

BSRF-3B3 前端区和光束线输出特性诊断*

赵佳^{1,2} 崔明启^{1,1)} 赵屹东¹ 田玉莲¹ 周克瑾¹ 郑雷¹ 朱杰¹

马陈燕¹ 陈凯¹ 孙立娟¹ 韩勇¹

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (北京工商大学基础部 北京 100037)

摘要 北京同步辐射装置(BSRF)新建 3B3 光束线通过重新安装、准直和在线调试,其光学输出特性均达到或超出原设计指标,光通量达到 7×10^{10} phs/s(100mA 下),能量分辨本领 ($E/\Delta E$) 达到 5000(3.206keV). 介绍了前端区和光束线输出光学特性的诊断方法和光束线在线调试过程,给出了输出特性的测试结果. 分析了 BPM 与荧光靶在调试过程中所起的作用及局限性.

关键词 同步辐射 前端区 光束线 输出特性 诊断

1 引言

BSRF-3B3 光束线是新建的一条工作在中等能区(1.5—6keV)的单色、双聚焦 X 射线光束线,主要用于 X 射线光学、吸收谱学及探测器性能标定等方面的实验研究^[1],将为发展和拓宽国内同步辐射应用发挥重要作用.

光束线由北京正负电子对撞机(BEPC)储存环 3B3 弯转磁铁引出,图 1 给出了 3B3 光束线光学原理图.

能量范围: 1500—6000eV;

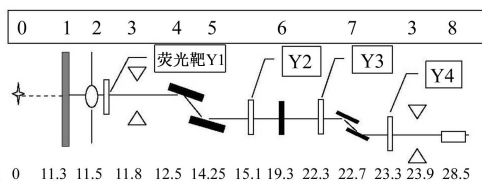
能量分辨率: ($E/\Delta E$): 1000—4000;

光斑尺寸: 2mm(H)×1mm(V);

光通量: 10^9 phs/s— 10^{10} phs/s(100mA 下);

高次谐波: < 5%.

此前由于 3B3 前端区和光束线安装准直严重偏离储存环叉管延伸方向,一直未能正常出光^[2]. 经过重新准直、安装及在线调试,目前光束线各项指标均达到或超出原设计指标.



与光源距离/m 0 11.3 11.5 11.8 12.5 14.25 15.1 19.3 22.3 22.7 23.3 23.9 28.5

图 1 3B3 光束线光路原理草图

0. 光源; 1. 前端区屏蔽墙; 2. BPM; 3. 四刀狭缝; 4. 平面镜; 5. 聚焦镜; 6. 碳膜; 7. 双晶单色器; 8. 实验站.

掠入射水冷平面镜切除 6keV 以上高能同步光,用以降低晶体热负载和抑制高次谐波;压弯柱面镜实现光束在样品处的水平和垂直双向聚焦;双晶单色器利用 Si(111), InSb(111)和 KTP(011)3 对晶体覆盖全部设计能量范围;碳膜用于滤除低能杂散光,进一步减少晶体的热负荷. 设计指标如下:

2 前端区光斑性质诊断

2.1 双丝光斑位置监测器(BPM)测量垂直光斑及指导储存环局部闭轨参数调整

前期调光时,虽然在荧光靶 Y1 上看到前端区宽且亮的光斑,但由于缺乏定量检测手段,无法判断光斑性质,致使花费了大量的时间和精力,却未得到满意的 X 光. 对前端区管道的重新准直,储存环闭轨参数需要重新调整. 为了便于闭轨参数的调节,将前端区在屏蔽墙出口处与光束线断开,增加双丝 BPM 系统,用水冷铍窗(厚 200 μ m,距光源 11.8m)隔离真空,以便在大气环境进一步对前端区出射光斑进行测量.

2005 - 03 - 14 收稿

* 国家高技术 863-804 资助

1) E-mail: cuimq@ihep.ac.cn

图2为BPM结构示意图,光敏丝采用直径 $d = 0.1\text{mm}$ 的镀金钨丝.由GBM步进电机通过丝杠驱动双丝上下运动,位置信号由GSC-X光栅尺记录,通过GS8220F数显表读数;在极板上加正偏压300V,收集光电子,光电流信号通过真空电极引线接弱电流计(6517, Keithley, USA)读出.

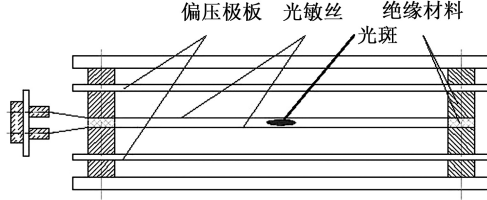


图 2 光敏丝BPM结构示意图

首先用单丝在垂直方向对光斑信号扫描,得到峰

值数据和峰值位置坐标;然后将单丝放在电子运动轨道平面1200mm高度,通过调整校正磁铁参数,将峰值信号调到1200mm位置;再用单丝测量光斑的垂直宽度,得到垂直方向的半高全宽(FWHM,通常表示实际光斑尺寸);反复微调校正磁铁,最终得到合适的信号强度和FWHM值(根据光束线设计参数计算得到).由于3B1和3B3光束线共用一块校正磁铁,为了同时适合两条束线的要求,将3B3光束线的光斑中心位置上移4mm.两种闭轨参数下光斑扫描结果如图3(a),(b)所示,图3(a)垂直方向强度谱基本呈对称的高斯分布,图3(b)FWHM有所减小,光束线输出特性测量结果均在图3(b)闭轨状态下得到的.水平方向为电离室在铍窗后大气环境下的测量结果,如图3(c)所示.测量结果表明前端区出墙处光斑尺寸与设计数据相符.

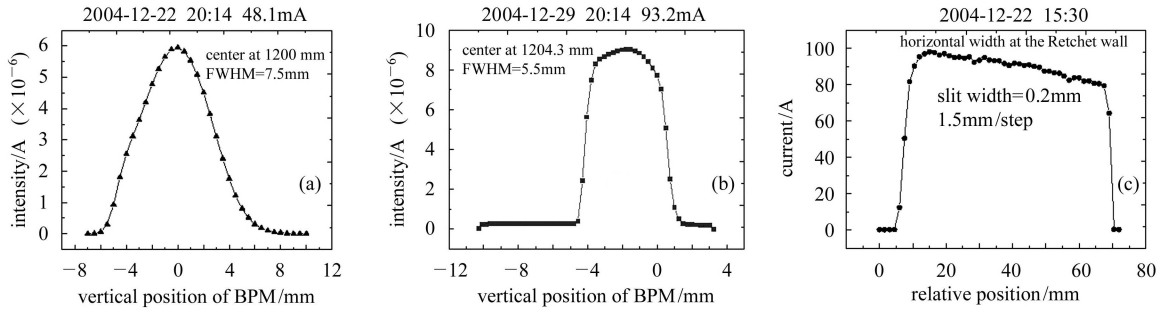


图 3 前端区出墙处光斑尺寸

(a) 垂直方向(峰值1200mm); (b) 垂直方向(峰值信号1204.3mm); (c) 水平方向.

2.2 平行板空气电离室估算前端区出口处光通量

若假设光子能量为单一能量,就可以利用平行板空气电离室对光源通量进行半定量估算.同步光经过 $200\mu\text{m}$ 铍窗后的截止能量下限为2000eV(透过率6%),3B3光源的特征能量 $E_c = 2288.8\text{eV}$,取光谱能量的上限为 $5E_c$,约11450eV,上下限能量的平均值 $E = 6869\text{eV}$.半定量估算如图4所示,设 I_0, I_1, I_2, I_3

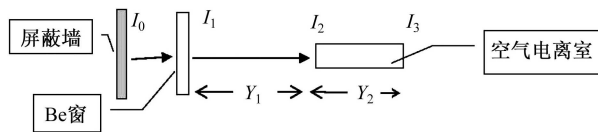


图 4 光源通量估算示意图

分别为光源、透过铍窗、入射电离室、出射电离室的光通量值,光通过空气电离室的长度为 Y_2 ,空气电离室距铍窗的长度为 Y_1 , μ 为线性吸收常数,计算得室温下通过13.5cm空气后光强度衰减为0.43336, $E = 6869\text{eV}$ 时 $200\mu\text{m}$ 厚的铍窗透过率为0.81^[3],则有

$$\frac{I_3}{I_2} = e^{-\mu \times 0.135} = 0.7835 \Rightarrow \mu = 1.807\text{m}^{-1}, \quad (1)$$

$$\frac{I_3}{I_2} = e^{-\mu Y_2}, \quad \frac{I_2}{I_1} = e^{-\mu Y_1}, \quad \frac{I_1}{I_0} = 0.9387, \quad (2)$$

空气的平均电离能 $W_0(x, r) \approx 33.73\text{eV}$ ^[4],量子效率 $\eta \approx \varepsilon_c/W_0$ 则电流强度可表示为

$$i = (I_2 - I_3) \times \eta \times 1.6 \times 10^{-19}(\text{A}), \quad (3)$$

实际测得 $Y_2 = 0.02(\text{m})$, $Y_1 = 0.115(\text{m})$,则由(2),(3)得 $i \approx I_0 \times 10^{-18}(\text{A})$.考虑狭缝宽度仅为 $200\mu\text{m}$,而测得的铍窗处光斑尺寸约64mm,以 $i = 90\text{nA}$ (见图3(c))带入(3)式,光源实际通量可得

$$\Phi = \frac{64}{0.2} \times \frac{i(\text{A})}{9.4 \times 10^{-19}} = 3.06 \times 10^{13}\text{phs/s}, \quad (4)$$

估算结果与理论计算值在同一量级,理论计算结果在图7(a)中给出.

2.3 前端区光斑能谱响应范围的测量

从铍窗出射的同步光经散射材料的散射后,由Si(Li)探测器测量其能谱响应范围,散射材料有泡

沫、不锈钢、Cu, Mo, Ti, Nb 等材料. 图 5 是同步光经铍窗后, 再通过 70cm 长空气, 由平面镜镜箱箱体(材料为不锈钢)散射的能谱响应曲线. 由于铍窗和空气对低能段吸收的影响, 图中 3.5keV 以下的强度较弱, 低能成分信号(3.2keV 以下)是同步光与空气物质相互作用的结果. 图 5 说明前端区出射光能谱范围符合 3B3 弯铁光源的设计要求.

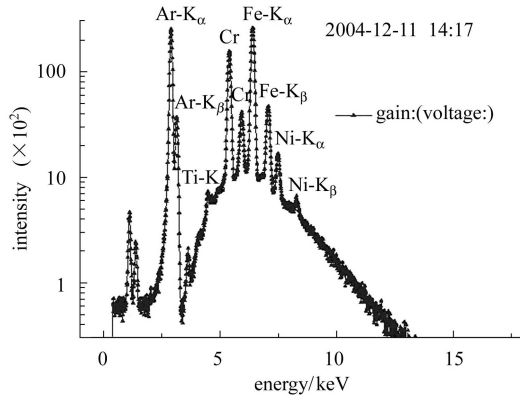


图 5 前端区光斑的散射能谱

3 光束线输出特性诊断

3.1 光束线的调试

光束线准直仍沿弯铁引出叉管的机械中心线方向进行, 但有几个因素加大了光束线调试的难度: 第一, 平面镜前、聚焦镜后只有荧光靶对光斑进行监测, 而没有对 X 射线光斑形状、位置和强度的量化监测手段; 第二, 平面镜、聚焦镜姿态调整时存在耦合效应; 第三, 平面镜、聚焦镜绕水平轴(xy 是水平面, y 方向为光传播方向)转动时, 转轴不是唯一的. 如图 6 所示, A, B, C 3 点分别由 3 个电机带动做升降运动, 任意一点的运动, 实际上都包含了平动和转动两种效应, 这使镜子角度的调整更困难. 所以光束线的调试和诊断仍采用逐级推进的方式, 首先在单色器后仔细诊断输出特性, 然后再将探测系统移到实验站, 无论哪一阶段, 都在探测器后接上铍窗, 以便在大气中用其他手段检测.

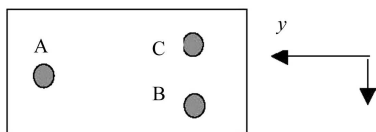


图 6 平面镜、聚焦镜调整机构示意图

调光过程中只能充分利用现有的荧光靶, 采用的主要方法是:

- 1) 利用 SHADOW 软件追迹光斑形状, 粗调平面镜、聚焦镜姿态;
- 2) 根据平面镜、聚焦镜的几何尺寸计算同步光通过二镜后的入射光、出射光高度, 对比用激光经纬仪测量 Y1, Y2 荧光靶上光斑的位置, 粗调二镜高度;
- 3) 用 $2\mu\text{m}$ 厚碳膜吸收同步光中的低能成分, 对比单色器前后 Y3, Y4 荧光靶上光斑的实际宽度和计算宽度, 粗调二镜的角度;
- 4) 在铍窗后荧光靶上观察 Bragg 角转动过程中, 光斑是否上下移动, 以判断同步光是否入射到一晶的中心, 据此精调二镜的高度;
- 5) 以计算的能谱曲线(图 7(a))为参考, 根据能谱扫描得到的高能端(6keV 附近)信号的强度, 判断入射光与镜面的夹角, 精调二镜的角度;
- 6) 用激光经纬仪检测 Y4 和铍窗后大气中的荧光靶上光斑是否在同一高度上, 由此判断入射光是否水平, 再调整二镜的角度;
- 7) 在能量扫描过程中, 通过铍窗后荧光靶上观察光斑水平方向的漂移情况调整一晶的滚角.

上述步骤都不是孤立进行的, 在调试过程中要将其有机结合、反复多次, 才能得到比较满意的结果.

3.2 光束线输出特性诊断

光束线输出特性主要包括: 光通量、光斑尺寸、能量范围、能量标定、能量分辨率、高次谐波等.

3.2.1 光通量的测量

实验站用 Si 光电二极管探测器 (AXUV-100G, IRD Inc. USA) 在真空中测量光子通量, 信号由弱电流计 (6517, Keithley, USA) 读出. 单色器晶体选用单晶 Si(111). 连续转动 Bragg 角做能谱扫描, 图 7(a) 给出实验站处光通量的实测结果, 表明光通量已达到原设计指标. 通过精细调节二镜的角度, 高能端的通量还可以进一步提高, 但在现有条件下做高精度调节比较困难, 因为在平面镜或聚焦镜后缺少如丝 BPM 类的定量测量系统.

3.2.2 光斑大小测量

图 7(b), (c) 是利用加狭缝的空气电离室通过高精度滑台扫描得到的实验站处光斑的水平和垂直宽度, 约为 $1.7\text{mm} \times 0.7\text{mm}$. 因为聚焦系统采用 1:1 聚焦方式, 在焦点处像差极小, 与光源尺寸 $1.61\text{mm} \times 0.51\text{mm}^{[1]}$ 基本一致, 所得到的光斑大小优于 $2\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的原设计指标.

3.2.3 能量范围、能量标定及能量分辨率的测量

图 7(a) 也给出了能量范围的测量结果, 采用 Si(111) 晶体, 能量范围在 2.1—6 keV; 更换为 KTP(011) 晶体, 低端可延伸到 1.2 keV.

能量标定就是测量单色器出射 X 光能量的准确度, 通过调节单色器相关参数, 使出射光子的标称值与实际值尽可能吻合. 单色器能量标定通常采用的方法是测量固体薄膜的吸收谱和某些已知气体的电离谱, 利用元素的吸收边来确定. 利用实验站的测试系统进行能量扫描测量, 分别测量插入滤光片时的光强 i_1 和移出滤光片时的光强 i_0 . 通过计算 $i_1(E)/i_0(E)$ (所用滤光片透过比), 并与滤光片材料的吸收边的理论计算结果进行比较, 得出单色器标称能量与出射光实际能量的差值^[5]. 反复调节单色器控制参数, 直到偏差最小. 本实验分别用 Ar 和 Ca 的 K 吸收边进行了能量

标定.

能量分辨率是测量出射光子的带宽, 并求其与单色器标称能量的比值, 用 $\Delta E/E$ 形式表示或以波长 $\Delta\lambda/\lambda$ 表示; 亦可用其倒数 $R = E/\Delta E = \lambda/\Delta\lambda$ 表示, R 称为能量分辨本领. 晶体单色器出射光子的带宽是晶体的 Darwin 宽度 $\Delta\theta_B$ 和同步光的垂直发射 RMS 半角宽度 σ'_{ph} 的卷积, 即: $\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_B^2 + \sigma'_{ph}{}^2}$. 由布拉格方程 $2d\sin\theta = \lambda$, 得能量分辨率 $\Delta E/E = \text{ctg}\theta\Delta\theta$, 其中 d 为晶格常数, θ 为 Bragg 角.

图 7(d) 是由 VUV/EUV 稀有气体电离室^[6] 测量得到的 Ar 的吸收谱. 另外还分别用 CaO, V_2O_5 , Na_2SO_4 , NaCl 粉末样品得到 Ca, V, S 和 Cl 的 XANES 谱. 经计算在 Ar 的 K 吸收边 (3206 eV) 附近能量分辨率优于 5000; Ca (4038.5 eV), V (5465 eV), S (2472 eV) K 吸收边附近能量分辨率分别优于 2000, 1800, 2500, 图 7(e) 给出 Ca 的 XANES 谱的测量结果.

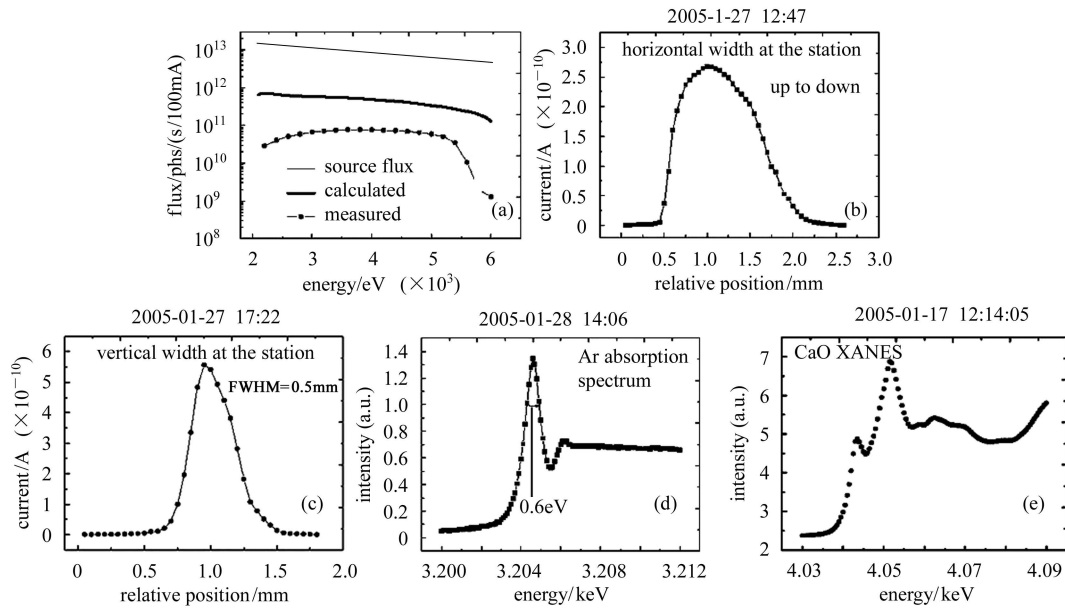


图 7 光束输出特性诊断结果
(a) 光通量; (b) 水平方向光斑长度; (c) 垂直方向光斑宽度; (d) 氩气吸收谱; (e) Ca 的吸收谱.

3.2.4 高次谐波情况

对于 Si 晶体 (空间群 Fd-3mS), (111) 面偶次谐波是消光的, 而 3 次以上谐波又被平面反射镜抑制了, 所以光谱成分很纯, 实际测量结果与此分析是一致的.

用 Si(Li) 谱仪对若干能量点进行了测量, 均没有出现高次谐波; 即使在低能端 2.1 keV 处, 3 次谐波含量也仅为基波的 10^{-4} . 测量结果如表 1 所示, 在应用中高次谐波影响可以忽略.

表 1 高次谐波含量的测量结果 (Si(111) 晶体)

E/keV	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
2nd/1st	7.16×10^{-6}	2.86×10^{-6}	9.50×10^{-6}	4.38×10^{-6}	1.48×10^{-5}	2.20×10^{-5}
3rd/1st	1.49×10^{-4}	2.32×10^{-5}	1.07×10^{-5}	3.15×10^{-6}	5.67×10^{-7}	0
E/keV	2.7	2.8	3.0	3.5	4.0	6.0
2nd/1st	3.50×10^{-5}	7.85×10^{-6}	1.22×10^{-4}	8.48×10^{-5}	8.34×10^{-6}	4.57×10^{-4}
3rd/1st	0	0	0	0	0	0

4 结论

北京同步辐射装置新建 3B3 光束线通过重新安装、准直和在线调试, 其光学输出特性均达到或超出原设计指标, 光通量达到 7×10^{10} phs/s(100mA 下), 能

量分辨本领($E/\Delta E$) 达到 5000(3.206keV).

由于在前端区出口处(屏蔽墙后)增加了光敏丝 BPM 测量系统, 使得储存环闭轨参数的调节有据可依, 也使前端区输出光斑特性的诊断能够定量化. 在 BSRF-3B3 光束线输出特性诊断和精调中, 起到重要作用.

参考文献(References)

- 1 XIA S J, ZHU P P, CUI M Q et al. Design Report of BSRF-3B3 Beamline, 2001(in Chinese)
(夏绍建, 朱佩平, 崔明启等. 中能 X 射线光束线技术设计报告, 2001, 内部报告)
- 2 ZHAO J, CUI M Q, ZHAO Y D et al. Nuclear Techniques, 2005, **28**: 583—588 (in Chinese)
(赵佳, 崔明启, 赵屹东等. 核技术, 2005, **28**: 583—588)
- 3 http://www.cxro.lbl.gov/optical_constants/
- 4 An J G et al. Ion Chamber. Beijing: Atomic Energy Press, 1997. 14—15 (in Chinese)
- 5 ZHAO Y D. The Studies of Synchrotron Radiation Beamline Output Characteristics and Detection Extreme Ultraviolet & Soft X-ray Region. Doctor's Degree Thesis. Institute of High Energy Physics, CAS, 2002 (in Chinese)
(赵屹东. SR 软 X 射线光束线输出特性及探测器性能研究. 博士学位论文, 中国科学院高能物理研究所, 2002)
- 6 ZHENG L, CUI M Q, ZHAO Y D et al. HEP & NP, 2005, **29**(3): 110—114 (in Chinese)
(郑雷, 崔明启, 赵屹东等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(3): 110—114)

Diagnosis of the Output Characteristics of BSRF-3B3 Front End and Beamline*

ZHAO Jia^{1,2} CUI Ming-Qi^{1,1)} ZHAO Yi-Dong¹ TIAN Yu-Lian¹ ZHOU Ke-Jin¹ ZHENG Lei¹
ZHU Jie¹ MA Chen-Yan¹ CHEN Kai¹ SUN Li-Juan¹ HAN Yong¹

1 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2 (Fundamental Department, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China)

Abstract All of the output characteristics of BSRF-3B3 beamline have achieved or surpassed the designed values after re-aligning and re-adjusting on-line. The flux is 7×10^{10} phs/s/100mA and the best result of energy resolution ($E/\Delta E$) is 5000@3.206keV at the station. The adjusting process, the diagnostic methods and the measured results of the output characteristics of both the front end and beamline are introduced in detail. The functions and shortages of double-wire BPM and fluorescence BPM for diagnosing and adjusting are analyzed.

Key words synchrotron radiation, front end, beamline, output characteristics, diagnosis

Received 14 March 2005

*Supported by National High Technology Project (863-804)

1) E-mail: cuimq@ihep.ac.cn