



# 变包含角平面光栅单色器及其关键技术

陈家华<sup>①\*</sup>, 薛松<sup>①</sup>, 卢启鹏<sup>②</sup>, 彭忠琦<sup>②</sup>, 邵仁忠<sup>①</sup>, 王勇<sup>①</sup>, 陈明<sup>①</sup>, 吴坤<sup>①</sup>

① 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

② 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130000

\*E-mail: chenjihua@sinap.ac.cn

收稿日期: 2010-08-03; 接受日期: 2010-11-30

**摘要** 分析设计并研制了上海光源软 X 射线谱学显微光束线站的变包含角平面光栅单色器, 经过精密加工调试, 保证了扫描系统的转角重复精度; 采用多孔腔内部通道水冷方法, 控制了镜子表面热变形; 完成真空箱体大尺寸法兰加工与密封, 达到了单色器工作所需的超高真空. 通过上述关键部件的精确掌控, 确保了单色器主要性能——光子能量范围、能量分辨率和能量重复性, 均优于设计指标.

**关键词** 同步辐射, 变包含角平面光栅单色器, 关键技术

**PACS:** 07.85.Fv, 07.85.Qe, 41.85.Si

## 1 引言

软 X 射线谱学显微光束线站(BL08U1A)是国家重大科学工程上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)首批建造的 7 条光束线站之一, 设计指标先进, 满足了国内用户在高空间分辨、高能量分辨领域的科学研究需求.

BL08U1A 光路图如图 1 所示, 采用可调偏振波荡器(EPU)插入件作为光源, 光束线主要包括: 水冷白光四刀狭缝、前置柱面镜、变包含角平面光栅单色器(Variable included Angle Plane Grating Monochromator, VAPGM)<sup>[1-5]</sup>、后置超环面聚焦镜、单色光狭缝等.

VAPGM 是 BL08U1A 的核心设备, 它具有光栅覆盖能量范围大、光子输出通量高、能量分辨率高、光谱纯度高、像斑质量好、可以采用多种交替运行模式等诸多优点, 广泛应用于同步辐射光束线中.

为满足 SSRF 开展谱学显微等实验研究的需要,

VAPGM 物理性能指标如表 1.

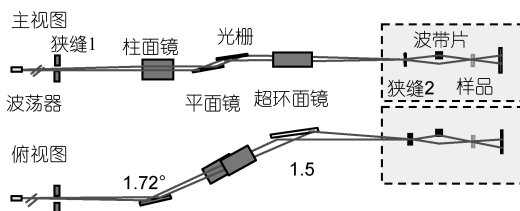


图 1 BL08U1A 光路图

表 1 单色器物理性能指标

| 光子能量范围(eV) | 能量分辨率( $E/\Delta E$ ) | 能量重复性                             |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|
| 250~2000   | 4500@244 eV           | $\geq 20\text{meV}@244\text{ eV}$ |

第三代同步辐射光源的发展给单色器提出了更高的要求, 如何保证在高热负载条件下单色器系统的可靠性、稳定性、以及高能量分辨特性, 需要解决若干关键技术问题. 针对本项目研制的 VAPGM, 主要需要攻克超高真空环境下的机械系统高精度重复

性以及有效的热缓释等技术难题,同时对机械结构精度分析计算、元件热缓释结构设计、关键工艺技术以及安装准直调试都是很大的挑战,因此,VAPGM的成功与否,成为BL08U1A能否高质量建成的关键因素.

## 2 结构总体方案

### 2.1 VAPGM 工作原理

VAPGM 工作原理<sup>[6]</sup>,如图 2 所示,主要光学元件由前置平面镜(PM)和平面光栅(PG)组成,在准直光模式下,通过改变包含角( $\alpha+\beta$ )选择能量.光栅方程为

$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda, \quad (1)$$

其中  $d$  为光栅刻线间距,  $\lambda$  为波长,  $\alpha$  和  $\beta$  为光栅入射角和衍射角,  $m$  为衍射级次,定义  $C_{ff} = \cos \beta / \cos \alpha$  为平面光栅光学放大倍数.

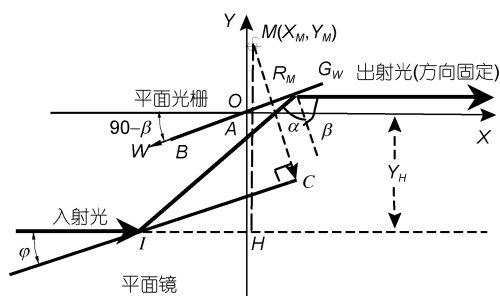


图 2 VAPGM 工作原理

在能量扫描过程中,为了确保出射光方向不变,光栅绕表面中心转动,而平面镜的运动需保证其反射的光斑中心不偏离光栅中心,故既要转动又要平动,从而确定通过平面镜的离轴转动来实现转动和平动的复合运动,同时,光栅基底上刻有两块区域,光栅 1(每毫米 800 线)和光栅 2(每毫米 1200 线),分别应用于低能段(250~750 eV)和高能段(275~2000 eV),通过光栅切换机构选择实验所需的光栅区域.

表 2 单色器设计指标要求

| 转角范围                    | 转角重复精度                 | 转角分辨率                  | 高差    | 静态真空                   |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-------|------------------------|
| PM/PG<br>-0.5°~7°/0°~9° | PM/PG<br>≤0.43"/≤0.43" | PM/PG<br>≤0.05"/≤0.05" | 30 mm | ≤7×10 <sup>-8</sup> Pa |

### 2.2 VAPGM 组成

VAPGM 是个复杂的系统,其组成如图 3 所示,主要包括:平面镜及其镜座、光栅及其镜座、平面镜扫描系统、光栅扫描系统、光栅切换机构、平面镜及光栅冷却系统、真空箱体、支撑及调节机构、真空系统、控制系统等.

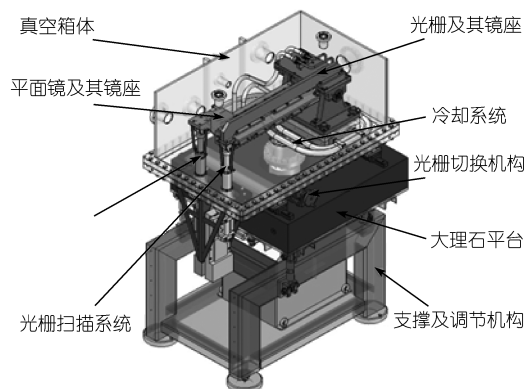


图 3 VAPGM 组成

### 2.3 VAPGM 设计指标要求

基于物理设计结果,对单色器系统提出相应的设计指标要求,如表 2 所示.

## 3 VAPGM 关键技术

### 3.1 波长扫描系统

#### 3.1.1 转角重复精度误差源分析

VAPGM 波长扫描系统主要由平面镜扫描系统和光栅扫描系统组成,两者原理相同,结构类似,都包括:直线驱动机构、驱动杆、顶点机构、sin-bar(正弦杆)等.

设驱动杆的直线位移为  $x$ , sin-bar 长度为  $L$ , sin-bar 转角为  $\theta$ , 则应满足

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{x}{L}\right), \quad (2)$$

可见, 影响转角精度是驱动杆的直线位移  $x$  和 sin-bar 长度  $L$ , 这也是最终影响波长  $\lambda$  分辨率的因素. 而影响  $x$  和  $L$  的因素则表现为机械结构的误差, 主要误差源为: (i) 正弦杆长误差  $\delta L$ ; (ii) 正弦杆的挠度误差  $\delta v$ ; (iii) 驱动杆伸缩量误差  $\delta l$ ; (iv) 转动轴和正弦杆末端滚动轴的径向跳动  $\delta r$ ; (v) 丝杠螺距累计误差  $\delta S$ ; (vi) 线性编码器精度; (vii) 轴系误差.

第 (i)~(iii) 项是主要由于驱动杆和正弦杆的变形引起的, 因此除了提高加工精度要求外, 要求正弦杆和驱动杆有较好的抗弯曲能力; (iv) 和 (vii) 项是由制造精度和装配精度决定, 可以通过提高加工精度和装配精度降低其影响; (v) 和 (vi) 项由于安装了光栅尺, 对误差有一定补偿作用, 这两项产生的误差最终决定于光栅尺的精度.

由上可见, 波长扫描机构要达到较高的转角重复精度, 设计时除了选购合理的部件外, 其主要部件 (驱动杆和正弦杆) 必须具有较好的刚度特性.

### 3.1.2 转角重复精度公式推导

(i) 正弦杆的形变, 将产生杆长方向长度变化和挠度, 即  $\Delta L$  和  $\Delta v$ , 而不同角度的  $\Delta L$  和  $\Delta v$  之间偏差, 即正弦杆的杆长误差  $\delta L$  和正弦杆挠度误差  $\delta v$ , 将影响转角重复精度, 由图 4 可得, 正弦杆形变对转角重复精度的贡献为

$$\Delta\theta_{1,2} = \frac{\delta v}{L/2 - \delta L}. \quad (3)$$

(ii) 驱动杆的变形, 将产生杆的伸缩变化  $\Delta l$  和挠度 (表现为驱动平台的倾斜, 即其平面度  $\Delta\phi$ ), 而不同角度时  $\Delta l$  和  $\Delta\phi$  之间的偏差, 即驱动杆伸缩量误差  $\delta l$  和驱动平台的平面度误差  $\delta\phi$ , 将影响转角重复精度, 由图 5, 根据几何关系及两误差相互独立可得,  $\delta l$  和  $\delta\phi$  对转角重复精度的误差为

$$\Delta\theta_3 = \sqrt{\left(\frac{\delta l}{L}\right)^2 + (\delta\phi)^2}. \quad (4)$$

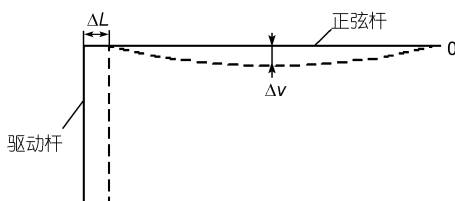


图 4 正弦杆变形

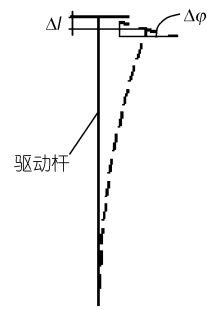


图 5 驱动杆变形

(iii) 转动轴和正弦杆末端滚动轴的径向跳动  $\delta r$  对转角重复精度的误差为

$$\Delta\theta_4 = \sqrt{2} \delta r / L. \quad (5)$$

(iv) 光栅尺的精度  $\delta G$  对转角重复精度的误差为

$$\Delta\theta_{5,6} = \delta G / L. \quad (6)$$

由于各项误差相互独立, 它们对转角重复性的影响应取矢量和, 则波长扫描机构的转角重复精度为

$$\delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_{1,2}^2 + \Delta\theta_3^2 + \Delta\theta_4^2 + \Delta\theta_{5,6}^2 + \Delta\theta_7^2}. \quad (7)$$

### 3.1.3 平面镜转角重复精度

通过有限元分析, 可得不同平面镜角度时驱动杆的伸缩量, 结果如表 3 所示.

表 3 ANSYS 分析结果

| 角度 (°) | 伸缩量 (μm) |
|--------|----------|
| 0      | 37.265   |
| 2      | 37.103   |
| 4      | 36.633   |
| 6      | 36.440   |
| 8      | 37.543   |

根据上表得驱动杆伸缩量相对于 4° 时最大误差  $\delta l = 0.91 \mu\text{m}$ , 经数值计算得驱动平台的平面度最大误差  $\delta\phi = 0.053''$ .

在平面镜扫描机构 0°~8° 转动过程中, 其挠度最大变化量  $\delta v = 0.069 \mu\text{m}$ , 杆长最大变化量  $\delta L = 0.086 \mu\text{m}$ .

取正弦杆为  $L = 693 \text{ mm}$ , 光栅尺的精度  $\delta G = 0.5 \mu\text{m}$ , 转动轴和正弦杆末端滚动轴的径向跳动  $\delta r = 0.5 \mu\text{m}$ , 平面镜扫描机构旋转轴系误差为  $\Delta\theta_7 = 0.1''$ , 根据平面几何关系, 得各项误差源对转角重复精度影响如下:  $\Delta\theta_{1,2} = 0.041''$ ,  $\Delta\theta_3 = 0.276''$ ,  $\Delta\theta_4 = 0.211''$ ,  $\Delta\theta_{5,6} =$

0.149", 由(7)式, 可得 $\delta\theta=0.39"$ , 即平面镜扫描系统转角重复精度计算值为 0.39", 满足设计指标要求 0.43".

### 3.1.4 光栅转角重复精度

通过有限元分析, 可得不同光栅角度时驱动杆的伸缩量<sup>[7]</sup>, 结果如表 4 所示.

表 4 ANSYS 分析结果

| 角度(°) | 伸缩量(μm) |
|-------|---------|
| 0     | 35.727  |
| 2     | 35.776  |
| 4     | 35.956  |
| 6     | 36.274  |
| 8     | 36.972  |

根据上表得驱动杆伸缩量相对于 4°时最大误差 $\delta l=1.016 \mu\text{m}$ , 经数值计算得驱动平台的平面度最大误差 $\delta\varphi=0.041"$ .

在光栅扫描机构 0°~8°转动过程中, 其挠度最大变化量 $\delta v=0.075 \mu\text{m}$ , 杆长最大变化量 $\delta L=0.01 \mu\text{m}$ . 取正弦杆 $L=693\text{mm}$ , 光栅尺的精度 $\delta G=0.5 \mu\text{m}$ , 转动轴和正弦杆末端滚动轴的径向跳动 $\delta r=0.5 \mu\text{m}$ , 光栅扫描机构旋转轴系误差为 $\Delta\theta_7=0.1"$ , 根据平面几何关系, 得各项误差源对转角重复精度影响如下:  $\Delta\theta_{1,2}=0.045"$ ,  $\Delta\theta_3=0.305"$ ,  $\Delta\theta_4=0.211"$ ,  $\Delta\theta_{5,6}=0.149"$ , 由(7)式, 可得 $\Delta\theta=0.41"$ , 即光栅扫描系统转角重复精度计算值为 0.41", 满足设计指标要求 0.43".

### 3.1.5 转角重复精度测试

使用精度优于 0.1"的光电自准直仪<sup>[8]</sup>对平面镜和光栅转角重复精度进行测量, 在相同条件下, 对 10~90 mm 区间每隔 10 mm 进行 9 组测量, 每组测量 10 次, 取算术平均值, 其标准偏差可作为平面镜或者光栅的转角重复精度<sup>[9]</sup>, 结果如表 5 和 6. 由测量结果可知, 平面镜的转角重复精度最大为 0.166", 光栅的转角重复精度最大为 0.149", 均优于设计指标要求 0.43".

## 3.2 高热负载光学元件的内部水冷

第三代光源的一个优点是高通量, 但不可避免会带来高热负载的问题, 如何在高热负载条件下保证光学元件的面形误差在许用范围内就成为一个非常重要问题, 因此对冷却技术提出了很高的要求. 在

表 5 平面镜转角重复精度

| 行程(mm) | 正向(″) | 反向(″) |
|--------|-------|-------|
| 10     | 0.013 | 0.031 |
| 20     | 0.041 | 0.056 |
| 30     | 0.079 | 0.106 |
| 40     | 0.100 | 0.077 |
| 50     | 0.147 | 0.131 |
| 60     | 0.048 | 0.030 |
| 70     | 0.166 | 0.119 |
| 80     | 0.162 | 0.153 |
| 90     | 0.106 | 0.120 |
| MAX(″) | 0.166 | 0.153 |

表 6 光栅转角重复精度

| 行程(mm) | 正向(″) | 反向(″) |
|--------|-------|-------|
| 10     | 0.097 | 0.068 |
| 20     | 0.056 | 0.081 |
| 30     | 0.084 | 0.073 |
| 40     | 0.038 | 0.082 |
| 50     | 0.068 | 0.069 |
| 60     | 0.096 | 0.064 |
| 70     | 0.149 | 0.139 |
| 80     | 0.086 | 0.063 |
| 90     | 0.098 | 0.090 |
| MAX(″) | 0.149 | 0.139 |

理论分析和实验的基础上, 采用多孔腔内部通道水冷方法对平面镜进行冷却, 可保证入射角平面镜的热变形全程优于  $2 \mu\text{rad}$ , 有效保障了高热负载下的能量分辨精度, 确保了在大功率热负载条件下单色器能够正常稳定运行.

平面镜由三部分构成: 镜片(Si)、镜体(Cu)和多孔腔(不锈钢). 镜片长 450 mm, 宽 80 mm, 厚 6.5 mm, 底部刻有 32 道水冷槽, 8 个一组, 共有 4 组, 靠近两端共有 5 个连接槽. 每道水冷槽的宽度/高度为 1/5 mm, 在水冷槽的外面是一道真空保护槽, 宽度/高度为 1/5 mm, 如图 6 和 7 所示.

镜体长 450 mm, 宽 80 mm, 厚 68.5 mm, 两道水槽穿过镜体, 分别连接到镜片的进水口和出水口, 两道真空槽穿过镜体连接到镜片的真空槽. 在镜体的底部, 两个水槽分别被一道真空槽包围.

多孔腔连接到镜体的底部, 水路和气路分别通过 Teflon 管和波纹管从多孔腔连出来, Teflon 管在波纹管内部. 波纹管通过 CF35 法兰连接到多孔腔, Teflon 管的外径是 12.65 mm (1/2 吋).

### 3.3 超高真空大尺寸方法兰的密封

根据光栅和平面镜扫描系统的尺寸, 确定真空

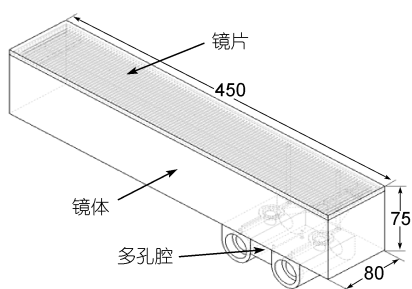


图 6 平面镜的冷却结构

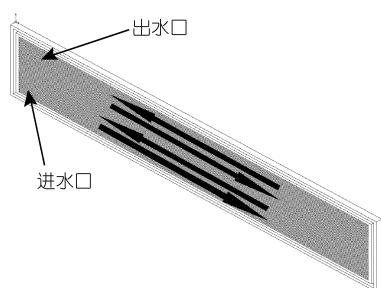


图 7 镜片结构(箭头表示水流方向)

箱体采用长方体结构, 从而涉及到大尺寸方形法兰的加工与密封, 由于箱体内静态真空要求达到  $7 \times 10^{-8}$  Pa, 要求密封表面加工平整, 不得有任何细微划伤, 同时密封用铝丝不得含有硬质颗粒.

密封箱体, 经检漏不漏后, 缓慢升温至  $120^\circ\text{C}$  (约  $2^\circ\text{C h}^{-1}$ ), 然后维持  $120^\circ\text{C}$  持续烘烤一周, 再启动溅射离子泵获取超高真空, 同时缓慢降温至室温 (约  $2^\circ\text{C h}^{-1}$ ), 最终箱体内静态真空度达到  $7 \times 10^{-8}$  Pa, 满足单色器正常工作所需的超高真空.

## 4 VAPGM 性能

### 4.1 光子能量范围

调节入射狭缝开口:  $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ , 出射狭缝开口:  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ , 带光测试结果如图 8 所示, 光子能量范围为: 192~2182 eV.

### 4.2 能量分辨率

调节入射狭缝开口:  $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ , 出射狭缝开口:  $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ , 通过充入电离室不同气体、更改 EPU 上下磁极的间距(GAP)等方式测试, 结果如图 9 和 10 所示, 能量分辨率为: 17900@244 eV, 11396@

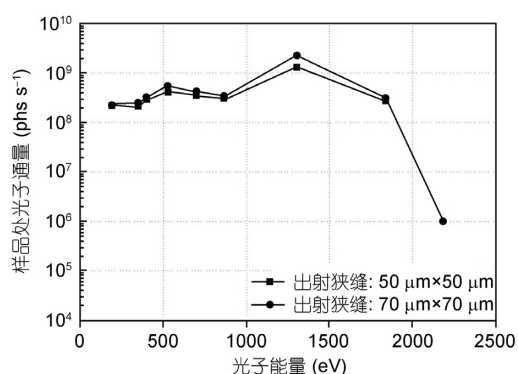


图 8 样品处光子通量

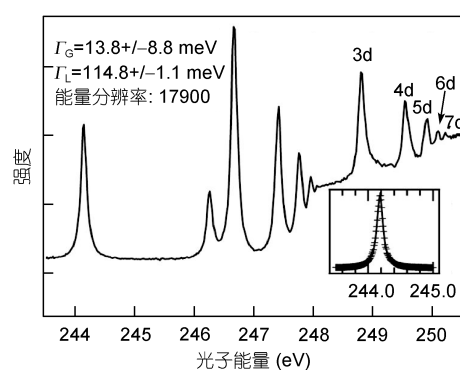


图 9 能量分辨测试结果(条件: 光栅 1, 束流 190 mA, GAP 55.13 mm; 电离室真空 0.67 Pa, 充氩气, 28 V)

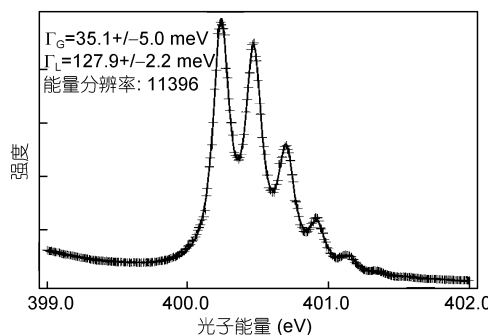


图 10 能量分辨测试结果(条件: 光栅 1, 束流 180 mA, GAP 65.52 mm; 电离室真空 0.27 Pa, 充氩气 28 V)

401 eV.

### 4.3 能量重复性

从 243.5~244.8 eV, 通过 5 次对氩气激发谱的测试, 得到能量重复性均方根值为: 4.3 meV@244 eV, 最大偏差值为: 11 meV@244 eV.

## 5 结论

变包含角平面光栅单色器经过现场安装调试,

所有性能参数均达到设计指标, 能够满足使用要求, 与软 X 射线谱学显微光束线站一起通过国家验收, 现已对国内外用户开放实验.

## 参考文献

- 1 Petersen H. BESSY Technical Report T1329. Berlin: BESSY, 1980
- 2 Warwick T, Cambie D, Padmore H A, et al. Nucl Instrum Methods A, 2001, 467/468: 525–528
- 3 Riemer F, Torge R. BESSY SX-700 UHV monochromator: Design features and kinematic concept. Nucl Instrum Methods, Phys Res Sect A-Accel Spetrom Dect Assoc Equip, 1983, 208(1-3): 313–314
- 4 Petersen H, Jung C, Hellwing C, et al. Review of plane grating focusing for soft X-ray monochromators. Rev Sic Instrum, 1995, 66(1): 1–14
- 5 Petersen H. The high energy plane grating monochromators at Bessy. Nucl Instrum Methods, Phys Res Sect A-Accel Spetrom Dect Assoc Equip, 1986, 246(1-3): 260–263
- 6 徐朝银. 同步辐射光学与工程. 合肥: 中国科学技术大学, 2005. 102–108, 231–233
- 7 Wu K, Xue S, LU Q P, et al. Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator (in Chinese). Opt Precis Eng, 2010, 18(1): 45–51 [吴坤, 薛松, 卢启鹏, 等. SX-700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量. 光学精密工程, 2010, 18(1): 45–51]
- 8 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 9 Moeller-Wedel Optical GmbH. The Instruction Manual of ELCOMAT 3000 Autocollimator. Version 05.12.2008

# The variable included angle plane grating monochromator and the key technology

CHEN JiaHua<sup>1\*</sup>, XUE Song<sup>1</sup>, LU QiPeng<sup>2</sup>, PENG ZhongQi<sup>2</sup>, TAI RenZhong<sup>1</sup>,  
WANG Yong<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup> & WU Kun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China

This article discusses the design of a variable included angle plane grating monochromator (VAPGM) on the soft X-ray spectromicroscopy beam-line at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). The precision scanning system of sin-bar meets the requirements through resolving the high precision repeatability of mechanical transmission system; the inner path water cooling structure of the plane mirror controls the thermal deformation of the mirror surface; the huge dimension and quadrate flange chamber ensures the ultra high vacuum (UHV) which the VAPGM requires. Finally, the main capabilities of the monochromator, including the energy range, energy resolution and energy repeatability, reach the design requirements completely.

**synchrotron radiation, variable included angle plane grating monochromator, key technology**

**PACS:** 07.85.Fv, 07.85.Qe, 41.85.Si

**doi:** 10.1360/132010-773