

文章编号 1004-924X(2001)04-0401-04

# 同步辐射 X 射线双晶单色仪能量扫描

王 峰<sup>1</sup>, 徐朝银<sup>1</sup>, 潘国强<sup>1</sup>, 赵飞云<sup>1</sup>, 黄志刚<sup>1</sup>, 范 荣<sup>1</sup>, 王丽秋<sup>2</sup>

(1. 中国科技大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029;

2. 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:**晶体单色仪是 X 射线光束线上的关键设备, 它用晶体作为色散元件, 衍射、分离具有连续光谱的同步辐射, 向用户提供一定带宽的 X 射线单色光。在合肥同步辐射装置上的晶体单色仪, 使用两块 Si (111) 晶体, 按 (+n, -n) 无色散排列, 通过一台专门研制的 L 型联动装置, 仅一维简单的 Bragg 角转动, 便可保证在动态能量扫描过程中, 两晶体衍射面始终平行, 且输出的单色光束与入射光束的相对位置不变。本文重点讨论的是用于合肥晶体单色仪上的能量扫描装置。

**关键词:**同步辐射; 晶体单色仪; 扫描装置; 联动

**中图分类号:** TL544 **文献标识码:** A

## 1 引 言

合肥光源是一台能量为 0.8 GeV 专用于产生同步辐射的电子储存环。在其中一直线节上插入了一台 6T 强磁场扭摆磁铁, 将光源的特征波长降至 4.8 Å, 光谱的使用范围从真空紫外、软 X 射线拓宽到硬 X 射线, 由此相继建成了三条 X 射线光束线<sup>[1]</sup>。其中有两束装备了晶体单色仪, 用于衍射、分光, 为扩延 X 射线吸收精细结构和 X 射线衍射研究提供一定带宽的 X 射线单色光。晶体单色仪是同步辐射 X 射线光束线上的关键设备。优化机构, 简化 Bragg 运动, 同时实现波长快速选择, 能量微区扫描, 光斑位置固定输出是研制合肥晶体单色仪的基本宗旨。本文讨论的是为此目标而专门设计的单色仪波长扫描系统, 包括晶体运动原理, 光斑输出位置误差评估, 装置的构造及要求。

## 2 晶体运动原理

选用两块晶体作为色散元件, 以 (+n, -n) 无色散排列, 在动态能量扫描过程中, 两衍射晶面始终保持平行; 一晶衍射出的单色光全部被二晶再次衍射和反射; 从二晶反射出的光轴与一晶入射的光轴平行, 且高差为定值。故称这类单色仪为 Bragg-Bragg Monolith 型双晶单色仪。为满足此要

求, 两晶体布置在直角的两边, 过一晶中心的法线是直角的一边, 而直角的另一边相切于二晶的表面。晶体按 Bragg 衍射方程  $\lambda = 2d\sin\theta$  作能量扫描运动时常常有两种选择。图 1a 是 Bragg 转动轴心位于直角顶点 A, 两晶体绕 A 点转动时, 一晶沿直角边(晶体法向)平移, 使入射的光轴始终落在晶体表面的同一点; 二晶则沿另一直角边(晶体切向)平移, 保证一晶衍射出的光被二晶全部接收。图 1b Bragg 转动轴心选择在一晶的表面且通过光轴入射点 O, 两晶体绕 O 点转动时, 一晶无移动, 而二晶沿其切向和法向作二维平移, 可以收到同样效果。

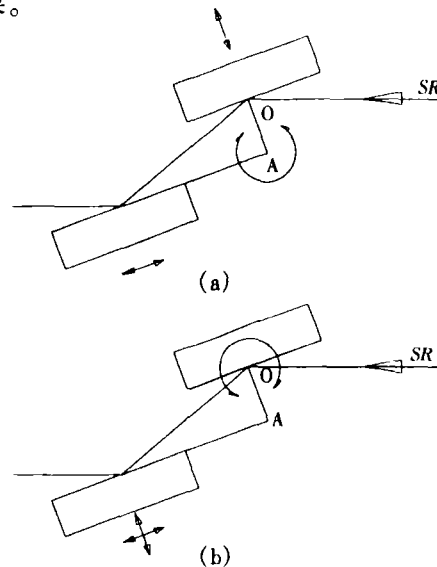


Fig. 1 Two-crystal movement of the double crystal monochromator for fixed exit position

合肥晶体单色仪的能量扫描是在采用图 1b 模式的基础上作了两点改进。其一,直角顶点受到平行于入射光轴直线导轨的约束,当两晶体绕 O 点转动时,直角顶点 A 沿直线导轨联动,带动二晶沿其法线方向平移。其二,适当延长二晶在入射平面内的长度,以致在整个扫描区内,被一晶衍射出的单色光,都能落在二晶表面。这样就省略了二维平移,仅绕 O 点一维 Bragg 转动,便能完成全光谱范围内的能量扫描,且保持单色光斑输出位置固定不变,如图 2 所示。这一功能是由第四节中介绍的 L 型联动机构来完成。

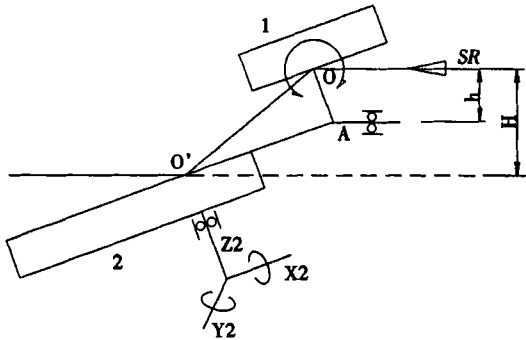


Fig. 2 Linkage configuration of two - crystal at Hefei double - crystal monochromator

从图 1 和图 2 所示的光学系统的几何关系中都可以推导出下面的关系式:

$$H = \overline{OO'} \cdot \sin 2\theta = \overline{OA} \cdot \frac{\sin 2\theta}{\sin \theta} = \frac{h \cdot \sin \theta}{\sin \theta \cdot \sin \theta} = 2h$$

可见,二晶输出光轴与一晶入射光轴之间的高度 H 与 Bragg 角  $\theta$  变化无关,因此只要保证直角顶点 A 到通过一晶表面转动中心入射光轴的高度 h 不变,则单色仪输出的单色光斑位置就能保持不变。在机构中顶点 A 受导轨约束只能作平行入射光轴的移动,而入射光轴与一晶的交点 O 定位 Bragg 转轴中心,这样从结构上就决定了 h 为常数。为了进一步简化机构,提高传动精度,减小晶体尺寸,在不降低光学要求的前提下,尽量取小 h 值。

### 3 光斑输出位置误差评估

合肥晶体单色仪的扫描装置其基本特点是将 Bragg 运动简化到一维转动,就能完成波长快速选

择,能量微区扫描,保持光斑位置固定输出。但由于制造和安装原因,两晶体的直角关系与理论值存在误差,因此会引起出射光轴与入射光轴之间的高度随 Bragg 角转动而变化。依据光学几何关系下面分别推导计算影响光斑漂移几方面的误差值,为扫描装置的制造和安装提出精度要求。图 3 给出了两晶体之间的直角关系(L 型联动关系)存在五种偏差所引起出、入射光轴之间高度 H 随入射角  $\theta$  而变化的  $\Delta H$ 。(实线表示出射光的理论位置,虚线表示有偏差时出射光的实际位置)

(1) Bragg 转动轴线偏离一晶表面  $\Delta e_1$ :

$$\Delta H_1 = \Delta e_1 \times 2 \cos \theta$$

(2) 联动点 A 沿一晶表面法线方向偏差  $\Delta e_2$ :

$$\Delta H_2 = \Delta e_2 \times 2 \cos \theta$$

(3) 联动点 A 沿二晶表面切线方向偏差  $e_3$ :

$$\Delta H_3 = \Delta e_3 \times 2 \sin \theta$$

(4) 联动点 A 滑轨不平行于入射光轴偏差  $\Delta \beta$ :

$$\Delta H_4 \approx 2h \times \Delta \beta \times \tan \theta$$

(5) 二晶滑轨  $Y_2$  不垂直于其表面偏差  $\Delta \alpha$ :

$$\Delta H_5 \approx 2h \times \Delta \alpha \times \tan \theta$$

上述各项卷积表示其综合变化量  $\Delta H$ :  $\Delta H = (\Delta H_1^2 + \Delta H_2^2 + \Delta H_3^2 + \Delta H_4^2 + \Delta H_5^2)^{1/2}$

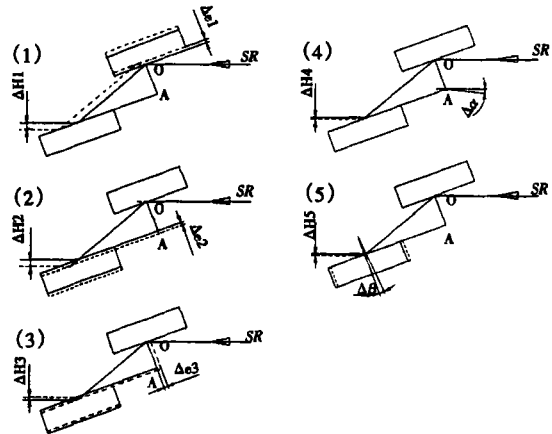


Fig. 3 Variation of the distance between entrance and exit beams in vertical as the Bragg angle  $\theta$ , which is caused by five errors of the two-crystal position

合肥晶体单色仪选用 Si(111) 晶体,能量范围 4.1KeV ~ 12.4KeV 对应的 Bragg 角  $\theta = 9.1^\circ \sim 28.6^\circ$ ,取  $h = 5\text{mm}$ 。把表 1 中列出的精度要求代入上面各关系式,计算  $\Delta H = 0.028\text{mm}$

## 4 装置结构与要求

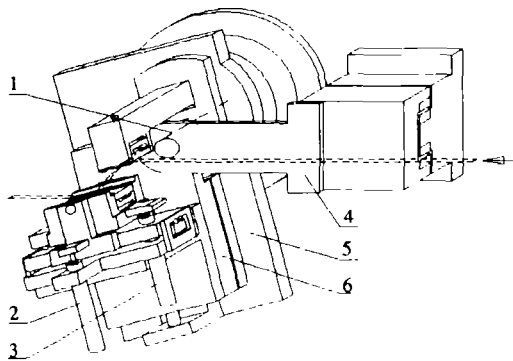


Fig. 4 L-mould linkage mechanism: (1) Bragg rotation axis; (2) micro-driver for rolling adjust; (3) micro-driver for incident adjust; (4) pivot-rod + slide; (5) rotation table; (6)  $Y_2$ -slide of second crystal

两晶体动态扫描的相关位置由图4所示的L型联动装置来保证。机构安装在一转台上,夹持一晶的托架直接与转台联成一体,其轴线通过一晶对称表面;二晶托架安放在可沿晶体表面法向移动的滑台上,滑台下面的滑座遵循两晶体的直角关系严格定位在转台上。位于滑台上的直角顶点通过枢轴连杆被限制在导轨A中作平移运动。直线导轨A与转台分体安装、固定在底座上,是单色仪安装时的参考基准线。由于制造、安装误差,不可能保证两晶面在Bragg角全程扫描中,始终保持平行,为此二晶托架还设置了自身微调机构。两只微驱动器(encorder Mike)驱动第二晶体分别绕 $X_2$ 、 $Y_2$ 轴转动(称为滚角和投角),以随时调整二晶与一晶平行,或者特意使二晶与一晶失谐,抑制高次谐波。整个系统封闭在真空腔体内,Bragg转动是由设置在腔体外面的Huber转角仪驱动,通过磁流体密封轴承,将旋转运动馈入到真空腔内。真空室安放在五维精密调整台上,调整、准直两晶体的空间姿态和同步辐射光轴的相关位置(图中未表示出)。下表列出了扫描装置在制造和组合过程中的检测内容和评价指标。

Table 1 Test terms and technical requirements of the energy scanning mechanism

Test terms	Requirements	Measuring devices
1 Deviation of Bragg axis from the center line at the first crystal surface	0.02mm	Autocollimator
2 Deviation of the linkage point from both lines of the right angle	0.05mm/normal 0.03mm/tangent	dial gauge
3 Deviation of the guide perpendicular to the surface of the second crystal	2mrad/in incident plane	Autocollimator
4 Parallel deviation of the guide of the linkage point from entrance beam	2mrad/in incident plane	laser-levelling instrument
5 Deviation of the Bragg axis perpendicular to the incident plane	1 $\mu$ rad/Y	Autocollimator
6 Accumulative error (Stability of the spot reflected by both crystals)	< spot $\times$ 20%	light source + theodolite
7 Scanning precision at the Bragg angle range of 9.1 $^\circ$ ~ 28.6 $^\circ$ (corresponding to the energy range 4.1 ~ 12.4 keV with silicon(111))	0.1"/ resolution 1"/ repetition	Huber goniometer + angular encoder Rod 800
8 Adjusting precision of the parallel of the two - crystal surface (angle range of 2 $^\circ$ )	0.5"/ incident adjust 2"/ rolling adjust	Encorder Mike + Autocollimator

表中1~3项是扫描装置的制造和组装精度,第6项在各单项达标后,按4、5两项单色仪与光轴准直要求,模拟实际使用状态,作最终指标的考核。在实验室直角坐标系里,将扫描装置的Bragg

转动轴线重合于Y轴,用自准直仪调整两晶面垂直于XZ平面,调平激光水准仪置于X轴上,准直L型联动点滑轨与X轴平行,以两块普通光学反射平镜代替晶体,水准仪的激光作为光源,且使激

光光轴正交于一晶表面的 Bragg 转轴,被两块平面镜反射的光斑照射到另一侧三米远处的屏靶上,靶心标有刻度,转动 Bragg 角,测出光斑的稳定度。实验结果表明,单色仪在全程扫描范围内被二镜反射出的光斑基本保持不动,漂动量远小于光斑尺度的 20%。

表中第七项决定了晶体单色仪能量分辨本领,扫描装置由 HuBer420 转角仪驱动,最小步程角  $\Delta\theta = 360/1000 \times 1/360 \times 1/20 = 0.18''$ 。Si(111)在能量 4.1KeV ~ 12.4KeV 范围内,由公式

$\Delta E = E \times \Delta\theta \times \cot\theta$  [2] 计算得  $\Delta E = 0.02\text{eV}$ , 远优于单色仪能量分辨率  $\Delta E/E = 5 \times 10^{-4}$  要求。

表中第八项因两晶体的衍射晶面平行性定位存在投角、滚角误差而设置, Si(111) 晶体在 4.1 KeV ~ 12.4KeV 范围内, Darwin 衍射半高宽约为  $5'' \sim 25''$ , 由投角、滚角引起的晶体入射角改变不应大于  $1''$ 。为此机构中两角度调整选用了美国 TELTEC 公司生产的分辨率为  $0.1\mu\text{m}$  微位移 (Encoder Mike) 驱动, 足可达到小于  $0.1''$  步程角的调整精度。

#### 参考文献:

- [1] 徐朝银,等. X射线衍射和散射光束线设计[J]. 中国科技大学学报[J], 1999, 29(2)181-188.  
 [2] Chaoyin Xu, et al. A double-crystal monochromator for EXAFS measurement [J]. Nucl. Instr. and Meth. A 410 1998, 293-296.

### Energy scanning of the double crystal monochromator at X-ray beamlines

WANG Feng, XU Chao-yin, PAN Guo-qiang, ZHAO Fei-yun, HUANG Zhi-gang, FAN Rong

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract:** The crystal monochromator is a key device of the X-ray beamline. It uses crystals as dispersive elements to diffract and separate the synchrotron radiation, and provide X-ray monochromatic light with a given energy bandwidth. Using a pair of Si(111) crystals with (+n, -n) arrangement, the double-crystal monochromator mounted on Hefei facility can assure the parallel of the crystal surfaces and provide a spatially fixed monochromatic beam only by a simple Bragg rotation with a special L-mould linkage mechanism in the course of energy scanning. The focus of the paper is the energy scanning mechanism of Hefei crystal monochromator.

**Key words:** synchrotron radiation; crystal monochromators; scanning energy; linkage

作者简介:王峰(1974-),男,1995年7月毕业于浙江大学,现为中国科技大学硕士研究生。