

# 北京同步辐射实验室 X 光形貌学 研究的光源特性及实验应用

赵际勇<sup>1)</sup> 杨平<sup>2)</sup> 蒋建华<sup>1)</sup> 田玉莲<sup>1)</sup> 韩勇<sup>1)</sup>

王春喜<sup>1)</sup> 石才土<sup>1)</sup> 洗鼎昌<sup>1)</sup>

1) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

2) (南京大学固体微结构实验室, 南京 210008)

## 摘 要

本文讨论了北京同步辐射实验室 X 光形貌站相应的光源特性, 给出了在该状态下的形貌分辨率以及对四硼酸锂晶体白光形貌衍射强度的计算结果。

## 一、引 言

北京同步辐射实验区建设是北京正负电子对撞机 (BEPC) 工程的一部分。第一条同步辐射光束线是 4W 1A 白光束线, 用于 X 光形貌学, 进行半导体及各种人工晶体内部结构缺陷的研究。4W 1A 束线位于加速器 IV 区, 从第一个同步辐射专用单周期 wiggler 磁铁 SRW1 引出硬 X 光波段连续谱。1989 年 4 月首先在该束线的前端区引出同步辐射 X 光, 7 月在束线末端调出白光, 并完成了同步辐射的第一个物理研究工作——硅中氢致缺陷的白光形貌研究。到目前为止, 利用形貌站的设备已完成大量物理研究工作。本文讨论了 4W1A 束线的同步辐射光学性能与指标, 给出了相应的形貌分辨率和白光衍射强度。

## 二、光源及束线描述

### 1. 4W1A 束线概貌及光谱特性

北京正负电子对撞机是一个高能正负电子对撞与同步辐射应用兼用的储存环, X 光形貌实验站位于从 wiggler 磁铁 SRW1 引出的 4W 1A 束线末端<sup>[1]</sup>。该磁铁为一个单周期的波长移动器<sup>[2]</sup>, 最高磁场强度为 1.8T。4W 1A 光束线及形貌站概貌如图 1 所示。在该束线内布置有两个厚度为 250 $\mu\text{m}$  的 Be 膜和一个厚 25 $\mu\text{m}$  的 Al 膜作为隔离真空的窗口, 束线的真空度为  $10^{-4}$ — $10^{-5}$ Pa。在前端区和束线末端分别置有安全光闸和光子光闸, 对实验中的同步辐射光进行安全有效的控制。在距光源 14.064m 和 38.101m 的位

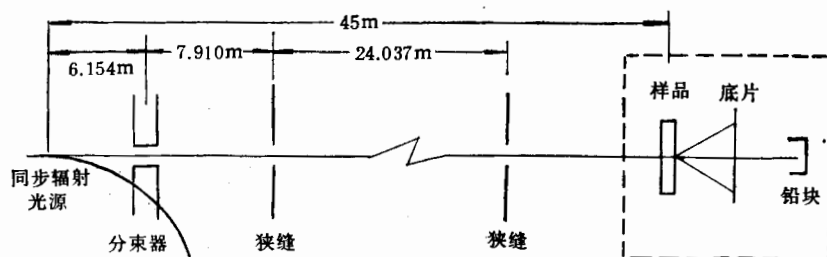


图1 4W1A 光束线及形貌站概貌

置分别有两组狭缝系统,以使实验中可得到所需的光斑大小。SRW1 在同步辐射专用模式下的光谱见图2, 图中给出了不同电子能量下的发射谱和经过束线窗口吸收后的光谱曲线。

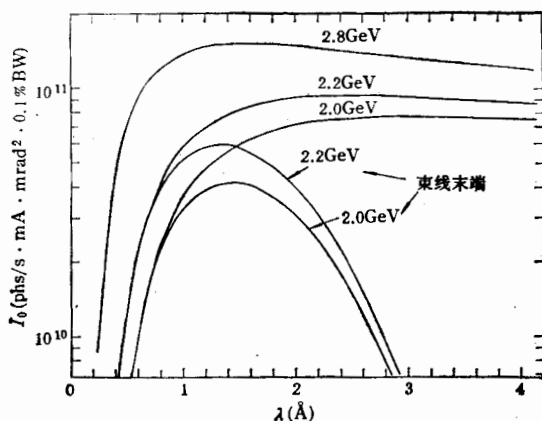


图2 SRW1 在不同能量同步辐射专用模式下的发射光谱

## 2. SRW1 磁铁中电子束运动的特征

在形貌学研究中,实验的几何分辨率受光源的有效投影尺寸影响,而光源的大小是由电子在环中运动的特性决定的。下面首先讨论描述储存环中电子运动的参数,及电子在 SRW1 磁铁中的运动特征。

电子在储存环中作环形运动,在理想的情况下,电子轨道在水平面内,此平面垂直于弯转磁铁的磁场,令其为  $x, z$  面,磁场方向为  $y$  方向。在环中任意一点  $E$  上,电子的坐标由  $(x, y, s)$  给出(图3)。 $s$  为理想轨道平面上相对于某一参考点  $o$  (在此

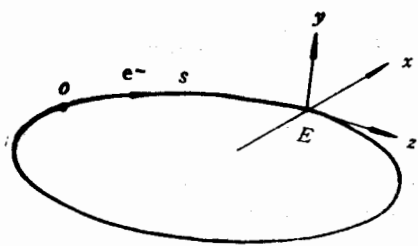
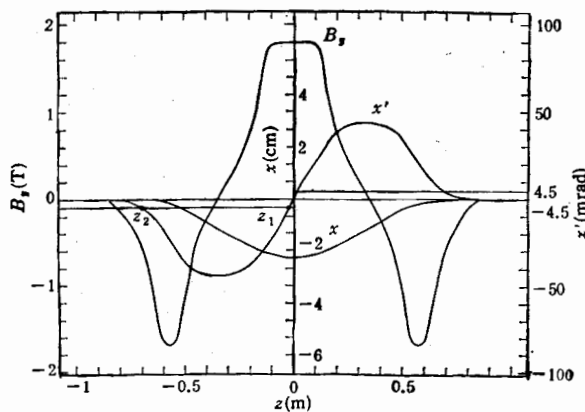
图3 确定电子运动位置的坐标系  $(x, y, s)$ 

图4 SRW1 的磁场分布,及在 2.2GeV 能量下的电子轨道和轨道切角

取 BEPC 第一对撞点)的距离,  $x, y$  为在每一  $s$  处电子位置相对于理想轨道的偏离。电子发射度  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  为常数<sup>[3]</sup>, 是表征同步辐射加速器性能的量, 由下式决定:

$$\varepsilon_x = \gamma_x(s)x^2 + 2\alpha_x(s)xx' + \beta_x(s)x'^2;$$

$$\varepsilon_y = \gamma_y(s)y^2 + 2\alpha_y(s)yy' + \beta_y(s)y'^2.$$

其中  $x' = dx/ds, y' = dy/ds, x', y'$  确定了电子轨道每一点上的角散度。Twiss 参数  $\alpha, \beta, \gamma$  为  $s$  的周期函数。电子在储存环中运动, 在每一点  $s$  上沿  $x, y$  方向的位置分布以及角散度为高斯分布, 由在该点的标准偏差  $\sigma_x, \sigma_y$  及  $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$  描述。这些电子运动的参量是由电子在储存环中的位置所决定。在 SRW1 直线节中心位置的光源参量列于表 1。

表 1 BEPC 储存环在 SRW1 磁铁位置的 Twiss 参数, 同步辐射专用模式,  $E_e = 2.2\text{GeV}$

$s(\text{m})$	$\alpha_x$	$\beta_x(\text{m})$	$\gamma_x(\text{m}^{-1})$	$\sigma_x(\text{mm})$	$\sigma_{x'}(\text{mrad})$
54.825	-0.88705	6.8833	0.25959	0.78371	0.15114
	$\alpha_y$	$\beta_y(\text{m})$	$\gamma_y(\text{m}^{-1})$	$\sigma_y(\text{mm})$	$\sigma_{y'}(\text{mrad})$
	-0.04152	11.28793	0.08874	0.27934	0.024767

SRW1 为单周期 (3 极) 亮度 wiggler 磁铁, 周期长度  $\lambda_w = 136\text{cm}$ , 图 4 给出了 SRW1 的磁场分布  $B_y(z)$ , 及在  $2.2\text{GeV}$  能量下的电子轨道  $x(z)$  和轨道切角  $x'(z)$ 。其中磁场强度最大值为  $1.8\text{T}$ , 电子束轨迹在  $x$  方向最大偏离为  $2.3\text{cm}$ , 在该能量下的同步辐射光发射范围为  $\pm 49\text{mrad}$ 。

4W1A 光束线的中心线处于由直线节中心向储存环一侧偏  $5\text{mrad}$  的位置, 考虑到 SRW1 中的电子轨道偏向环内, 在  $2.2\text{GeV}$  电子能量时, 最大偏离为  $2.3\text{cm}$ , 则可得到在距发光点  $45\text{m}$  的形貌站对 wiggler 磁铁发光中心偏角约为  $4.5\text{mrad}$ 。由图 4 可知, 该角度同步辐射光的贡献来自两个光源点, 在磁铁中的位置分别为  $z_1 = -0.02\text{m}$ , 和  $z_2 = -0.70\text{m}$  两点, 对应磁场强度分别为  $B_1 = 1.8\text{T}, B_2 = 0.54\text{T}$ , 在硬 X 光区域 (能量在  $10\text{keV}$  以上), 由  $z_1$  和  $z_2$  产生的同步辐射光强度相差两个数量级以上, 因而在这个能区, 由  $z_1$  点产生的光强度起主要作用。所以, 对 4W1A 束线后的形貌实验, 可以对光源进行单光斑近似。

### 三、形貌学研究用光源特性及实验条件的讨论

#### 1. 形貌相的几何分辨率

考虑 SRW1 的发射谱范围, 以及在形貌实验中的晶体吸收因素, 形貌实验的有效光谱范围为  $0.3\text{\AA}$  至  $2.5\text{\AA}$ , 所对应的光源发射角度为  $\pm(0.058-0.166)\text{mrad}$ 。实验中, 样品区的光斑水平尺寸一般小于  $20\text{mm}$ , 即水平接受角小于  $0.5\text{mrad}$ 。

SRW1 磁铁弯转半径约为  $4\text{m}$ , 在水平方向可接受光斑对应的光源有效尺寸为  $1\mu\text{m}$  量级, 而电子的  $\beta$  函数值为  $\text{mm}$  量级, 远大于该尺寸, 因此有效光源的大小主要由电子的  $\beta$  函数决定<sup>[4]</sup>。水平和垂直方向的电子束尺寸分别为  $\sigma_x, \sigma_y$ 。沿  $x, y$  方向辐射光强为高

斯分布。考虑实验过程,取光强降至最大值的  $1/e$  作为有效光源大小,因而可以得到形貌学实验所对应的有效光源尺寸分别为:

$$h = 2\sqrt{2}\sigma_x = 2.2\text{mm} \quad (\text{水平});$$

$$v = 2\sqrt{2}\sigma_y = 0.8\text{mm} \quad (\text{垂直}).$$

如图 5,光源至样品距离为  $D$ (45m),若底片至样品距离  $d$  取 50mm,则可得水平与垂直方向的形貌像几何分辨率分别为:

$$R_h = \frac{h \cdot d}{D} = 3\mu\text{m} \quad (\text{水平});$$

$$R_v = \frac{v \cdot d}{D} = 1\mu\text{m} \quad (\text{垂直}).$$

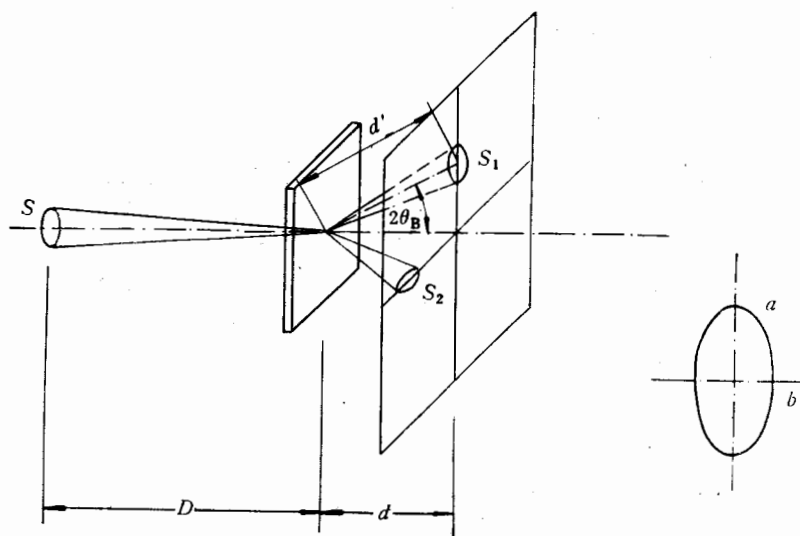


图 5 白光形貌光路布置

通常对透射 Laue 衍射情形,底片一般置于与入射光垂直的位置(如图 5),此时大角衍射的 Laue 斑由于几何投影的关系,分辨率会下降,可以由下式判断:

$$R'_h = \frac{S \cdot d'}{D} \cdot \frac{1}{\cos 2\theta_B} = \frac{S \cdot d}{D} \cdot \frac{1}{\cos^2 2\theta_B},$$

其中,  $S$  为有效光源大小,  $2\theta_B$  为衍射束与入射束间的夹角,  $d'$  为底片内衍射斑位置与样品上衍射光出射点间的距离,  $d' = \frac{d}{\cos 2\theta_B}$ 。例如: 当  $d = 5\text{cm}$ ,  $2\theta_B = 45^\circ$  时,对在垂直方向的  $S_1$  斑点,几何分辨率为  $2\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ ;而对在水平方向的  $S_2$  斑点,形貌像的几何分辨率为  $1.5\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ 。随所选衍射斑角度的增加,像的分辨率下降。

为了得到高分辨率的形貌像,通常将底片靠近样品以减小  $d$  值,但由于光斑有一定的尺寸(几毫米至十几毫米),小角衍射的 Laue 斑重叠严重,而大角的 Laue 斑分辨率又不够好,此时可以将底片与样品距离略微增大,以得到低角的衍射斑点。亦可将底片置于与衍射束垂直的位置,减小所需斑点的像畸变。影响最终像分辨率的因素还有记录底片的

感光颗粒度和膜厚, 在实验中, 需根据晶体晶格常数的大小及晶片厚度, 确定底片的位置, 以得到最佳的实验分辨率。

## 2. 同步辐射 Laue 衍射斑中谐波的强度

一般地, 白光形貌所用同步辐射 X 光的几何角散度为  $0.5\text{mrad} = 100''$ , 远大于晶体的 Darwin 宽度, 对单色发散的 X 光, 通过晶体的积分衍射强度正比于  $\frac{|F_{hkl}| \cdot \lambda^2}{\sin 2\theta_B}$ , 其中  $F_{hkl}$  为  $(hkl)$  面的结构因子,  $\lambda$  为衍射波长,  $\theta_B$  为衍射 Bragg 角。由于入射同步辐射光为连续谱, 晶体可以从略有偏差的角度中选取衍射, 其强度正比于  $\lambda/\tan\theta_B$ 。

考虑同步辐射光为水平偏振光, Laue 衍射斑的强度正比于下式:

$$I \propto \frac{\partial I}{\partial \lambda} \cdot \frac{|F_{hkl}| \cdot \lambda^2}{\sin^2 \theta_B} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_h}{\gamma_0}} \cdot |P| \cdot e^{-\mu}$$

其中  $\frac{\partial I}{\partial \lambda}$  为入射光强;  $P$  为偏振因子,  $P = \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha |\cos 2\theta_B|$ ; 取  $\gamma_0 = 1$ ,  $\gamma_h = \cos 2\theta_B$ ,  $\alpha$  为衍射面与同步辐射偏振面的夹角<sup>[5]</sup>;  $\mu$  为晶体的平均吸收系数,

$$\mu = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\cos 2\theta_B} \right) \mu_0,$$

$\mu_0$  为晶体的线吸收系数。

由于图 2 所给的光强单位为  $I_0$  ( $\text{phs/s} \cdot \text{mA} \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{ BW}$ ), 则有:

$$\frac{\partial I}{\partial \lambda} = \frac{I_0}{0.1\% \cdot \lambda},$$

因而得出 Laue 斑衍射光强正比于下式:

$$I \propto I_0 \cdot \frac{|F_{hkl}| \cdot \lambda^2}{\sin^2 \theta_B} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_h}{\gamma_0}} \cdot |P| \cdot e^{-\mu}.$$

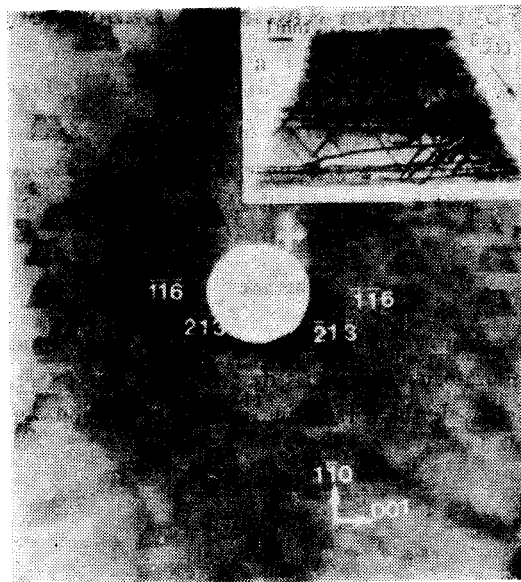


图 6  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  晶体的同步辐射白光形貌像, 右上角为  $[213]$  衍射斑的放大像

表2 四硼酸锂晶体的白光衍射强度

$(hkl)$	$\theta_B (^\circ)$	$\lambda (\text{\AA})$	$I_0$	$\alpha (^\circ)$	$P$	$e^{-\mu t}$	强度
$(\bar{2}1\bar{3})$	9	0.83	36	-127	0.94	0.72	25
$(\bar{4}2\bar{6})$	9	0.42	6	-127	0.94	0.96	1
$(\bar{2}1\bar{1})$	13.3	1.8	26	-158	0.99	0.055	1
$(\bar{4}2\bar{2})$	13.3	0.9	39	-158	0.99	0.65	13
$(\bar{6}3\bar{3})$	13.3	0.6	21	-158	0.99	0.87	4
$(\bar{1}\bar{1}6)$	14.6	0.84	36	90	0.87	0.87	15
$(\bar{2}\bar{2}12)$	14.6	0.42	6	90	0.87	0.96	1

图6为  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  单晶的同步辐射白光透射 Laue 像,其中样品为(110)薄片,厚度为0.8mm,图中标出几个衍射斑的面指数,对应的衍射强度按以上方法计算的结果列于表2,可以看出计算值与图6中的 Laue 斑的相对衍射强度符合得很好。

## 参 考 文 献

- [1] 蒋建华,巢志瑜,赵际勇,田玉莲,韩勇,姜晓明,冼鼎昌,物理, 20(1991),57.  
 [2] R. Chen, M. Liu, C. Shi, J. Sun, J. Zeng, S. Chen, in Proceeding of the International Conference on Synchrotron Radiation. Application, Hefei (1989) 215.  
 [3] J. Wu, C. Shi, M. Ren and D. Xian, Characterization of synchrotron radiation sources of BSRL, Technical Report Of ISSP, 25(1991).  
 [4] B. K. Tanner and D. K. Bowen, Characterization of crystal growth defects by X-ray methods, Plenum Press. New York (1980).  
 [5] 杨平,南京大学博士论文(1990).

### Light Source for Synchrotron Radiation X-Ray Topography Study at Beijing Synchrotron Radiation Laboratory (BSRL)

ZHAO JIYONG<sup>1)</sup> YANG PING<sup>2)</sup> JIANG JIANHUA<sup>1)</sup> TIAN YULIAN<sup>1)</sup>  
 HAN YONG<sup>2)</sup> WANG CHUNXI<sup>2)</sup> SHI CAITU<sup>2)</sup> XIAN DINGCHANG<sup>2)</sup>

1) (Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High Energy Physics, Beijing 100039)

2) (Laboratory of Solid State Microstructure, Nanjing University, Nanjing 210008)

## ABSTRACT

Characteristics of the synchrotron radiation source for X-ray topography study at Beijing Synchrotron Radiation Laboratory (BSRL) is described in this paper, local geometrical resolution of topographs is discussed, the diffracting intensities of white beam topography is given.