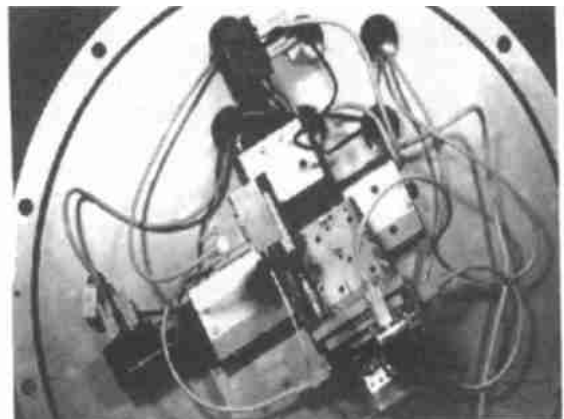


图 7 单色器控制高差固定的传输台实物图
Fig. 7 Practicality chart of controlling the fixed high.

4 控制系统设计

由于单色器控制系统的控制量多、控制精度要求高,所以在整个控制系统的设计中,遵循这样一个指导思想:分离单色器控制量,分层实现单色器控制算法,使其可以独立调节,便于维护。弧矢聚焦双晶单色器控制系统总体结构如图 8 所示。控制量主要包括:(1)Bragg 角的转动控制;(2)出入射光的高差控制 (X 、 Y);(3)弧矢(Sagittal)聚焦的压弯控制 (Tr 、 Tl);(4)第 1 晶体滚角,第 2 晶体的摆角与投角的微调控制。主控计算机根据

布拉格角公式把给定的能量转换成角度,然后通过步进电机控制器 HUBER9011 进行布拉格角转动控制,高精度的角度编码器读出布拉格角并反馈给主机,主机把反馈值和设定的布拉格角值进行比较,从而对布拉格角进行闭环控制;由(2)、(3)式,利用直流电机控制器 C-842 驱动伺服电机进行高差控制,并在光束线的出口处安装束探测器,以对 X 、 Y 方向进行闭环控制;根据离子室电离的电子数、实验站光斑的位置和展宽,利用直流电机控制器 C-842、C-844 驱动伺服电机,从而对双晶的滚角、投角、摆角以及第 2 晶体压弯进行调节。

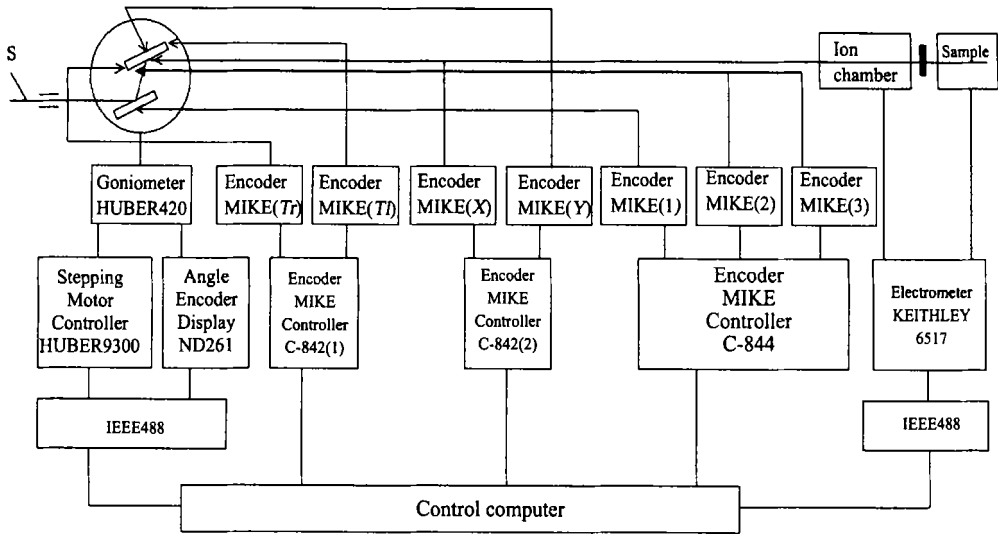


图 8 控制系统总体结构图

Fig. 8 Block diagram of the control system of the monochromator.

5 测试结果

弧矢聚焦双晶单色器在完成各零部件检测和精密装配后,按设计要求,对各项技术指标进行深入、细致的检测。下面是晶体台转角步距及精度、转角重复精度、双晶微调系统角度调节精度以及聚焦效果的测试结果:晶体台转角步距为 0.13 ,

晶体台转角步距精度为 0.01 ;第 1 晶体滚角微调系统调节精度为 0.091 μ m;第 2 晶体投角微调系统调节精度为 0.099 μ m;第 2 晶体摆角微调系统调节精度为 0.157 μ m;沿晶面方向 (X) 精度: 0.5mm;沿晶面法向 (Y) 精度: 0.02mm。

聚焦光斑水平弥散为 25 %。以上检测结果表明:该控制系统完全满足物理性能设计要求,现已移交上海国家同步辐射中心使用。

参考文献:

- [1] Tolentino H. Aberration-free and harmonic-free optics for time-resolved X-ray absorption spectroscopy using synchrotron radiation[J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1990, A289(1): 307 - 316.
- [2] Sozontov E A. The method of fabricating flat triangular germanium crystals for focusing optics of synchrotron X-radiation [J]. *Nuclear instruments and methods in physics research*, 1995, A359(1): 157 - 159.
- [3] Freund K. Performances of various types of benders for sagittally focusing crystals on ESRF synchrotron beamlines[J]. *SPIE*. 1998, 3448: 144 - 155.
- [4] Dolbnya L P. Focusing parabolic pyrolytic graphite X-ray monochromator. *Nucl. Instrum[J]. Methods*, 1995, A359(1): 141 - 145.
- [5] Knap G S. A simple sagittal focusing crystal which utilizes a bimetallic strip[J]. *Rev. Sci. Instrum*, 1992, 63(1): 465 - 467.
- [6] 傅颢,周仁魁,周泗忠,等. 弧矢聚焦双晶单色器聚焦误差分析[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(3): 230 - 233.

Design of a sagittally focusing double-crystal monochromator in synchrotron radiation

TANG Qi, MA Jian-kang, ZHOU Si-zhong, FU Xuan

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: This article briefly remarks the optical design, structure design and control design of a sagittally focusing double-crystal monochromator, and introduces the structure design of the sticking point (homochromatism, focusing and the wheeling of the Bragg) and the adjustment frame of yaw, pitch and roll in the monochromator based on the right circular flexure hinge.

Key words: sagittal focusing; monochromator; synchrotron radiation; diffraction

作者简介:汤琦(1975-),男,安徽安庆人,1999年毕业于西北工业大学物理系,获学士学位;现在西安光机所读硕士学位,主要从事信息处理和控制系统研究。