

1W2A 小角散射光束线的物理设计

姚德强^{1,2} 王 鹤^{1,3} 刘 鹏¹

1(中国科学院高能物理研究所 北京同步辐射实验室 北京 100049)

2(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230026)

3(吉林大学物理学院光信息科学与技术系 长春 130000)

摘要 本文主要介绍了目前北京同步辐射实验室正在建设的新的的小角散射光束线——1W2A 的设计方案, 以及北京正负电子对撞机二期改造工程完成后该束线能够达到的性能指标。

关键词 同步辐射, 小角散射, 弯晶, 光束线

中图分类号 O572.21

X 光小角散射实验方法^[1]能够探测物质中取向体系颗粒的形状、大小等一系列信息, 可用于分析高分子材料相变、相分离、共聚反应中分子网络形状的变化, 以及其他体系包括生物大分子溶液中颗粒的大小、形状和动态变化等, 应用十分广泛。

同步辐射光源因其高亮度、高准直性、广谱可计算等一系列优点而成为小角散射实验最重要的光源。当前国际上几乎所有的同步辐射装置都建有专门用于小角散射的实验站。

北京同步辐射实验室(BSRF)4B9A 光束线是我国目前唯一的一条小角散射光束线^[2], 该束线引自弯铁光源, 并且与衍射实验站分时共用, 无论是光学性能还是机时都受到很大限制。随着我国小角散射实验用户的不断增加, 拓展原有线站的需求越来越突出。

2005 年北京同步辐射实验室开始在储存环一区新建 Wiggler 插入件 1W2, 并计划引出两条新的光束线——BSRF 的第二条生物大分子束线(1W2B)以及小角散射光束线(1W2A)。本文详细介绍了新的小角散射光束线的设计方案, 以及北京正负电子对撞机二期改造完成后该束线能够达到的性能指标。

1 光束线主要设计技术指标

小角散射实验对光束的强度、发散度以及光斑尺寸都有较高要求。根据北京高能物理研究所正负电子对撞机电子储存环的性能以及小角散射实验的特点和需求, 新的小角散射束线的主要设计指标如下:

光束线接收角度: $3.5 \text{ mrad(水平)} \times 0.21 \text{ mrad(垂}$

直)。

样品处光子通量: 好于 $10^{12} \text{ s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ ($1.54 \text{ \AA}$, 2.5 GeV , 200 mA)。

光束线能量: 两个波长—— $1.54 \text{ \AA}$ (8.05 keV), $0.943 \text{ \AA}$ (13.15 keV)。

能量分辨率: 好于 6×10^{-4} 。

样品处光束发散性: $3.0 \text{ mrad(水平)} \times 0.5 \text{ mrad(垂直)}$ 。

聚焦光斑大小: $1.5 \text{ mm(水平)} \times 0.3 \text{ mm(垂直)}$ 。

2 光束线位置和总体布局

新的小角散射光束线 1W2A 和第二条生物大分子光束线 1W2B 是从同一个插入件引出的, 该插入件位于北京同步辐射装置的第一象限区, 两线间隔 3 mrad , 共用同一前端区。为使两条束线空间有效分开, 1W2A 采用弯晶单色器进行单色处理。束线的几何位置如图 1 所示。

1W2A 小角散射光束线主要由弯晶单色器和聚焦镜构成, 此外还有光阑、光闸、光斑位敏探测器以及各种管道、板阀和真空设备等。

在小角散射实验中, 根据不一样品的需求, 样品到探测器的距离从 0.5 m 到 4 m 不等; 而为了提高角度分辨率, 束线焦点一般定在探测器处。在光学元件的布局上, 由于光束线前端出墙处已经距离光源 18.6 m , 综合考虑光斑大小与发散角的关系, 以及探测空间的需求, 经过优化设计, 焦点位置选在弯晶后 10 m , 此时光束水平方向 M 值(物像距比值)约等于 2, 相空间尺度大小大约为水平方向 $4.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 垂直方向 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

第一作者: 姚德强, 男, 1979 年出生, 2002 年毕业于中国科学技术大学近代物理系, 目前为在读博士研究生

收稿日期: 2006-09-30, 修回日期: 2007-01-08

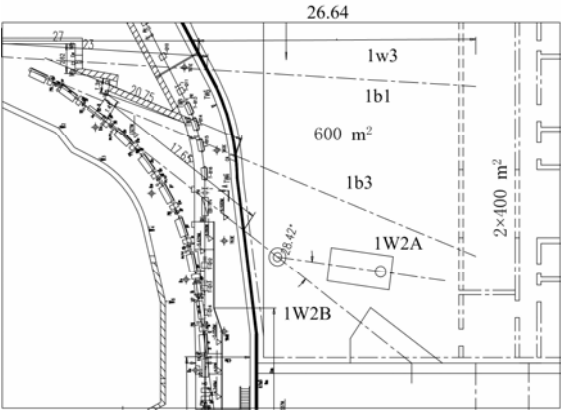


图 1 BSRF—1W2A 光束线在储存环中的几何位置

Fig.1 Position of beam line 1W2A in storage ring

光束线具体结构和整体布局见图 2 所示。束线

全长约 5.5 m，其中弯晶单色器距离光源 19.7 m，偏角 28.44°；聚焦镜距离光源 21.8 m，探测器(焦点位置)到光源的距离为 29.7 m。

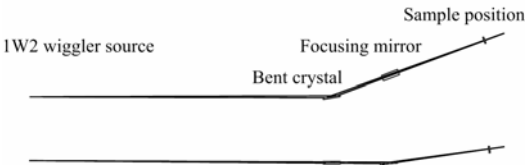


图 2 1W2B 光束线原理示意图

Fig. 2 The sketch map of beamline 1W2B

3 光束线设计及光学性能

小角散射光束线的光源是一个 wiggler 插入件，表 1 和表 2 给出光源的有关参数。图 3 给出的是由该插入件得到的光谱情况。

表 1 1W2 光源处储存环有关参数
Table 1 Storage ring parameters of 1W2 beamline

参数名称 Parameter name	同步模式 Synchrotron mode	对撞模式 Bump mode
耦合 Coupling	10%	4%
能量 E/GeV	2.5	1.89
流强 I/mA	200	910
水平包络函数 β_x /m	6.03	25
垂直包络函数 β_y /m	6.24	25
束团水平均方根尺度 σ_x /mm	1.04	2.06
束团垂直均方根尺度 σ_y /mm	0.25	0.42
束团水平均方根发散角 σ'_x /mrad	0.32	0.25
束团垂直均方根发散角 σ'_y /mrad	0.12	0.08
束团水平发射度 emitX/cm·rad	3.37×10^{-5}	5.25×10^{-5}
束团垂直发射度 emitY/cm·rad	2.89×10^{-6}	3.6×10^{-6}

表 2 1W2 插入件主要物理设计参数
Table 2 Main parameters of 1W2 wiggler

参数名称 Parameter name	物理设计值 Design value
1W2 直线节长度 Length of 1W2/ m	1.8
周期数 Number of period	7
周期长度 Length of one period /mm	228
磁铁间隙范围 Range of clearance/ mm	30-200
峰值磁场 Peak value of magnetic field B_0 / T	1.4(gap=44 mm)
K 值	29.79
磁铁材料 Material of magnet	NdFeB
特征能量 Characteristic energy value / keV	5.11

由 wiggler 引出的白光首先通过弯晶单色器进行单色化处理。高通量但波长单一、固定是弯晶束线的一个特点。当前多数小角散射实验选定 1.54 Å 波长，这一方面是基于对多数样品衍射能力和吸收效应的综合考虑，另一方面是为了便于和常规光源的数据进行比较，因此 1.54 Å 也是 1W2A 束线设计时首先选定的波长。

为满足一些实验更高分辨本领的需求，第二个波长定在 1 Å 左右。两个波长分别由两块晶体实现，通过弯晶单色器垂直移动完成晶体及波长的切换。在选择具体晶体时，既要满足波长，又要保证偏出的单色光方向相同。通过对不同晶体及晶面的计算，最终确定选用 Si(111)和 Si(220)，可分别引出 1.54 Å 和 0.943 Å 的单色束线，偏转角 28.44°。

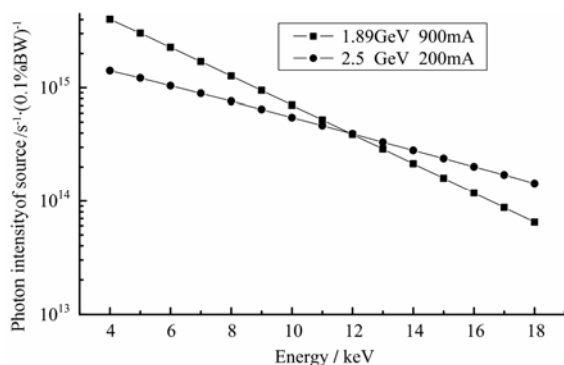


图3 1W2光源的光谱
Fig.3 Spectra of 1W2 source

为了实现聚焦,晶体采用斜切技术,同时也有效地提高晶体接受光束的效率。在单色化和水平分光的同时,通过压弯晶面同时实现对束线的水平聚焦。晶面斜切角度和压弯半径由以下公式计算得到:

$$p/R = \sin(\theta + \alpha) \quad (1)$$

$$q/R = \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

式中 p 是物距, q 是像距, R 是压弯半径, α 为斜切角, θ 为入射 Bragg 角。根据晶体和所选波长, $\theta = 14.22^\circ$, 弯晶物距 $p = 19.7$ m, 像距 $q = 10$ m(性能优化并考虑空间条件的结果), 由此计算得到晶体的斜切角 $\alpha = 4.72^\circ$, 压弯半径 $R = 60.62$ m。

小角散射束线对光源的水平接收角度范围是 $-3.5 \sim 0$ mrad, 垂直方向的接受角度范围是

± 0.18 mrad, 晶体大小为 $214 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)。

束线垂直方向的聚焦通过压弯柱面镜完成。聚焦镜以硅单晶为基底, 表面镀层选择铯(厚度 $400 \text{ \AA}$), 这样可以保证 $1.54 \text{ \AA}$ 和 $0.94 \text{ \AA}$ 的 X 光束反射率都接近 90%。镜体长 1 m, 表面粗糙度小于 $5 \text{ \AA}$, 面形误差小于 3 角秒(子午方向)。聚焦镜的压弯半径通过以下公式计算而得:

$$2/R = \sin \theta / p + \sin \theta / q \quad (3)$$

式中 R 为压弯半径, p 为聚焦镜物距, 其值为 21.8 m, q 为像距, 其值为 7.9 m, θ 为掠入射角, 对传输效率优化后其值定为 4.6 mrad。将以上各值代入公式(3)得到聚焦镜压弯半径 $R = 2517$ m。

小角散射实验中, 不同的实验对于光斑尺寸以及光束发散度要求不尽相同, 如在常规一维散射中, 只对光束垂直方向的尺寸和发散要求较高; 而在二维小角散射实验中, 则对束线水平方向的性能也有所要求。通过弯晶单色器后的四刀光阑及样品前四刀狭缝的组合应用, 可以根据需要完成对束斑大小及发散的调节。需要时也可以通过改变聚焦镜的压弯半径增加束斑垂直尺寸, 使其与水平大小匹配。

表 3 给出根据设计方案, 在北京正负电子对撞机二期改造(BEPCII)完成后, 在 2.5 GeV、流强 200 mA 的运行模式下, 小角散射束线能够达到的各项性能的理论计算结果。

表3 1W2A 光束线在 BEPCII 改造后各项性能的计算结果
Table 3 Calculated results of the 1W2A beamline(2.5GeV, 200mA)

能量 Energy /keV	光斑大小 Spot size H $\times$ V/mm ²	发散度 Divergence H $\times$ V/mrad ²	能量分辨率 Energy resolution/eV	光子通量 Photon flux/s ⁻¹
8.05	1.4 $\times$ 0.2	3.3 $\times$ 0.5	4.8	1.5 $\times$ 10 ¹³
13.15	1.3 $\times$ 0.2	3.1 $\times$ 0.5	6.8	4.5 $\times$ 10 ¹²

4 光束线传输效率的分析

在小角散射光束线中, 弯晶单色器、聚焦镜、

碳吸收膜、铍窗和铝窗等都会对束线性能产生影响, 表 4 给出各元件对光束传输效率的计算结果。

表4 1W2A 光束线各光学部件对传输效率的影响
Table 4 Transmission of each optical element in 1W2A (0.1%BW)

能量 Energy /keV	弯晶单色器 Bending crystal	聚焦镜 Focusing mirror	碳吸收膜 Carbon film(0.1mm)	铍窗 Be window(400 μ m)
8.05	3.6%	53%	91%	93%
13.15	2.0%	57%	98%	98%

5 结 论

新的小角散射光束线的设计思想主要是保证高通量,选择合适的波长和能量分辨率,减小光斑尺寸以及发散性。在弯晶单色器中使用 Si(111)和 Si(220)可分别获得 1.54 Å 和 0.943 Å 两种波长的单色束线。根据计算结果,在 BEPCII 改造后新的小角散射光束线光强可以比原有束线提高 2 至 3 个数量级,从而可以大大缩短实验时间,提高数据质量,为我国小角散射领域的研究工作做出更大的支持和贡献。

目前小角散射光束线与实验站正在紧张建设中,预计将于 2007 年初完成并投入使用。

参考文献

- 1 Guinier A, Fournet G. Small angle scattering of X-ray, New York: Wiley, 1955
- 2 董宝中, 生文君, 李光城, 等. 高能物理与核物理, 1995, 19(3): 284
DONG Baozhong, SHENG Wenjun, LI Guangcheng, *et al.* High Energy Phys Nucl Phys, 1995, 19(3): 284

The physical design of the small angle X-ray scattering branch of 1W2A beamline

YAO Deqiang^{1,2} WANG He^{1,3} LIU Peng¹

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

2 (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

3 (Science and Technology of Optical Message Department, Physical Institute, Jilin University, Changchun 130000, China)

Abstract A new beamline 1W2A for small angle X-ray scattering is going to be constructed in Beijing Synchrotron Radiation Laboratory. It can provide higher intensity at two wavelengths of 1.54Å and 0.97Å. The design and the optical characters of the beamline are described in detail in this paper.

Key words Synchrotron radiation, Small angle X-ray scattering, Bent crystal, Beamline

CLC O572.21