

同步辐射装置的高输出环面光栅 单色器和VUV光束线

陈 今 涌

摘要: 本文讨论了由柱面反射镜和直槽环面光栅组成的掠入射单色器。柱面反射镜用来形成一个无象散彗差的单色器系统。这个单色器有很大的水平接收角。计算结果表明谱线增宽主要来自环面光栅的离焦。可以得到预期的单色器性能。

本文也详细描述了单色器光学设计程序和同步辐射 VUV 光束线方案。

一、概 述

电子储存环可以发射波长从硬X线到远红外区的光谱连续辐射,偏振性好,且有极高的强度,特别有利于光电子能谱的研究。迄今,在光子能量低于300eV区域已进行了很多光电子能谱研究。今后,随着新同步辐射装置的建立,单色器和高光子能区光电子探测器的性能提高,光电子能谱的研究将会取得很大的发展。

鉴于合肥同步辐射装置将首次在我国建立,在6—100nm波长范围内设计一台中等分辨、高光流输出的单色器,并建立相应的光束线供光电子能谱实验使用,是本工作的主要目标。

自从1972年第一台环面光栅单色器设计成功以来,环面光栅单色器已在电子储存环上得到普遍使用。由于环面光栅单色器所用光学元件少,光栅扫描机构简单,兼容 10^{-8} Torr超高所空容易,且有中等分辨和较高的输出光流,成本较低,所以,我们仍以环面光栅型单色器真持有的这些优点考虑我们的单色器设计。

二、单色器设计考虑

在掠入射环面光栅单色器中,环面光栅担负着色散和聚焦两种功能。合理选择环面光栅水平和垂直方向半径,可在出缝处得到无象散的单色谱像,单色器能量有显著提高。但是,其象散彗差较难克服。尽管全息象差校正光栅可以改善高级次象差,但是至今所有的全息光栅在其表面上残留着光蚀剂,限制了它在强同步辐射中使用。Pooney^[1]、Howells^[2]等人相继叙述了直槽环面光栅单色器的优选设计及其在同步辐射装置中的应用,但系统仍存在象散彗差影响。为此,我们考虑一种柱面反射镜与环面光栅组合的单色器系统,目的在于克服象散彗差,提高单色器能量输出。

图1,表示了这种柱面反射镜—环面光栅单色器系统。在缝宽方向,柱面反射镜M将狭缝S成象在a点处,成象比近似2:1。然后,由环面光栅G将狭缝又成象在S'上。在缝高方向,柱面反射镜M不成象,狭缝S直接由光栅G成象在S'上。由图可见,环面光栅具有不等的垂直物距(缝高方向)和水平物距(缝宽方向)。所以,可认为这一系统为物点有象散的环面光栅单色器系统。

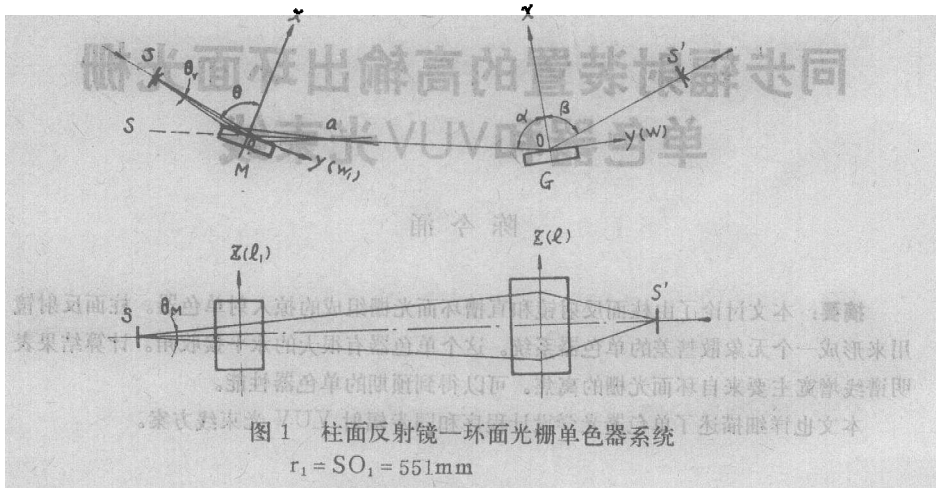


图1 柱面反射镜—环面光栅单色器系统

$$r_1 = SO_1 = 551\text{mm}$$

$$r_1' = O_1a = 331\text{mm}$$

$$r = Oa = 1136\text{mm}$$

$$r' = OS' = 2000\text{mm}$$

$$r_v = SO = 2000\text{mm}$$

$$\text{光栅面积 } 100 \times 50\text{mm}^2$$

$$\text{系统接收 垂直 } \theta_v = 2.5\text{mrad}$$

$$\text{水平 } \theta_H = 25\text{mrad}$$

$$\theta = 85^\circ$$

$$\alpha + \beta = 162^\circ$$

环面光栅在满足垂直聚焦条件下，象散彗差系数为

$$F_{12} = \frac{1}{r'^2} \frac{(\sin\beta - \frac{1}{n_v} \sin\alpha) (\cos\alpha - \frac{1}{n_v} \cos\beta)}{(\cos\alpha + \cos\beta)} \quad (1)$$

此处， $n_v = \frac{r_v}{r'}$ 为垂物距与象距之比。由上式可知， F_{12} 值随 n_v 变化。在 $n_v = 1$ 时，具有最小的象散彗差系数。

常规环面光栅，在同时满足水平聚焦和垂直聚焦条件下，一般 $r_v = r \approx \frac{1}{2}r'$ 。在 $\alpha + \beta = 162^\circ$ 时，按 (1) 式比较这两种情况，可知常规环面光栅的象散彗差系数比 $r_v = r'$ 的环面光栅大 $1 \sim 3 \times 10^2$ 。以相同的象差量 $F_{12} W l^2$ 估计，可得具有 $n_v = 1$ 的象散环面光栅允许使用的光栅高度 l 约为常规环面光栅 l' 的 10 倍，亦即，可接收的水平角

$$\theta_H = \frac{l r_v}{l' r'} \theta_H' = 5 \theta_H'$$

另一方面，由于系统中多使用了一块反射镜，短波长反射损失增加。对于镀金的反射镜来说，在波长 4nm 处，入射角为 85° 时，能量约损失 60%； 6nm 处，约为 40%。尽管如此，系统可输出的能量，在 4nm 处将净增 1 倍。

在柱面反射镜—环面光栅单色器系统中，来自柱面反射镜的象差主要是彗差。在满足水平聚焦条件下，其彗差为

$$W_1^3 H_{30} = \frac{1}{4} \theta_v^3 r_1' \text{tg}\theta (n-1)^2 n \quad (2)$$

或
$$W_1^3 H_{30} = \frac{1}{4} \theta_v^3 r' \cos \theta \left(\frac{1-n_n}{1+n} \right) (n-1)^2 n \quad (3)$$

式中, $n = \frac{r_1}{r'_1}$ —— 柱面反射镜成像比,
 $n_n = \frac{r}{r'}$ —— 环面光栅缝宽方向成像比,
 r_1, r'_1 —— 为柱面反射镜物距、象距,
 r, r' —— 环面光栅水平物距和象距,
 θ_v —— 单色器垂直接收角,
 θ —— 柱面反射镜入射角。

在系统成像比1:1, 即 $n \cdot n_n = 1$ 的情况下, 上式可写成

$$W_1^3 H_{30} = \frac{1}{4} \theta_v^3 r' \cos \theta \frac{(n-1)^3}{1+n} \quad (4)$$

由(4)式可知, 彗差的存在取决于 n 值的大小。 $n = 1$ 时, 彗差消除, 随着 n 的增大彗差相应增加。今用参数 $r' = 2000\text{mm}$, $\theta_v = 2.5 \times 10^{-3}\text{rad}$, $\theta = 85^\circ$, $\frac{1}{n_n} = 1.76$ 或 $n = 1.76$, 代入(4)式得

$$W_1^3 H_{30} = 142.3 \times 10^{-7}\text{mm} \leq 3.76\lambda (\lambda = 4\text{nm}),$$

即此项彗差满足Strehl^[11]条件, 不产生谱像增宽。采用上列参数, 根据Strehl条件求得的 n 极限值为1.775。

就环面光栅和系统彗差 $W^3 F_{30}$ 和 $W_1^3 H_{30} + W^3 F_{30}$ 而言, 从下面的计算表明, 它们都满足Strehl谱像不增宽条件。

综上所述, 由柱面反射镜和环面光栅组成的单色器系统, 不仅能克服象散彗差的谱像增宽, 在高于6nm的波长得到可观的仪器能量输出。而且, 可以获得彗差谱像增宽的1:1色散成象, 这有利于光束线前置镜的光学设计考虑。

三、单色器性能和基本设计程序

采用Namioka用过的直角坐标系, 如图1所示, 环面光栅顶点位于直角坐标系原点 O , X 轴垂直于光栅表面, Y 轴与光栅刻线垂直并位于主平面内, Z 轴平行于刻槽。对于对称的系统; 则自 S 点发射的任意光线到达出缝 S' 后与主光线的光程差 ΔF (仅考虑四级象差) 可用下式表示:

$$\begin{aligned} \Delta F = & H_{20} W_1^2 + H_{02} l_1^2 + H_{30} W_1^3 + H_{12} W_1 l_1^2 + H_{40} W_1^4 + H_{22} W_1^2 l_1^2 \\ & + F_{20} W^2 + F_{02} l^2 + F_{30} W^3 + F_{12} W l + F_{40} W^4 + F_{22} W^2 l^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, H_{20}, F_{20} —— 离焦系数,
 H_{02}, F_{02} —— 象散系数,
 H_{30}, F_{30} —— 彗差系数,
 H_{12}, F_{12} —— 象散彗差系数,
 H_{40}, F_{40} —— 球差系数,
 H_{22}, F_{22} —— 球差系数,

W_1, l_1, W, l —— 分别为柱面反射镜和光栅宽度和高度。

对柱面反射镜来说, 可取 $H_{20} = 0, H_{02} = 0, H_{12} = 0, H_{22} = 0$, 故方程式(5)可写成

$$\begin{aligned} \Delta F = & H_{30}W_1^3 + H_{40}W_1^4 + F_{20}W^2 + F_{02}l^2 + F_{30}W^3 \\ & + F_{12}Wl^2 + F_{40}W^4 + F_{22}W^2l^2 \end{aligned} \quad (6)$$

依据 Fermat's 原理, 求得在色散平面内 S' 像的宽度 Y 和高度 Z 即象差总量如下。

$$Y = \frac{r'}{\cos\beta} \frac{\partial(\Delta F)}{\partial W}$$

$$Z = r' \frac{\partial(\Delta F)}{\partial l}$$

亦即

$$Y = \frac{r'}{\cos\beta} (Q_1 + Q_2) \quad (7)$$

或
$$\Delta\lambda = \frac{1}{mn} (Q_1 + Q_2) \quad (8)$$

$$Z = Zr' F_{02} \quad (9)$$

此处,
$$Q_1 = (3H_{30}W_1^2 + 4H_{20}W_1^3) \quad (10)$$

$$Q_2 = (2F_{20}W + 3F_{30}W^2 + F_{12}l^2 + 4F_{40}W^3 + 2F_{22}Wl^2) \quad (11)$$

$$H_{30} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1} T_1 \sin\theta + \frac{1}{r'_1} T'_1 \sin\theta \right)$$

$$H_{40} = \frac{1}{8} \left[\frac{4}{r'^2} T_1 \sin^2\theta - \frac{T_1^2}{r_1} + \frac{4T'_1}{r'^2} - \frac{T_1'^2}{r'_1} + \frac{S_1 + S'_1}{R_1^2} \right]$$

$$F_{20} = \frac{1}{2} (T + T')$$

$$F_{02} = \frac{1}{2} (S + S')$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_r} S \sin\alpha + \frac{1}{r'_r} S' \sin\beta \right)$$

$$F_{30} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} T \sin\alpha + \frac{1}{r'} T' \sin\beta \right) \quad (12)$$

$$F_{40} = \frac{1}{8} \left[\frac{4T}{r^2} \sin^2\alpha - \frac{T^2}{r} + \frac{4T'}{r'^2} \sin^2\beta - \frac{T'^2}{r'} + \frac{S + S'}{R^2} \right]$$

$$F_{22} = \frac{1}{4} \left[\frac{2S}{r_v^2} \sin^2\alpha - \frac{TS}{r_v} + \frac{2S'}{r_v'^2} \sin^2\beta - \frac{T'S'}{r'} + \frac{S + S'}{R\rho} \right]$$

$$T_1 = \frac{1}{r_1} \cos^2\theta - \frac{1}{R_1} \cos\theta \quad T'_1 = \frac{1}{r'_1} \cos^2\theta - \frac{1}{R_1} \cos\theta$$

$$T = \frac{1}{r} \cos^2\alpha - \frac{1}{R} \cos\alpha \quad T' = \frac{1}{r'} \cos^2\beta - \frac{1}{R} \cos\beta$$

$$S = \frac{1}{r_v} - \frac{1}{\rho} \cos\alpha \quad S' = \frac{1}{r'_v} - \frac{1}{\rho} \cos\beta$$

式中,

r_1, r_1', R_1 ——分别为柱面反射镜物距、象距和半径,

r, r_v, r', R, ρ ——分别为环面光栅水平物距、垂直物距、象距、主半径和垂直半径,

θ ——柱面反射镜入射角,

α, β ——为环面光栅入射角和衍射角,

m ——光栅衍射级次,

n ——光栅刻线数,

$\Delta\lambda$ ——为光谱带宽.

由于谱像增宽是 W, l 的函数, 因此, 可对边缘光线即光栅表面上的八个点, $P_1(-\frac{1}{2}W, -\frac{1}{2}l), P_2(\theta, -\frac{1}{2}l), P_3(\frac{1}{2}W, -\frac{1}{2}l), P_4(-\frac{1}{2}W, \theta), P_5(\frac{1}{2}W, \theta), P_6(-\frac{1}{2}W, \frac{1}{2}l), P_7(\theta, \frac{1}{2}l), P_8(\frac{1}{2}W, \frac{1}{2}l)$ 进行计算, 以便观察各种象差对谱像增宽的贡献, 和得到粗略的谱像斑点图。这样, 我们可用标准偏差^[4]

$$Y_s = 2 \sqrt{\frac{K \sum_{i=1}^K Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^K Y_i \right)^2}{K(K-1)}} \quad (13)$$

来表征系统的成像质量即像的半宽度值 FWHM。此处, $Y_i = r' \Delta\beta$ 相当于 P_i 点斑点图水平坐标。

在我们考虑的系统, 入射光线与衍射光线夹角 $\alpha + \beta = 162^\circ$, 采用 1800 条/mm、600 条/mm、200 条/mm 三块光栅复盖波长 4—96nm 光谱范围。

首先, 在每一块光栅工作波长范围内, 选取任意两个波长 λ_1, λ_2 位置或 α_1, α_2 满足水平聚焦条件, 即

$$\frac{1}{r} \cos^2 \alpha_1 + \frac{1}{r'} \cos^2 \beta_1 - \frac{1}{R} (\cos \alpha_1 + \cos \beta_1) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{1}{r} \cos^2 \alpha_2 + \frac{1}{r'} \cos^2 \beta_2 - \frac{1}{R} (\cos \alpha_2 + \cos \beta_2) = 0$$

确定 r, r', R 值, 直到工作波长范围内 F_{20} 离焦系数达到满意结果。

然后, 在工作波长范围内, 选取任一波长位置满足垂直聚焦条件, 即

$$\frac{1}{r_v} - \frac{1}{\rho} \cos \alpha + \frac{1}{r'} - \frac{1}{\rho} \cos \beta = 0 \quad (15)$$

确定 ρ 和 r_v 值, 以使 F_{02} 象散系数在工作波长范围内得到满意的结果。

方程式 (11) 中的 W_1, l_1, W, l 值由下式给出:

$$\begin{aligned} W_1 &= \theta_v \cdot r_1 / \cos \theta & l_1 &= \theta_H \cdot r_1 \\ W &= \theta_v \cdot r^1 / \cos \alpha & l &= \theta_H \cdot r_v \end{aligned} \quad (16)$$

最后, 将求得的上述数值, 代入方程式 (8)(10)(11)(12) 中计算有关象差系数和谱像增宽。结果列在表 1 内。所采用系统基本参数如下:

表1

θ	$l = 50$ W (mm)	1800 条/mm Δl	F_{20} $2WF_{20}$	F_{02} $2lF_{02}$	F_{30} $3W^2F_{30}$	F_{12} l^2F_{12}	F_{40} $4W^2F_{40}$	F_{22} $2Wl^2F_{22}$
82-85° 4mm	37.6	.0034	$-.972278 \times 10^{-6}$ 5.4353×10^{-6}	-1.2533×10^{-6} -6.2665×10^{-6}	$-.44527 \times 10^{-9}$ 1.8885×10^{-6}	$-.04931 \times 10^{-6}$ -1.2327×10^{-6}	$-.57647 \times 10^{-12}$ $.12257 \times 10^{-6}$	$-.16978 \times 10^{-12}$ $-.0319 \times 10^{-6}$
83° 6mm	41	.0071	$-.15278 \times 10^{-6}$ $-.12.5284 \times 10^{-6}$	-1.087×10^{-6} -5.435×10^{-6}	$.0552 \times 10^{-9}$ $.29007 \times 10^{-6}$	$-.02349 \times 10^{-6}$ $-.58734 \times 10^{-6}$	$.12834 \times 10^{-12}$ $.035381 \times 10^{-6}$	$.03288 \times 10^{-12}$ $.0064 \times 10^{-6}$
83-5° 7.5mm	44.2	.0107	$-.29198 \times 10^{-6}$ -18.4878×10^{-6}	$-.9153 \times 10^{-6}$ -4.5765×10^{-6}	$-.13218 \times 10^{-9}$ $-.77469 \times 10^{-6}$	$-.001995 \times 10^{-6}$ $-.00408 \times 10^{-6}$	$-.09064 \times 10^{-12}$ $-.031307 \times 10^{-6}$	$.24215 \times 10^{-12}$ $.05351 \times 10^{-6}$
84° 8mm	48	.0093	$-.16392 \times 10^{-6}$ $-.15.7364 \times 10^{-6}$	$-.70537 \times 10^{-6}$ -3.5268×10^{-6}	$-.26183 \times 10^{-9}$ -1.8397×10^{-6}	$.03303 \times 10^{-6}$ $.82586 \times 10^{-6}$	$-.287089 \times 10^{-12}$ $-.126998 \times 10^{-6}$	$.49736 \times 10^{-12}$ $.11936 \times 10^{-6}$
85° 12mm	57	.0112	$.231198 \times 10^{-6}$ 26.3498×10^{-6}	$-.17115 \times 10^{-6}$ $-.85575 \times 10^{-6}$	$-.86535 \times 10^{-9}$ -8.4346×10^{-6}	$.112053 \times 10^{-6}$ 2.8713×10^{-6}	$-.78334 \times 10^{-12}$ $-.58027 \times 10^{-6}$	1.0558×10^{-12} $.3009 \times 10^{-6}$
θ	W_1 (mm)		H_{20} $2W_1H_{20}$	H_{02} $2l_1H_{02}$	H_{30} $2W_1^2H_{30}$	$l_1^2H_{12}$ $l_1^2H_{12}$	H_{40} $4W_1^2H_{40}$	H_{22} $2W_1l_1^2H_{22}$
85°	10		0	0	$.74532 \times 10^{-6}$ 2.2359×10^{-6}	0	$.37839 \times 10^{-10}$ $.15123 \times 10^{-6}$	0

$$\begin{aligned}
 r' &= 2000\text{mm} \\
 r &= 1136\text{mm} \\
 r_v &= 2000\text{mm} \\
 N &= 1800\text{条/mm} \\
 \theta_s &= 2.5 \times 10^3 \text{rad} \\
 \theta_H &= 25 \times 10^3 \text{rad}
 \end{aligned}$$

从表 1 中所列结果可以看出,

- 1) 象散彗差系数很小, 在 $l = 50\text{mm}$ 时, 象散彗差不会产生谱像增宽。
- 2) 来自柱面反射镜的两项象差—彗差和球差也不影响像的增宽。
- 3) 可以结论, 由柱面反射镜和环面光栅组成的掠入射单色器其谱像增宽主要来自离焦影响, 在下列波长处的增宽值为

4nm	$\Delta\lambda = 0.0034\text{nm}$
6nm	$\Delta\lambda = 0.0071\text{nm}$
7.5nm	$\Delta\lambda = 0.0107\text{nm}$
9nm	$\Delta\lambda = 0.0093\text{nm}$
12nm	$\Delta\lambda = 0.0112\text{nm}$

四、单色器输出光流

单色器输出能量可用下式^[5]估计

$$N_M(\lambda) = N(\lambda) \cdot T_B \cdot T_M \cdot \theta_H \cdot (\alpha_x / \varepsilon_{ox}) (\alpha_y / \varepsilon_{oy}) \cdot \Delta\lambda_M \quad (17)$$

式中,

$\varepsilon_{ox}, \varepsilon_{oy}$ ——电子束流发射度,

α_x, α_y ——单色器接收, 设计时所选系统参数可使 $\alpha_x / \varepsilon_{ox} = 1, \alpha_y / \varepsilon_{oy} = 1,$

T_B ——柱面反射镜反射率,

T_M ——光栅衍射效率,

$N(\lambda)$ ——同步辐射光谱输出通量,

θ_H ——单色器水平接收角。

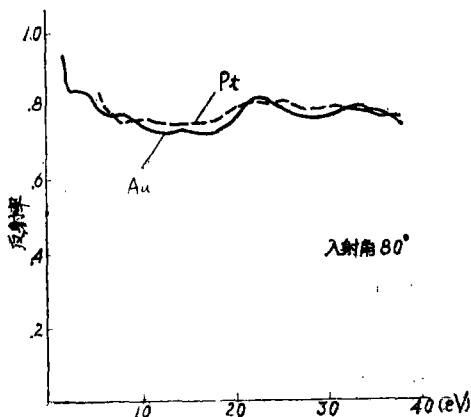


图2a Au, Pt反射率曲线

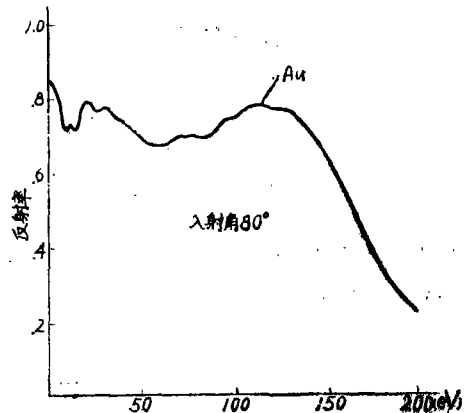


图2b Au反射率曲线

在本系统中圆柱反射镜表面镀金，入射角 85° ，其反射率曲线^[6]如图 2 所示，在波长 12nm 处的反射率为 75% 。

采用刻线数分别为 1800条/mm 、 600条/mm 、 200条/mm 三块离子刻蚀矩形槽形光栅或 Lamirar 光栅，基底材料熔石英，光栅表面镀金。光栅构槽深度 h 分别为 9.5nm 、 28.5nm 、 85.5nm ，槽宽 $d-c$ 与光栅常数 d 之比 $d-c/d$ 都为 0.612 。目前，较好的 1800条/mm Lamirar 光栅衍射效率^[7]如图 3 所示，在波长 12nm 处，入射角 85° 时其效率约为 5% 。对 600条/mm 和 200条/mm 光栅而言，由于光栅常数 d 增大，同时在它们工作的波段上金反射率增加，估计它们的效率会相应增加。

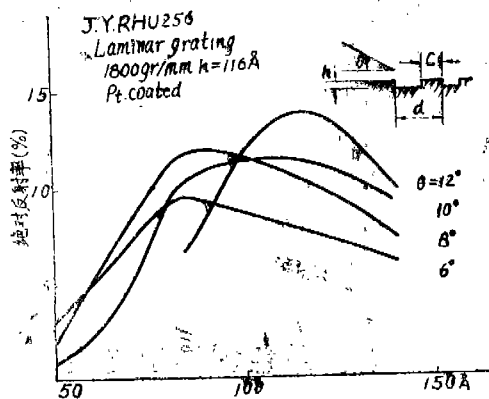


图3 Lamirar光栅衍射效率曲线

理论上，定向光栅的衍射效率高于矩形和波状槽形光栅。实际上，它们的实际测量衍射效率基本接近，所以，我们将根据它们本身的特性给予试用。

合肥同步辐射装置能量 800MeV ，束流电流 300mA 时的光谱通量 $N(\lambda)$ 在波长 12nm 处给出的数值约为 6×10^{14} 光子/ $\text{s} \cdot \text{mrad} \cdot \text{nm}^{(8)}$ 。

在本单色器方案中，象散彗差所允许使用的光栅高度 50mm ，折合单色器水平会集角 $\theta_x = 25\text{mrad}$ 。

当入射狭缝和出射狭缝缝宽 b 为 0.46mm 时，在 4nm 波长处由出缝射出光束的光谱带宽由下式

$$\begin{aligned}
 \Delta\lambda_M &= \frac{d\lambda}{dl} \cdot b + \Delta\lambda \\
 &= \frac{1}{n} \cos\alpha \cdot \frac{1}{r} \cdot b + \Delta\lambda
 \end{aligned} \tag{18}$$

求得 $\Delta\lambda_M = 0.022\text{nm}$

将上述所列数据代入方程式 (17) 中，计算单色器能量输出，在波长 12nm 处可得到 $N_M(12\text{nm}) = 1.23 \times 10^{14}$ 光子/s，带宽为 0.022nm 的输出光流。

五、光束线设计

如图 4 所示，光束线由前置镜、柱面反射镜—环面光栅单色器和后置镜组成。同步辐射

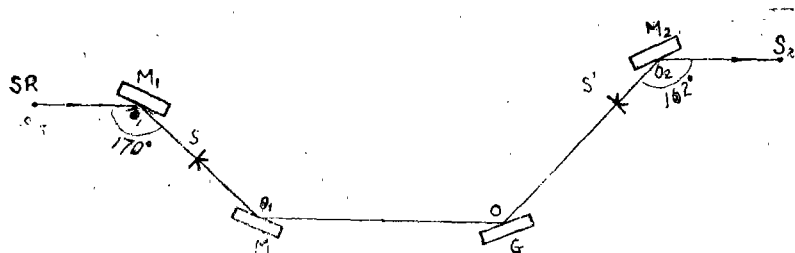


图4 VUV光电子谱光束线路

$S_0O_1 = 4500\text{mm}$	系统接收 垂直 2.5mrad 水平 25mrad
$O_1S = 4500\text{mm}$	S_2 光斑面积约 $1 \times 1.7\text{mm}^2$
$S'O_2 = 600\text{mm}$	M_1, M_2 —环面反射镜
$O_2S_2 = 1200\text{mm}$	MG—柱面反射镜—环面光栅单色器
SR光源面积 $0.46 \times 0.8\text{mm}^2$	S, S'—狭缝

光源面积 $0.46 \times 0.8\text{mm}^2$ ，环面反射镜 M_1 将其1:1成象在S上，会集垂直 2.5mrad ，水平 25mrad 同步辐射光流输入单色器。由出缝射出的单色光束再经 M_2 环面反射镜将出缝1:2成象在样品上，以约 $1 \times 1.7\text{mm}^2$ 的光斑照射样品。为了获得较短波长的同步辐射和使单色器系统中的光栅室离地面有一定高度，便于超高真空系统安排，取 M_1 反射镜入射角为 85° ， M_2 反射镜为 81° ，使光束水平射向样品。

M_1, M_2 环面反射镜表面镀金，在波长 12nm 处反射率为75%，见图2。这样，可望在样品上得到 0.7×10^{13} 光子/s的光能，光谱带宽 0.022nm 。

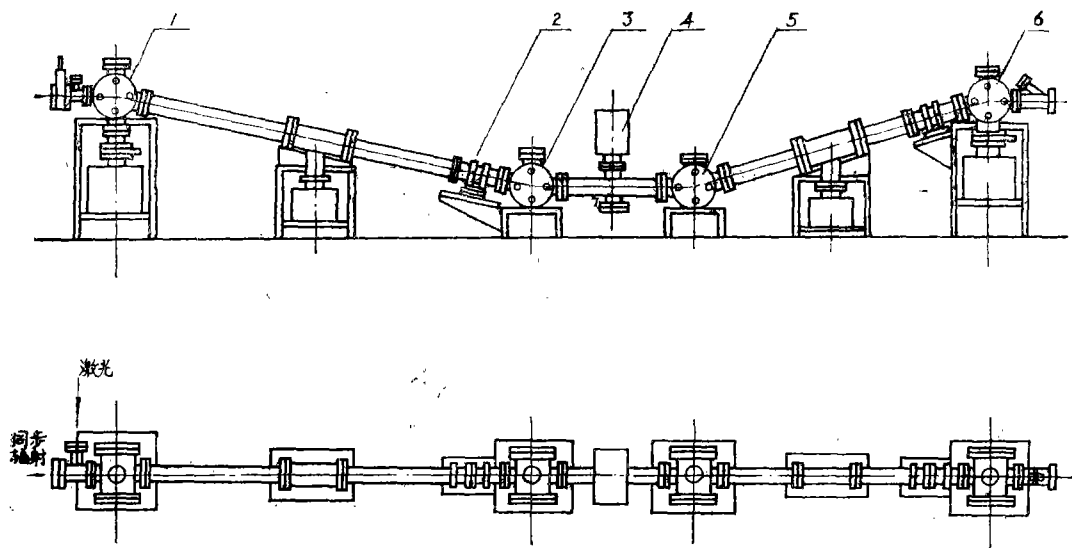


图5 合肥同步辐射VUV光电子谱光束线

1—前置镜室 2—可调狭缝 3—柱面镜室 4—离子泵 5—光栅室 6—后置镜室

如光束线结构图5所示，整个光束线由三个反射镜室、一个光栅室、二个可调狭缝、超高真空阀、真空管道、测量规以及离子泵机组等构成。仪器在 10^{-9}Torr 超高真空下工作。

单色器波长扫描系统、光栅交换机构按 10^{-9} Torr 超高真空要求设计。利用光学莫尔条纹角度测量装置和微型计算机进行扫描波长控制。波长扫描精度要求达 $\pm 0.02\text{nm}$ ，重复性 $\pm 0.02\text{nm}$ 。

狭缝宽度可在超高真空条件下从0—3mm连续可调，缝宽20mm。

在 M_1 反射镜室前端有一标准法兰与光束线前端区相接。束线前部设有窗口和对准反射镜，可射入激光或其他光源进行束线对准和单色器性能现场调试和检测。

参 考 文 献

- [1] Michel R. Pouey et al.; Visible Ultraviolet Optical Design of Toroidal Mirror-Toroidal Grating Combinations, SPIE, 1981, 315, 37.
- [2] W. R. McKinney, M. R. Howells; Design Optimization of Straight Groove Toroidal Grating Monochromators for Synchrotron Radiation, Nucl. Instru. and Meth., 1980, 172, 149—156.
- [3] Michel R. Pouey; Second-order Focusing Conditions for Ruled Concave Gratings, J. O. S. A., 1974, 64, 1616—1622.
- [4] C. Depautex, M. Lavollee, and Others; Normal Incidence Monochromator for Synchrotron Radiation, Nucl. Instru. and Meth., 1978, 152, 69—72.
- [5] D. L. Ederer, J. B. West; A High Throughput 2m Normal Incidence Monochromator for SURF—II, Nucl. Instru. and Meth., 1980, 172, 185.
- [6] H. J. Hagemann et al.; Optical Constants from Far Infrared to the X-ray Region: Mg, Al, Cu, Au, Bi, C, and Al_2O_3 , DESY Report SR 74/7, 1974, May.
- [7] M. Berland et al.; X-ray Ultraviolet Grating Measurements at LURE; Comparison with Electromagnetic Theory Predictions, SPIE, 1981, 315, 155.

A High Throughput Toroidal Grating Monochromator and VUV Beamline for Synchrotron Radiation

Chen Jinyong

Abstract

A grating monochromator combined by a cylindrical mirror and a straight groove toroidal grating is discussed. The cylindrical mirror is employed to form the monochromator system of astigmatic coma-free. The monochromator has a large horizontal collection angle. The calculated results show that the line broadening mainly comes from defocusing of the toroidal grating. The expected performance of the monochromator could be obtained.

The optical designing process of the monochromator and the VUV beamline configuration for synchrotron radiation are also considered in detail.