

北京同步辐射装置3B3光束线传输效率及输出特性的计算*

赵佳^{1,2} 崔明启^{1;1)} 赵屹东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 从北京正负电子对撞机储存环弯转磁铁光源的辐射特性入手,分析了BSRF-3B3光源及其光束线光学系统的输出特性,分别给出各光学元件的传输效率和采用不同单色器晶体在样品处的计算结果.为光束线设计、调试及诊断提供了理论依据.同时也为弯转磁铁光源光束线的输出特性的计算,提供了一个模式.

关键词 同步辐射 弯转磁铁 光束线 传输效率 输出特性

1 引言

北京同步辐射装置(BSRF)新建3B3光束线是目前国内唯一一条工作在中等能区(1.2—6keV)的单色、双向聚焦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].

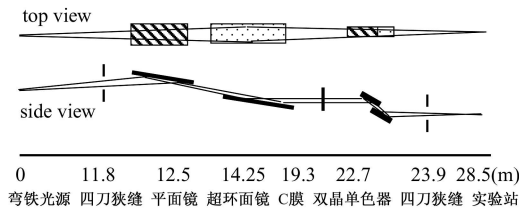


图1 3B3光束线光路原理图

光束线由北京正负电子对撞机(BEPC)储存环第三区3B3弯转磁铁引出,经前端区两个固定光阑限束后,光束线可接收到5mrad(H)×0.34mrad(V)的光束,以掠入射角 $\alpha = 0.55^\circ$ 入射到平面镜.图1是3B3光束线光路原理图,其光路设计原理是:(a)水冷平面镜500mm×150mm分为两个反射区域,一为Si镜(硅基底,无镀层),一为Ni镜(硅基底镀Ni),分别与不同的单色器晶体组合,其作用是切除6keV以上高能同步光,降低晶体热负载和抑制高次谐波;(b)超环面镜

(850mm×100mm)为柱面镜压弯,镀Ni,缩放比为1:1,实现光束在样品处的水平和垂直双向聚焦;(c)双晶单色器,拟选用3对晶体覆盖全部设计能量范围;(d)C膜用于滤除低能杂散光,进一步减少晶体的热负荷.表1给出光源参数和光束线设计参数.

根据电子沿圆形轨道经过弯转磁铁时辐射的角分布规律^[2]及BSRF-3B3光源参数,计算得到BSRF-3B3光源特性如图2所示.从表1和图2中可以看到,特征能量在2.28keV,1.5—6keV的设计能量区间恰在其最佳能量范围内.

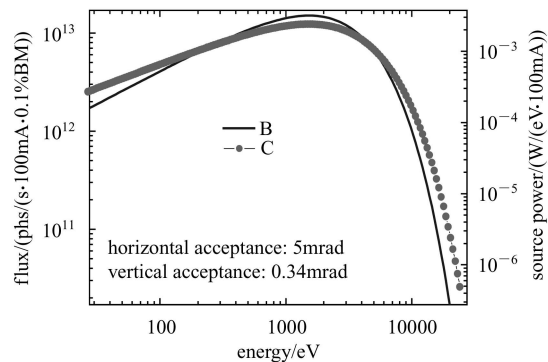


图2 专用模式下3B3光源通量谱及功率谱曲线
实线为通量谱,点线为功率谱.

2005-08-15 收稿, 2005-10-21 收修改稿

* 国家高技术(863-804)资助

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

表 1 专用模式下 3B3 光源参数及光束线设计参数

光源参数		设计参数	
电子能量/束流	$E_e = 2.2\text{GeV}$ $I_e = 100\text{mA}$	光子能量范围	1500—6000eV
磁场强度	0.7T	能量分辨率	1000—4000
电子束发散度	$\sigma_x = 0.69\text{mm}$ $\sigma'_x = 0.31\text{mrad}$	输出通量	$10^9 - 10^{10}\text{phs/s/100mA}$
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma'_x, \sigma'_y$	$\sigma_y = 0.22\text{mm}$ $\sigma'_y = 0.057\text{mrad}$	接收角	$5\text{mrad(H)} \times 0.34\text{mrad(V)}$
特征能量	2.28keV	光斑尺寸	$2\text{mm(H)} \times 1\text{mm(V)}$

2 传输效率的计算

单一光学元件的传输效率是其反射(或透射)效率与垂直接收效率的乘积, 以下分别计算各元件的效率, 进而求得光束线的总传输效率.

2.1 平面镜的效率

2.1.1 反射效率

前置聚焦单元的平面镜和聚焦镜是主要的反射元件. 来自光源点的光的电矢量方向分别垂直/平行于入射面的 S 光/P 光, 其反射率分别为^[3]

$$R_S = \frac{|\cos\phi - \sqrt{n^2 - \sin^2\phi}|^2}{|\cos\phi + \sqrt{n^2 - \sin^2\phi}|^2}, \quad (1)$$

$$R_P = \frac{|n^2 \cos\phi - \sqrt{n^2 - \sin^2\phi}|^2}{|n^2 \cos\phi + \sqrt{n^2 - \sin^2\phi}|^2},$$

其中 ϕ 为入射角, n 为材料的折射系数. (1) 式是反射面为理想情况下的计算关系, 实际应用时还应考虑表面粗糙度的影响^[4]

$$R = R_0 \exp \left\{ - \left(\frac{4\pi\sigma \cos\phi}{\lambda} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

这里, R , R_0 分别是粗糙表面和理想光滑表面的反射率; λ 是入射光波长; σ 是粗糙度的均方根偏差(rms)值, 计算时取 0.5nm. 所以, 平面镜的反射效率为

$$\varepsilon_{\text{PM-ref}} = R_S \exp \left\{ - \left(\frac{4\pi\sigma \cos\phi}{\lambda} \right)^2 \right\}. \quad (3)$$

2.1.2 平面镜的垂直接收效率

见图 3, S 为光源, R_1 是平面镜中心到光源的水平距离, $2W_0$ 是镜子的长度, 则平面镜的垂直接收角 $2\psi_{\text{PM-acc}} = 2W_0 \sin\alpha / R_1$, 平面镜的接收效率 $\varepsilon_{\text{PM-acc}}$ 用误差函数 erf 表示为

$$\varepsilon_{\text{PM-acc}} = \text{erf} \left(\frac{\psi_{\text{PM-acc}}}{\sqrt{2}\sigma'_{\text{ph}}} \right), \quad (4)$$

根据(2), (3), (4)可得到的平面镜的传输效率:

$$\varepsilon_{\text{PM}} = R_S \exp \left\{ - \left(\frac{4\pi\sigma \cos\phi}{\lambda} \right)^2 \right\} \times \text{erf} \left(\frac{\psi_{\text{PM-acc}}}{\sqrt{2}\sigma'_{\text{ph}}} \right). \quad (5)$$

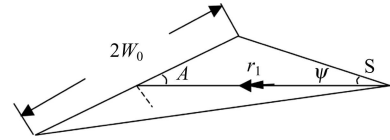


图 3 平面镜垂直接收角示意图

2.2 超环面聚焦镜的效率

镀 Ni 超环面镜反射效率的计算同上.

聚焦镜的垂直接收效率可根据如下分析得出: 理想的聚焦镜面形应为椭球面, 光源和像点各位于椭球的两个焦点上, 但因制造困难, 以超环面代替椭球面. 即利用压弯聚焦机构, 可将反射柱面压为类似轮胎内表面的超环面^[5]. 如图 4 所示, 设 a , d 分别为椭球面的长半轴和短半轴, w , h 分别为弧矢面内聚焦镜凹槽的宽度和高度. 因为聚焦镜采用 1:1 的聚焦方式, 所以光源到镜面中心的距离为 a ($a = 14.25\text{m}$). 镜面长度由 L_1 和 L_2 两部分组成, L_1 为由垂直接收角 θ (在特征能量点 $\theta = 0.34\text{mrad}$) 决定的接收长度, L_2 为由水平接收角 ψ ($\psi = 5\text{mrad}$) 决定的接收长度. 由几何关系得到

$$L_1 = (a \times \theta) / \sin\alpha = (14.25 \times 0.34) / \sin 0.55^\circ = 505\text{mm}, \quad (6)$$

$$L_2 = h / \text{tg}\alpha, \quad h = d - \sqrt{d^2 - \frac{w^2}{4}}, \quad d = a \sin\alpha, \quad w = a \cdot \psi,$$

$$\therefore L_2 = \frac{a}{\text{tg}\alpha} \times \left[\sin\alpha - \sqrt{\sin^2\alpha - \frac{\psi^2}{4}} \right] = 492\text{mm}. \quad (7)$$

计算得镜面总长 997mm. 为使压弯镜提高效率, 保证镜面品质, 并减轻真空负担, 降低造价, 压弯镜长度可根据 $L_2 < L \leq L_1 + L_2$ 的关系确定. 由于聚焦镜的长度大于由垂直接收角 θ 决定的长度 L_1 , 故其垂直接收效率为 1. 即聚焦镜的效率就是 Ni 镀层的反射效率.

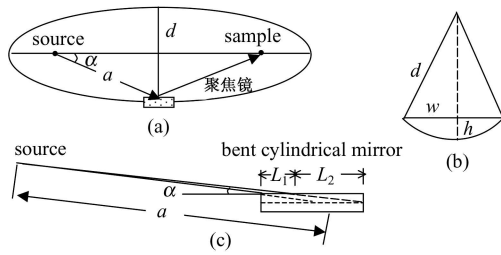


图 4 超环面镜聚焦系统
(a) 光路示意图; (b) 侧视简图; (c) 正视简图.

2.3 晶体单色器的衍射效率

同理, 晶体的尺寸足够大, 垂直接收效率也为 1.

在同步光发散度一定的条件下, 晶体的衍射效率由其达尔文宽度(Darwin Width) $\Delta\theta_B$ 决定, $\Delta\theta_B$ 在 μrad 量级, 与波长 λ 和晶体的反射面 $[hkl]$ 有关, 还与入射角有关. 由 SHADOW 软件计算出几个点的 Darwin Width 后, 拟合出 $\Delta\theta_B$ 随能量 E 变化的函数关系曲线(图 5 实线), 则晶体的衍射效率用误差函数 erf 表示为

$$\varepsilon_{\text{DCM-diff}} = \text{erf} \left(\frac{\Delta\theta_B}{\sqrt{2}\sigma'_{\text{ph}}} \right). \quad (8)$$

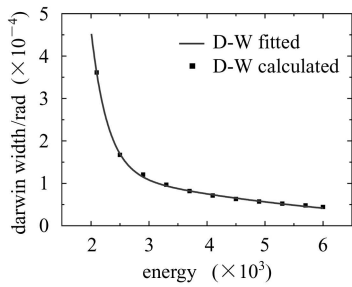


图 5 单晶 Si(111) $\Delta\theta_B$ - E 关系曲线

2.4 C 膜的透射强度

X 射线穿过薄膜时, 强度衰减写成朗伯定理:

$$I = I_0 e^{-\rho\mu r} \Rightarrow \varepsilon_{\text{C-trans}} = \frac{I}{I_0}, \quad (9)$$

其中 $\mu = \mu(E)$, 是(质量)吸收系数; ρ 为质量密度, $\rho_c = 3.51\text{g/cm}^3$; r 为薄膜厚度, $r_c = 0.002\text{mm}$.

2.5 总传输效率

由以上分析可知, 前置平面镜决定了垂直接收效率, 聚焦镜决定了水平接收效率. 图 6 给出了单色器为 Si(111) 晶体时各光学元件的传输效率的计算结果. 光束线总传输效率为

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{PM}} \times \varepsilon_{\text{TM-ref}} \times \varepsilon_{\text{DCM-diff}} \times \varepsilon_{\text{C-trans}}, \quad (10)$$

其中 ε_{PM} 为平面镜的传输效率, $\varepsilon_{\text{TM-ref}}$ 为聚焦镜的反射率, $\varepsilon_{\text{DCM-diff}}$ 为单色器的衍射效率, $\varepsilon_{\text{C-trans}}$ 为碳膜的

透过率.

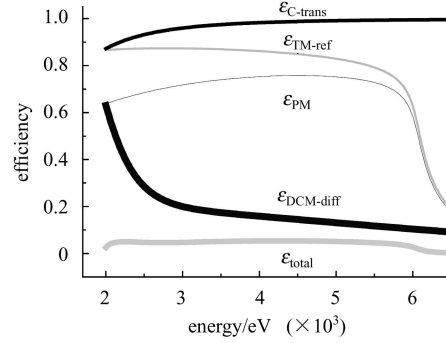


图 6 单色器选用 Si(111) 晶体时光束线各光学元件的传输效率

3 样品处光学输出特性分析

3.1 能量分辨率

能量分辨率就是单色器在某一能点下出射光子的带宽与该能点的比值, 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 Width $\Delta\theta_B$ 和同步光的垂直发射 RMS 半角宽度 σ'_{ph} 的卷积, 即: $\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_B^2 + \sigma_{\text{ph}}'^2}$. 由布拉格方程 $2d\sin\theta = \lambda$ (d 为晶格常数, θ 是 Bragg 角), 得能量分辨率:

$$\Delta E/E = \text{ctg}\theta\Delta\theta. \quad (11)$$

3.2 输出通量

(10) 式是单电子辐射对光束线传输效率的贡献, 而图 2 给出的是由光源输出的 0.1% BW 内的光子通量 N_{src} , 同时由于光束线的分辨本领的影响, 样品处的输出通量 N_{sam} 做如下修正:

$$N_{\text{sam}} = N_{\text{src}} \times \varepsilon_{\text{total}} \times \frac{\Delta E}{0.1\%E} [\text{phs/s}]. \quad (12)$$

4 结果与讨论

根据上述理论分析, 对 BSRF-3B3 光束线在使用不同的单色器晶体下的输出特性进行了计算, 结果如图 7 所示.

4.1 前置平面镜镀层的选择

单色器的 Bragg 角机械转动范围约 19° — 75° . 利用 Bragg 公式可得各晶体的能量覆盖范围(见表 2). 设平面镜表面粗糙度为 0.5nm , 其反射率随能量变化曲

线如图7(a)所示. Ni在1—6keV能段提供了高且平坦的反射率;同时切除6.0keV以上的硬X射线;在400—1800eV范围内, Si镜的反射率基本也为一均匀的平台. 根据晶体覆盖的能区范围, KTP(011), InSb(111)和Si(111)应与Ni镜组合, beryl(10 $\bar{1}$ 0)与Si镜组合, 反射率比较理想. 但KTP(011), InSb(111)若与Ni镜组, 高次谐波会比较严重, 如KTP(011)在1200—1500eV范围内的2, 3, 4次谐波都存在. 所以, KTP(011), InSb(111), beryl(10 $\bar{1}$ 0)晶体还是与Si镜组合, 有利于光谱纯度的改善. Si(111)晶体与Ni镜组合很理想, 因为Si(111)面偶次谐波是消光的, 而3次以上谐波可以被Ni镜抑制, 光谱成分很纯.

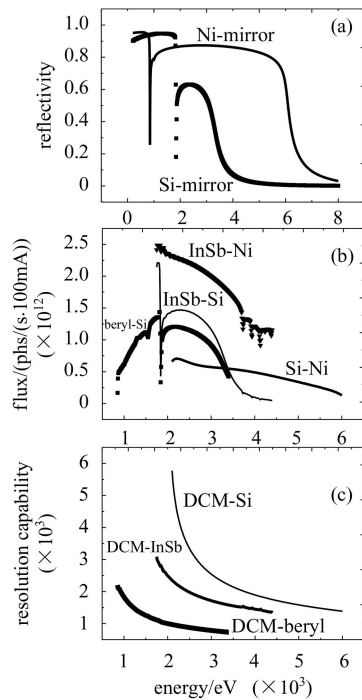


图7 光束输出特性计算结果
(a) 平面镜反射率曲线; (b) 输出通量; (c) 能量分辨本领.

4.2 能量范围的选择

在满足Bragg条件的基础上, 能量范围的选择还要考虑材料内禀性质的影响, 尽量在选择能量范围

内通量曲线比较光滑, 信号也比较强. 合适的能区范围分析如下(参见图7(b)):

Si是非常理想的分光晶体. 在能量覆盖范围内既没有高次谐波也无自身结构的影响, 所以合适的能区范围: 2.05—6.0keV.

InSb晶体无论与Ni镜组合还是与Si镜组合, 其高能端通量曲线都不光滑, 这是由In的吸收边(L_3 -3.73keV, L_2 -3.938keV, L_1 -4.238keV)和Sb的吸收边(L_3 -4.132keV, L_2 -4.38keV)引起的. 由于Si平面镜在3keV后反射率锐减, 所以由吸收边引起的通量曲线的跳变比与Ni镜组合时要弱一些, 较为合适的能区范围取1.75—3.7keV. 但需注意在此范围内, Si的k边使强度锐减; Si边后曲线的微小抖动(图中细实线)分别是In的 L_3 边、 L_2 边及Sb的 L_3 边、 L_2 边的二次谐波的影响.

Beryl晶体分子式为 $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$. Beryl和KTP两种晶体的主要作用是产生低能单色光. 由于聚焦镜镀Ni, 受Ni的(L_3 -0.852keV, L_2 -0.87keV)吸收边的影响, 起始范围可从Ni的边后开始; 高能端与InSb晶体的低能端衔接. 即能区范围取0.9—1.75keV. 在此范围内还有Al, Si的k吸收边对强度的影响不容忽视.

KTP晶体能区范围取1.2—1.74keV. 若扩大能量范围则存在由P, K和Ti的k吸收边的二次谐波引起的晶体吸收增强. 这已由实验结果证实.

表2给出了所用单色器晶体参数(beryl和KTP晶体二择一)、上述分析结果及每个晶体有效能区范围内的重要元素的吸收边.

4.3 输出通量

图7(b)所示输出通量由高到低对应晶体的顺序是InSb, Si, Beryl, 可以认为衍射强度是随材料原子序数的增大而增强的. 这与LNLS软X射线谱学光束线的测量结果是一致的^[6]. UVSOR-BL7A对Beryl和KTP在1.2—1.7keV范围内通量的测量结果大致相等^[7]. BSRF-3B3对Si(111)晶体做单色器时输出通量的测量结果与计算结果基本吻合^[7].

表2 单色器晶体参数

晶体	空间群	晶格常数/(2d/nm)	覆盖能区/keV	有效能区/keV	Bragg角/deg	主要元素吸收边
beryl(10 $\bar{1}$ 0)	$P_{6/m}cc$	1.595	0.82—2.35	0.90—1.75	66.1—31.2	Na-k Mg-k Cu-L Zn-L
KTP(011)	$P_{n2_1}a$	1.095	1.2—3.4	1.2—1.75	70.6—32.6	Mg-k Al-k
InSb(111)	$F-43m$	0.748	1.75—5.0	1.75—3.7	72.3—26.6	P-k S-k Cl-k K-k
Si(111)	F_d-3m	0.6271	2.05—6.0	2.05—6.0	70.3—19.2	P-k S-k Cl-k K-k Ca-k Ti-k V-k Mo-L Pd-L Ag-L

4.4 能量分辨率

图7(c)给出能量分辨率由高到低对应晶体的顺序是Si, InSb, Beryl, 其中Beryl是天然生长晶体, 但本文是将Beryl视为完美晶体计算的. 因为Beryl晶体的非完美程度与生长条件、生长环境密切相关, 同时Beryl晶体的热导率低, 耐辐照性能差, 所以实际的分辨本领要低于计算值. 在BSRF-3B3光束线上对Si(111)晶体分辨本领的测量结果与计算结果基本吻合^[8].

综上所述, 在2.05—3.7keV, 若需要高通量, 就选用InSb(111)晶体; 若要求光束线的分辨率高, 就用Si(111)晶体. KTP晶体和Beryl晶体也各有优势: KTP是人工晶体, 在完美性和热稳定性方面比Beryl

晶体好, 在两者共同覆盖的能区, KTP为首选; 而Beryl的晶格常数更大, 可以将能量向更低的能区扩展.

5 结论

中能X射线有着广泛的应用前景, 国外已做了许多工作^[9—12], 但对光束线输出特性的理论分析还未见报道, 通常是给出实验测量的若干能点的结果^[6,13—18]. 本文从分析3B3偏转磁铁光源的辐射特性入手, 计算了包含前端区在内的整个光束线系统的输出特性, 为光束线的调试和诊断提供了理论依据. 同时也为弯铁光源光束线的输出特性的计算, 提供了一种计算方法.

参考文献(References)

- 1 XIA Shao-Jian, ZHU Pei-Ping, CUI Ming-Qi. Design Report of BSRF-3B3 Beamline. 2001, Private Communication (in Chinese)
(夏绍建, 朱佩平, 崔明启. 中能X射线光束线技术设计报告, 2001, (内部交流))
- 2 http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec_2-1.htm
- 3 David Attwood. Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation, Cambridge University Press, 1999. 73
- 4 William Burling Peatman. Grating, Mirrors and Slits Beamline design for soft X-Ray synchrotron radiation Sources, Gordon and Breach Science Publishers. 147
- 5 http://www.nslr.ustc.edu.cn/acadm_exchange/exchange/3meeting.html
- 6 Abbate M. J. Synchrotron Rad., 1999, **6**: 946—972
- 7 <http://www.uvsor.ims.ac.jp/activity/actpdf2001new/currentst01.pdf>
- 8 ZHAO Jia, CUI Ming-Qi, ZHAO Yi-Dong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, **29**(12): 1205 (in Chinese)
(赵佳, 崔明启, 赵屹东等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(12): 1205)
- 9 Takata Y, Shigemasa E, Kosugi N. J. Synchrotron Rad, 2001, **8**: 351—353
- 10 <http://www.uvsor.ims.ac.jp/activity/actpdf2001new/aritani01new.pdf>
- 11 Padežnik Gomilšek J, Kodre A, Arčon I et al. Phys. Rev., 2001, **A64**(2): 022508-1
- 12 HAN Yang-Su et al. J. Synchrotron Rad., 2001, **8**: 728—730
- 13 Michael Krumrey. J. Synchrotron Rad., 1998, **5**: 6—9
- 14 Smith A D. J. Synchrotron Rad., 1998, **5**: 716—718
- 15 MacDowell A A. Rev. Sci. Instrum., 1986, **57**(11): 2667—2679
- 16 Murata T. Rev. Sci. Instrum., 1992, **63**(1): 1309—1312
- 17 Dann Tang-Eh. J. Synchrotron Rad., 1998, **5**: 664—666
- 18 http://www.spring8.or.jp/e/publication/res_fro/RF03/115-116.pdf

Calculation of Transmission Efficiency and Output Characteristics for Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF) 3B3 Beamline^{*}

ZHAO Jia^{1,2} CUI Ming-Qi^{1;1)} ZHAO Yi-Dong¹

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 Based on the radiation characteristics of the bend magnet source, the output characteristics of the BSRF-3B3 beamline was analyzed and discussed. The result is the foundation of adjustment and diagnosis of the beamline. A calculation model is provided to analyze characteristics of beamlines attached to bend magnet sources.

Key words synchrotron radiation, bend magnet, beamline, transmission efficiency, output characteristics

Received 15 August 2005, Revised 21 October 2005

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

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