

型 X 射线光刻胶的研制。

(7)进行了一系列同步辐射 X 射线辐照实验研究,并取得了一些有意义的实验结果.如:进行了同步辐射 X 射线对多层膜性能影响的研究.进行了农作物种子的 X 射线辐照效应的研究,还进行了高能物理领域中重要材料新型闪烁晶体的 X 射线辐照效应的研究等。

(8)利用同步辐射 X 射线进行微观力学测试的研究。

### 3 正在进行和拟开展的研究工作

(1)同步辐射光刻相关基础技术研究:如:曝光工艺及图形转换技术,X 射线掩模研究与研制,光刻胶技术,干法刻蚀及镀膜技术等。

(2)只需单次 X 射线曝光的微结构与器件的研制.如声表面波器件、多层膜光学元件、HEMT 器件、超导红外探测器件等。

(3)LIGA 技术研究及三维微结构与器件的研制.继续开展深度同步辐射光刻、精密电铸等 LIGA 相关基础技术研究,并利用 LIGA 工艺研制集成光学元件和传感器等.首批选定的研制目标是微光学元件、微光纤夹和微型加速度传感器。

### 参 考 文 献

- [1] 阿刀田伸史, *ULVAC Technical Journal*, 34(1990), 12.
- [2] A. Heuberger, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 6(1988), 107.
- [3] D. C. Flanders, *Appl. Phys. Lett.*, 36(1980), 93.
- [4] W. Ehrfeld and D. Munchmeyer, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, A303(1991), 523.
- [5] 胡一贯、田扬超、刘泽文等,第一次两岸同步辐射学术研讨会论文集,北京,1993年10月,第379页.
- [6] 刘泽文、田扬超、胡一贯等, *科学通报*, 39(1994), 572.
- [7] 田扬超、洪义麟、付绍军等, *科学通报*, 40(1995), 83.

## 合肥扭摆器光源的特性和利用\*

徐朝银 张允武 刘乃泉 周洪军

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室,合肥 230026)

**摘 要** 国家同步辐射实验室正在设计和制造一台6T 单周期超导扭摆器(wiggler),把合肥同步辐射光源的可用范围延伸到 X 射线,满足部分 X 射线用户的要求.利用扭摆器光源装备四条光束线,分别用于 X 射线吸收精细结构(XAFS),生物大分子晶体多波长反常衍射(MAD),X 射线深度光刻(LIGA)和高分辨 X 射线衍射(HRXD)的研究.该文介绍了合肥扭摆器光源的主要特性、光束线前端保护、分束系统和各条光束线的设计参数及结构方案。

**关键词** 扭摆器,同步辐射,光束线,单色仪

### 1 光源特性

合肥同步辐射电子储存环的电子能量为 0.8GeV,从弯铁引出的同步辐射主要使用其真空紫外和软 X 射线波段.为了扩展光源的使用

范围,目前正在设计和制造一台 6T 单周期超导扭摆磁铁,它将安装于储存环的长直线节上.电子束团由于受到超导扭摆磁铁的强磁场作用,局部偏离正常的直线轨道,形成曲率半径随

\* 1995年7月11日收到.

磁场强度而变化的曲线轨道,辐射出比弯铁能量要高的电磁波,把合肥同步辐射的可用范围延伸到 X 射线,满足了部分 X 射线用户的要求.弯铁光源和扭摆器光源参数的比较如表1所示.

	弯铁光源	扭摆器光源
能量(GeV)	0.8	0.8
束流(mA)	100—300	100—300
磁场强度(T)	1.2	6(峰值磁场)
电子轨道偏转半径(m)	2.2221	0.4447
特征波长(nm)	2.4	0.48(峰值磁场处)
可用光谱范围(nm)	~0.5	~0.08

弯铁光源和扭摆器光源的光谱曲线如图1所示.可以看出,单周期超导扭摆磁铁只将弯铁

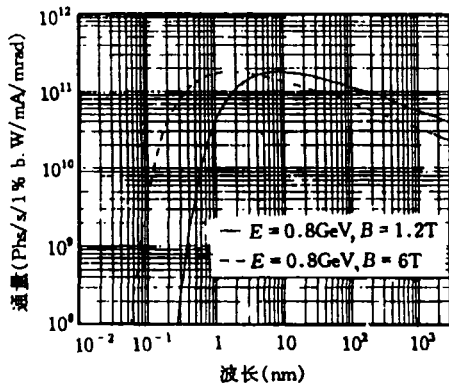


图1 弯铁光源和扭摆器光源的光谱曲线

光源的谱线向短波方向作平移,光子的积分通量并无变化,若使二者都有改善,必须提高电子的储存能量或增加扭摆磁铁的周期.合肥扭摆磁铁是由一块中心铁和两块边铁组成,中心铁的峰值磁场为 6T,边铁的峰值磁场为 3.8T.电子穿过扭摆磁铁形成了图2中虚线所示的曲线轨道,沿其曲线轨道产生扇形的同步辐射.除扇形同步辐射区在对称轴上是单一的光源以外(即电子在中心铁的峰值磁场处产生的同步辐射),其余均为电子在中心铁和边铁中产生的同步辐射的叠加.电子辐射功率在垂直平面上的

积分值  $P$  完全正比于电子轨道路径上每块磁铁在各点的磁场强度<sup>[1]</sup>,即

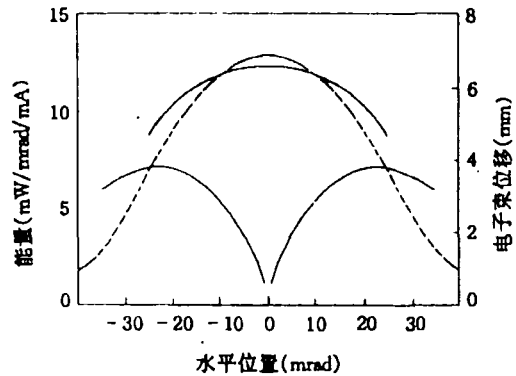


图2 电子在扭摆磁铁中的轨道和功率辐射分布

$P = 4.22 \cdot E^3 \cdot B$  (mW/mrad/mA), 这里能量  $E$  的单位是 GeV, 磁场强度  $B$  的单位为 T. 图2中的实线表示电子穿过扭摆磁铁的功率辐射分布. 图3给出了扇形同步辐射区在

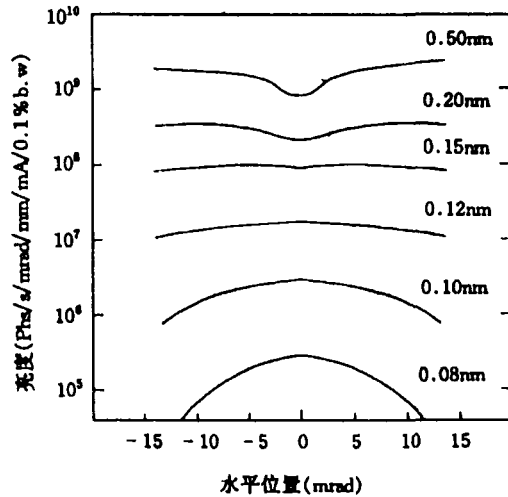


图3 扭摆磁铁产生的同步辐射在对称轴附近光源亮度随波长和水平位置而变化的曲线

对称轴附近几个不同波长的光谱曲线.就合肥扭摆器光源而言,在波长大于 0.15nm 时,对称轴上光源亮度反而小于两侧的光源亮度,这为我们合理分配光源提供理论依据.为了充分利用扭摆磁铁产生的 X 射线,光束线前端区的光

束通道由弯铁的  $\phi 150\text{mm}$  增加到  $\phi 200 - 250\text{mm}$ , 使光源的水平接收角达到  $34\text{mrad}$ , 分成三束, 每束水平接收角为  $3\text{mrad}$ , 中间光束与扭摆器光源的轴线对称, 旁边两束的中心线与光源对称轴夹角都为  $15\text{mrad}$ .

## 2 前端装置

扭摆器光源在 X 射线波段内的光子能量、光子通量和辐射功率都高于弯铁光源, 因此在设计光束线前端区时, 除考虑真空保护作用外, 还应注意考虑: (1) X 射线的安全屏蔽, 保护实验人员和仪器免受辐射损伤; (2) 真空器件和光学元件的充分冷却, 防止热载变形. 扭摆器光束线前端保护区的结构类似于弯铁光束线前端区<sup>[2]</sup>, 所不同的是: (1) 各光闸和光屏的内部水冷系统均按  $3\text{W/mrad}$  的辐射热载设计;

(2) 在各条分支光束线上, 我们选用了英国 Mallorg 公司近期新研制出的适用于超高真空中防辐射的重金属材料 Mallorg 1000 作为光闸吸收体. 新设计的光闸在关闭时, 光束线上实验人员的辐射剂量不高于  $2.5\mu\text{Gy/h}$ .

## 3 光束线

利用扭摆器光源将装备四条光束线, 分别用于 X 射线吸收精细结构, 生物大分子晶体多波长反常衍射, X 射线深度光刻和高分辨 X 射线衍射的研究. 根据上面对扭摆器光源的分析计算, 宜将光源的中间光束用于对短波段光源亮度和大小有严格要求的 MAD, 旁边光束则分别用于 XAFS, LIGA 和 HRXD. 各光束线的主要设计参数列在表 2 中.

表 2

名称	波长范围 (mm)	分辨率 ( $\lambda/\Delta\lambda$ )	分光元件	接收角 (mrad) (H × V)	光斑尺寸 (mm) (H × V)	样品上光子数 (phs/s)
XAFS	0.1—0.6	$5 \times 10^4$	Si(111)	1 × 0.1	13 × 1.3	$9.8 \times 10^8$
LIGA	0.2—0.7			3(水平)	39 × 10	$5 \times 10^8$
HRXD	0.1	$10^5$	Si(220)	3 × 0.2	1.3 × 1.3	$3.9 \times 10^8$
	0.16		Si(111)			
	0.22		$\alpha\text{-Quartz}(10\bar{1}0)$			
MAD	0.08—0.2	$10^5$	Si(111)	22 × 0.1	1.6 × 1.6	$1.5 \times 10^8$

图 4 表示出四条光束线的光学排布.

### 3.1 XAFS 光束线 (WBL1)

主要设备是一台双晶单色仪. 根据晶体对 X 射线衍射的原理, 两块晶体按  $(+n, -n)$  排布装在一联动机构上, 当晶体按照 Bragg 角转动时, 同步辐射经其衍射, 由单色仪的出射狭缝检测出对应于该 Bragg 角的位置固定的单色光. 我们选用尺寸为  $20 \times 25 \times 5\text{mm}^3$ 、晶体常数为  $0.627\text{nm}$  的 Si(111) 晶体作色散元件. 该单色仪水平和垂直的实际接收角分别为  $1\text{mrad}$  和  $0.1\text{mrad}$ . 当晶体的位置从  $10^\circ$  转到  $70^\circ$  时, 波长覆盖范围为  $0.1 - 0.6\text{nm}$ . 单色仪前后设有两块

Be 窗, 前者滤去低能光子, 后者除继续滤去低能光子外, 还分隔真空和大气, 把同步光引入样品室. 通过被测元素在吸收边及高于吸收边附近对光子能量吸收系数的变化来研究物质的精细结构<sup>[3]</sup>. 晶体的 Bragg 角转动由五相步进电机驱动一台 Huber420 精密测角仪来实现. 改变步进电机的加电条件, 经过一个传动比为 1:3600 的减速机构, 得到  $0.72^\circ$  的步距角. 再由精度为  $1''$  的角度探测仪直接检测出晶体的 Bragg 角转动信号, 送入计算机, 经闭环控制达到波长自动选择和物质吸收边附近的能量扫描. 计算机同时还接收样品室后面离子探测器的反馈信

号,来控制第二块晶体的微型驱动器,调整第二块晶体与第一块晶体的相对位置,以抑制高次谐波,改善单色仪的光子通量和单色性能.使用 ANSYS5.1 程序,分析计算双晶单色仪中第一

块晶体表面受同步光照射后的热载,结论是:  $20 \times 25\text{mm}^2$  晶体表面上的总热载功率为 1.14W,最高温度为  $90.715^\circ\text{C}$ ,最低温度为  $90.572^\circ\text{C}$ ,没有必要设置冷却系统.

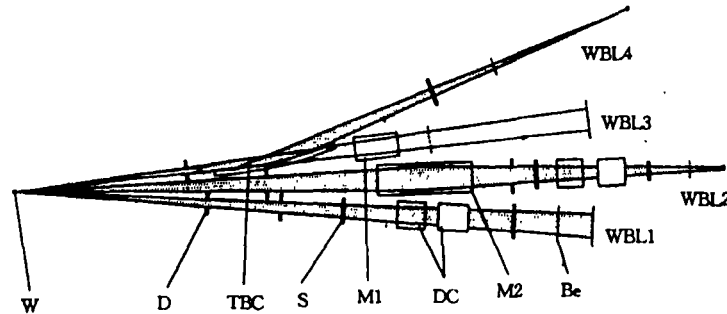


图4 扭摆器光源上各条光束线的光学系统

W,扭摆器光源; D,光阑; S,狭缝; TBC,三角弯晶; M1,圆柱镜; M2,柱面镜; DC,双晶体; Be,铍窗; WBL1,XAFS; WBL2,MAD; WBL3,LIGA; WBL4,HRXD

### 3.2 MAD 光束线(WBL2)

利用同步辐射进行生物大分子晶体结构分析已成为结构生物学研究的重要手段.为了获得高质量、高分辨的生物大分子单晶体衍射数据,收集含有重金属原子晶体的反常散射数据,提高晶体结构研究的速度和精度,光源必须是波长短,亮度高和连续可调.因此我们把在短波长有较高亮度的中间光束用于生物大分子晶体多波长反常衍射研究.该光束线的设计原理与 XAFS 光束线相似,区别在于光路上增加了聚焦系统.通常情况下,在双晶单色仪前后分别装有前置镜和后置镜.前置镜为柱面形状,使垂直方向上发散的同步光变成平行光;后置镜为超环面形状,将单色后的同步光在水平和垂直两个方向上同时聚焦,以使在不影响分辨率的情况下获得小光斑面积和高光子密度的优质单色光.合肥储存环由于能量低,即使插入强磁场超导扭摆磁铁,提高了硬 X 射线的光子通量,但仍然不尽人意.因此,在设计光束线时,在保证满足基本要求的前提下,应尽量减少光学元件,以降低传递过程中光子通量的损耗.我们只在单色仪的前面装一块柱面镜,将同步光水平聚

焦,而垂直方向的尺寸取决于狭缝开启高度.柱面镜表面镀白金,长 300mm,入射角  $4\text{mrad}$ ,水平接收角  $2\text{mrad}$ ,在距离光源 16m 的样品上得到  $1.6 \times 1.6\text{mm}^2$  的光斑和  $1.5 \times 10^8\text{phs/s}$  的光子数.

### 3.3 HRXD 光束线(WBL4)

HRXD 光束线是为高分辨粉末衍射和小角散射研究提供单色光.光束线的主要设备是一台弯晶单色仪.把单块晶体加工成表面与晶格面之间成一角度,结果在衍射平面内压缩了出射光的尺寸.如果将晶体在衍射平面内径向弯曲,以汇聚压缩的出射光,可使光斑尺寸进一步缩小.我们选用三块不同材料[Si(220)、Si(111)和  $\alpha\text{-quartz}(10\bar{1}0)$ ],做成三角弯晶,在一个特定的 Bragg 角  $15^\circ$  下,对应波长分别是 0.1, 0.16 和 0.22nm.同步光被三角弯晶衍射、压缩、聚焦、在位置固定的样品上得到  $1.3 \times 1.3\text{mm}^2$  的单色光斑.用户根据实验要求切换三角弯晶,选择波长.三角弯晶除了衍射聚焦作用以外,还可使同步光束作水平偏转,以增大下游实验装置的排布空间.光斑的垂直尺寸由单色仪出射狭缝的高度来调整.

### 3.4 LIGA 光束线 (WBL3)

当 HRXD 光束线上的三块弯晶都移离光束中心时,同步光束经过一个固定光阑直接进入 LIGA 光束线.该光束线没有单色仪,只有一块圆柱反射镜和两块 Be 窗,镜子用来截止 0.15nm 以下的 X 射线和使垂直方向上的发散光变成平行光. Be 窗则滤掉低能光子,减轻掩模晶片上的热载.由于在掩模晶片上的光斑尺寸为  $40 \times 10 \text{mm}^2$ ,光谱在垂直方向又是准高斯型分布,为了获得较大的曝光面积,改善光强的

均匀性,掩模晶片必须在垂直方向上作扫描移动.

### 参 考 文 献

- [1] G. W. Greaves et al. , *Nuclear Instruments and Methods* , 208(1983), 139.
- [2] 徐朝银等, *真空科学与技术* , 3(1989), 166.
- [3] Xu Chaoyin et al. , *ISSPA'94* , Hefei, China.

## 国家同步辐射实验室同步辐射光电子能谱站的新进展\*

徐世红 徐彭寿 陆尔东 潘海斌 余小江 张发培

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室,合肥 230026)

**摘 要** 简要地阐述了同步辐射的优越性,介绍了国家同步辐射实验室(NSRL)光电子能谱站与光束线的设备,综述了国内主要用户及站上工作人员在金属/半导体界面等方面所开展的工作和一些实验结果.

**关键词** 电子能谱,同步辐射,金属/半导体界面

在科学研究领域内,研究工作总是受到实验条件的限制,要想进一步地深入研究和解决新问题,就必须寻找新的技术和设备.同步辐射由于具有许多优点,因而能克服常规光源的种种局限,使我们对有关研究工作有了革命性的突破,逐渐成为在物理、化学、生物等多个学科中得到广泛应用的有力工具<sup>[1]</sup>.

同步辐射与其他光源相比有巨大的优越性,这就使它在凝聚态物理研究工作中得到越来越多的应用.表面物理是凝聚态物理的一个重要分支,世界上几乎每个同步辐射实验室都有与此有关的光电子能谱实验站.它的基本思想是:用一束光入射到固体表面,激发出电子,探测的几个参数是:态密度、电子的能量分布(能谱)、电子的空间角度分布、自旋等.它是研究表面电子态的最有力工具.下面结合我们的

具体实验,综述一些实验结果.

### 1 光电子能谱站

国家同步辐射实验室(NSRL)光电子能谱站是由光束线、光电子能谱仪和超高真空薄膜样品制备室三部分组成.

#### 1.1 光束线

光束线是一个高分辨率的真空紫外和软 X 射线波段的球面光栅单色器.

由入射狭缝出射的同步辐射光,经四块不同光栅分光后,分别提供连续可调的 10—62eV 真空紫外光和 62—1000 eV 软 X 射线.

为了提高分辨率,入射和出射狭缝均被安

\* 1995年6月30日收到.