

4B9A 束线单色器的改进及在线调试

陈中军 吴忠华 肖向辉 洪新国 丁永凡 董宝中

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 报导了北京同步辐射装置 4B9A 束线前期改造中单色器的改进安装调试情况,并对单色器出高的变化和实际光强进行了测量。结果表明:4B9A 束线的前期改造已解决了单色器出高的变化问题,为衍射站和小角站的工作创造了条件。

关键词 单色器,光束线,同步辐射

中图分类号 O572.4

北京同步辐射实验装置(Beijing Synchrotron Radiation Facility)是目前我国同步辐射应用研究的重要基地之一^[1]。1989年投入运行以来经过进一步的扩充建设已经初具规模。现拥有9条光束线,其中4B9A光束线的同步光是从北京正负电子对撞机(BEPC)储存环4B9偏转磁铁引出的,经超环面镜聚焦后,由一固定出口双晶单色器选出单色X光供给衍射(XRD)和小角散射(SAXS)实验站。衍射-小角实验站是BSRF重要实验站之一^[2,3]。其中X光小角散射实验装置为国内材料科学和分子生物学等领域的研究提供了不可替代的分析手段。为了满足用户提出的更高需求,目前正在积极拓展二维小角散射实验方法。X射线衍射装置是目前BSRF唯一能利用连续可调波长进行衍射实验的设备,它在金属磁性薄膜、半导体超晶格、纳米材料和高温氧化物超导体等方面开展了大量工作。然而,自4B9A束线投入运行以来已有十多年的历史,BEPC也由当初运行在60 mA以下提高到100 mA左右。元器件的老化,当初设计上的不完善性逐渐暴露出来,如单色器的热负荷及稳定性问题、单色器的出高变化等,这些严重地制约了衍射和小角实验站功能的进一步拓展,也使得4B9A束线的使用效率大大降低。因此更换原有的单色器,提高4B9A束线的运行质量就成为4B9A束线前期改造的主要任务。本文主要报道4B9A束线前期改造中T型单色器的安装及调试结果。

1 T型单色器工作原理

图1为单色器原理示意图^[4]。AA'为第一块晶体的反射面,BB'为第二块晶体的反射面,O点为Bragg转轴,其方向垂直于纸面;X方向代表入射光方向;

θ 为入射光与第一块晶体表面的夹角;UU'为一平行于入射光方向的滑道,定义为UU'轴,它与入射光的距离为 h ;ON代表第一块晶体的法线方向,它与BB'的延长线交于P点;VV'为一导轨,导轨的方向垂直二晶晶面; H 为入射光与出射光之间的高度差。第一块晶体以Bragg轴为转轴,在转动过程中Bragg轴始终过一晶晶面。第二块晶体也以Bragg轴为转轴,在转动过程中始终保持两晶晶面的平行,且BB'的延长线与ON的交点P始终位于UU'上。根据以上约束条件,入射光与出射光之间的高度差可以表达为:

$$\begin{aligned} H &= \overline{OO'} \sin 2\theta = \frac{\overline{OP}}{\sin \theta} \sin 2\theta \\ &= \frac{h}{\cos \theta \sin \theta} \sin 2\theta = 2h \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式说明,入射光与出射光之间的高度差为一固定值 $2h$,它与入射角 θ 的大小无关,满足固定出口的要求。

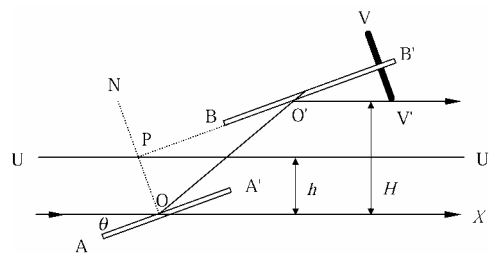


图1 单色器原理示意图

Fig.1 Basic working principle of the monochromator

根据Bragg定律,设 $\theta_{\min}$ 和 $\theta_{\max}$ 分别对应于一定的能量扫描范围内的最小入射角和最大入射角, d 为入射光斑垂直宽度。根据上述几何关系,我们可

第一作者:陈中军,男,1970年1月出生,2000年于华中理工大学物理系获硕士学位,凝聚态物理专业

收稿日期:2003-03-20,修回日期:2003-04-21

以得到第一块晶体和第二块晶体最小长度表达式以及 PB 长度表达式：

$$\overline{AA'} \geq \frac{d}{\sin \theta_{\min}}$$

$$\overline{BB'} \geq \frac{1}{2} \left(\frac{2h+d}{\sin \theta_{\min}} - \frac{2h-d}{\sin \theta_{\max}} \right)$$

$$\overline{PB} \leq \frac{2h-d}{2 \sin \theta_{\max}}$$

h 值的最小限定高度表达式为：

$$h_{\min} = \frac{1}{4} (d + \overline{AA'} \sin \theta_{\max})$$

设单色器的转角从 $\theta_{\min} = 14^\circ$ 到 $\theta_{\max} = 24^\circ$ ，固定出高 $2h = 30$ mm，根据图 1，影响单色器出高变化的因素如下：

Bragg 转轴 O 偏离一晶晶面高度为 $\Delta h_1 = 0.1$ mm 时，出射光的高度变化为

$$\Delta H_1 = 2\Delta h_1 (\cos \theta_{\min} - \cos \theta_{\max}) = 0.011 \text{ mm};$$

P 点偏离二晶晶面的高度为 $\Delta h_2 = 0.1$ mm 时，出射光的高度变化为：

$$\Delta H_2 = 2\Delta h_2 (\cos \theta_{\min} - \cos \theta_{\max}) = 0.011 \text{ mm};$$

P 点偏离一晶法线距离为 $\Delta h_3 = 0.1$ mm 时，出射光的高度变化为

$$\Delta H_3 = 2\Delta h_3 (\sin \theta_{\max} - \sin \theta_{\min}) = 0.033 \text{ mm};$$

导轨 VV' 不垂直二晶晶面且与二晶法线夹角为 $\Delta \alpha = 5$ mrad 时，出射光高度变化为：

$$\begin{aligned} \Delta H_4 &= 2h\Delta \alpha (\tan \theta_{\max} - \tan \theta_{\min} + \sin \theta_{\min} - \sin \theta_{\max}) \\ &= 0.004 \text{ mm}; \end{aligned}$$

UU' 不平行于 X 轴且与 X 轴夹角为 $\Delta \beta = 5$ mrad 时，出射光的高度变化为

$$\Delta H_5 = 2h\Delta \beta (\tan \theta_{\max} - \tan \theta_{\min}) = 0.029 \text{ mm}$$

出射光高度的最大变化为：

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5 \\ &= 0.063 \text{ mm} \end{aligned}$$

2 单色器的机械设计及调试

图 2 为单色器机构示意图。单色器的整体机构安装在一个转台上，O 点为转台的转轴，且过一晶的晶面。VV' 导轨也固定在转台上，导轨的方向与一晶、二晶的晶面保持垂直，且二晶可以沿导轨滑动。二晶晶面中心线延长线与一晶中心法线 OP 交于 P 点。P 点为二晶支架末端滑轮的轴心，且沿着

UU' 滑道滑动。滑道固定在单色器镜箱壁上且与入射光线平行。用于调整一晶、二晶晶面平行度的两个直线电机固定在第二块晶体上，第二晶体通过柔性铰链可作微小的转动。单色器冷却系统采用间接底冷机构。单色器的角扫描范围为 9° 到 30° ，但根据 4B9A 束线的实际情况，角扫描范围限定在 14° 到 24° 内，固定出口高度为 30 mm。

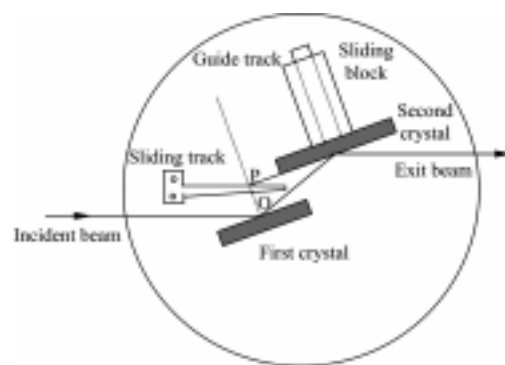


图 2 单色器机构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the monochromator

在离线调节过程中，我们使用经纬仪找到单色器转轴的轴心 O，调整一晶高度使晶面过轴心 O，且一晶晶面处于水平位置。在经纬仪前放一铅垂线，调节经纬仪使经纬仪上的垂直叉丝与垂线平行，水平叉丝与一晶晶面平行，叉丝的交点与轴心 O 重合，调节 P 点的位置使其位于垂直叉丝上，这样就保证了 P 点位于轴心的垂线上。在两块晶体之间放一 15 mm 厚的标准塞尺以保证双晶间距及双晶平行度，调节滑道的高度使 P 点滑轮落于滑道上，同时调节滑道为水平。在线调节过程中，通过调节单色器镜箱的整体姿态使滑道与入射光束平行，且光束过轴心 O 点。交替调节两直线电机使双晶处于调谐状态。最后在 5 keV 到 8 keV 能量之间，测试双晶的失谐度及出高的变化。

3 测试结果

3.1 单色器固定出口高度测试

在电离室前加一水平和垂直宽度都为 0.4 mm 的点狭缝，电离室和狭缝固定在一二维滑台上。储存环电子能量为 2.2 GeV，束流强度值为 70 mA，对单色光斑形状和强度分布进行二维扫描。水平和垂直方向的扫描步长分别为 180 μm 和 130 μm 。扫描结果如图 3(a) 和图 3(b) 所示的强度等高曲线。图 3(a) 中单色光的波长为 1.53 $\text{\AA}$ (~ 8 keV)，对应的 Bragg 角为 14.21° ；图 3(b) 中单色光的波长为 2.51 $\text{\AA}$ (~ 5 keV)，对应的 Bragg 角为 23.56° 。从图 3

中可以看出,无论是在高能处(~ 8 keV)还是在低能处(~ 5 keV),单色光斑形状都呈类椭圆形,其强度以中心点为最高,依次向周围逐渐减弱。在 8 keV 处,测得光斑的水平半高宽为 2.1 mm,垂直半高宽为 1.2 mm。在 5 keV 处光斑的水平半高宽为 2.2 mm,

垂直半高宽为 1.3 mm。两光斑的水平偏差为 0.1 mm,垂直高度偏差为 0.1 mm。由于光斑的尺寸远大于其出高的变化,因此可以满足实验的要求,且单色光斑强度也不随束流强度的变化而发生明显的波动。

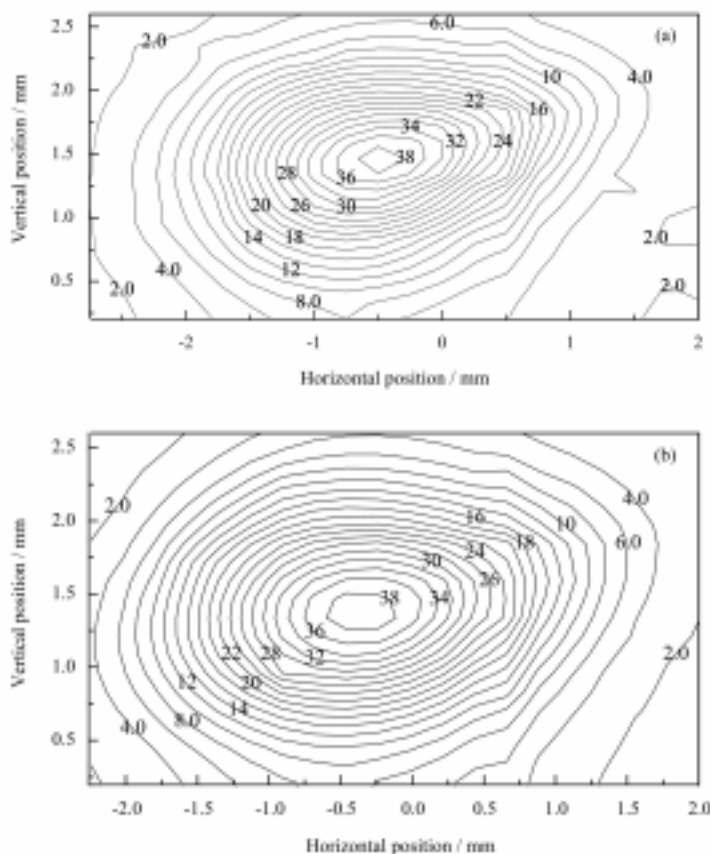


图3 单色光斑强度分布的等高曲线

(a) 波长 $\lambda=1.53\text{\AA}$, (b) 波长 $\lambda=2.51\text{\AA}$

Fig.3 The contour maps of the monochromatized X-ray intensity

(a) $\lambda=1.53\text{\AA}$, (b) $\lambda=2.51\text{\AA}$

图4是通过成像板曝光得到的测试结果,图4中的三个光斑分别是单色器在波长 $1.53\text{\AA}$ (~ 8 keV)

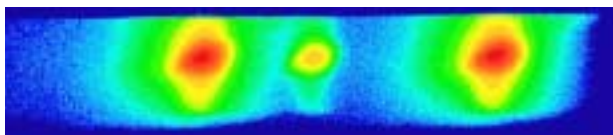


图4 成像板曝光得到的单色光斑图像

三个光斑(从左至右)分别是单色器在波长 $1.53\text{\AA}$ (~ 8 keV)、 $2.51\text{\AA}$ (~ 5 keV)、 $1.53\text{\AA}$ (~ 8 keV)处的光斑点

Fig.4 The exposal images of the monochromatized X-rays on the image plate. The faculae from left to right are at $1.53\text{\AA}$ (~ 8 keV), $2.51\text{\AA}$ (~ 5 keV), and $1.53\text{\AA}$ (~ 8 keV)

$2.51\text{\AA}$ (~ 5 keV)、 $1.53\text{\AA}$ (~ 8 keV)处的光斑点。期间没有对单色器作过任何调谐,基本模拟了实际应用情况。从图4中基本上看不到光斑出高的变化。这些测试结果表明新的单色器基本上解决了单色光出高的变化及热稳定性问题,可以为我们提供一个稳定的恒定出高的单色光源。

3.2 单色光全光斑强度测试

图5是在储存环电子能量为 2.2 GeV、束流强度为 100 mA 条件下,用光电二极管实测的单色光全光斑强度。图5中左轴表示电离室输出的强度,右轴表示实际的光斑强度。在 5 keV 到 9 keV 能量

范围内, 实际光强在 10^9 (Counts $\cdot$ s $^{-1}$) 左右。

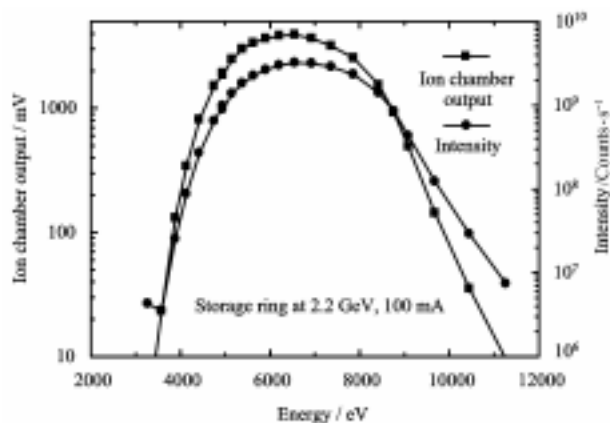


图 5 储存环电子能量为 2.2 GeV, 束流强度为 100 mA 时单色光斑强度随单色光能量的变化曲线

Fig.5 The measured intensity curves for storage ring at 2.2 GeV and 100mA

4 结束语

本文主要报导了北京同步辐射装置 4B9A 束线前期改造中单色器的改进安装调试情况, 并对单色器出高的变化和实际光强进行了测量。结果表明: 4B9A 束线的前期改造已解决了单色器工作的不稳定性问题, 为衍射站和小角站的工作创造了条件,

也为下一步的改造积累了宝贵的经验。我们对 4B9A 束线的研究和其他参数测试还在进行之中, 以后的进展情况将会另文报道。

致谢 本工作得到了中国科学院高能物理研究所阎永廉、胡天斗等研究员的大力支持和帮助。还有许多同志的帮助在此不能一一列出, 谨此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Xian D. Synchrotron Radiation News, 1988, 27(1): 6—10
- 2 王德武, 刘建飞. 高能物理与核物理, 1995, 19(5): 473—478
WANG Dewu, LIU Jianfei. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1995, 19(5): 473—478
- 3 董宝中, 生文君, 李光城, 等. 高能物理与核物理, 1995, 19(3): 284—288
DONG Baozhong, SHENG Wenjun, LI Guangcheng, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 1995, 19(3): 284—288
- 4 XIE Yaning, YAN Yonglian, HU Tiandou, *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2001, A467: 748—751

Improvement and on-line adjustment of monochromator at beamline 4B9A

CHEN Zhongjun WU Zhonghua XIAO Xianghui HONG Xinguo DING Yongfan DONG Baozhong

(Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract In this paper, the impovement and on-line adjustment of the monochromator of beamline 4B9A at BSRF were reported. The fixed beam exit of the monochromator and monochromatized X-ray intensity were tested. The results demonstrated that the indirect water-cooling monochromator is stable and mechanical instabilities are almost eliminated. It satisfies the experimental requirements of X-ray diffraction and Small Angle X-ray Scattering Stations at beamline 4B9A.

Key words Monochromator, Beamline, Synchrotron radiation

CLC O572.4