

同步辐射光束线中的光学元件及单色仪

王传基 赵安庆

一、前 言

同步辐射光束线的任务是将光束引到实验区,并将其“单色化”,取出所需波长的单色光,提供不同用户使用。因此,光束线在光学方面要完成的工作主要有:

1. 截取所需的光束并根据要求将其分成若干路。

同步辐射是一个扁平的光束,在轨道平面内光束发散角约几十个毫弧度,在垂直于轨道的平面内约几个毫弧度。实际使用时,在满足光通量要求的情况下,并不需要这么大的光束,故光束线的前端区都配置有分光镜,由它截取所需光束,并将全光束分成几路。一般情况下,一条光束线均包含有二一四块分光镜。

2. “单色化”:经过专门配置的单色仪,使输出的光变成用户所要求的单色光,对此单色光的光通量、可变波长的范围、单色性、偏振度等指标,决定了单色仪的技术要求。

3. 将光束偏折到要求的部位:为了在同步辐射装置周围合理配置各实验站,需将光束在空间作必要的偏折及聚焦,故光束线上一一般均配有反射镜及聚焦镜,其技术要求应根据实验站的配置及要求投射到实验站的光斑尺寸来决定。

在光束线设计时应将上述各部分联成一个整体来考虑。

本文将首先介绍国外真空紫外光束线配置的一些情况,然后分别讨论各种光学元件及单色仪的一些特殊要求,并简略地介绍总体设计时应遵循的几项原则。

二、国外真空紫外光束线的配置情况

国外已建成的同步辐射装置已有二十几台,表1列出较有代表性的几个及其主要参数^{(1),(2)}:

表 1

名 称 和 地 点	能量GeV	特征波长 $\lambda_c(\text{\AA})$
ACO (Paris) (法国)	0.54	39
DORIS (Hamburg) (西德)	5.0	0.54
Photon Factory (Tsukuba) (日本)	2.5	3.0
VEPP-2M (Novosibirsk) (苏联)	0.67	23
SPEAR (stanford) (美国)	4.0	1.1
VUVSource (Brookhaven) (美国)	0.70	31
Tantalus I (Stoughton) (美国)	0.24	260
ESRF (Strasbourg) (法国)	5	1.0
SRS (Daresbury) (英国)	2	4
SURF-II (Washington) (美国)	0.25	200

下面举两个典型的装置为例。

1. DESY-DORIS(西德)^{(3),(4)}

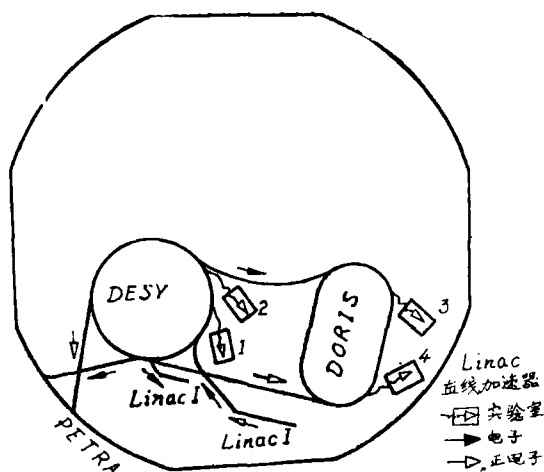


图 1

图中标号 1、3 代表物理实验室，2、4 代表分子生物学实验室，1、3 实验室的光路配置如下表：

表 2

实验室	光路	主要用途	单色仪型式	单色仪主要性能	备注
1	A	研究光电子谱	掠入射平面光栅单色仪	波段范围 44—900Å 分辨率 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 400$	
	B	吸收、反射测定，光电子发射及荧光研究	正入射 Wadsworth 型	焦距 1.1 米，分辨率 1—2Å 光谱范围 300—2400Å	下列 Wadsworth 型与此指标相同
			掠入射 1 米 Rowland 摄谱仪	波段范围，44—350Å 分辨率 0.04 Å (用 2400 条线/毫米光栅)	
C	在低频下测定吸收、反射，光电子谱	正入射 Wadsworth 型			

实用上所占比重大致相当。

③ 正入射仪器中基本上是二种类型，要求分辨率高的采用Mcpherson 3米真空紫外单色仪，分辨率要求较低的采用1.1米Wads Worth型单色仪，这是一种没有入射狭缝、凹面光栅处于平行光下工作的单色仪，结构比较简单。

④ 掠入射单色仪主要是采用Rowland型单色仪，典型仪器如Mcpherson 247型。

⑤ DESy-DORIS同步辐射装置建立较早，因此光束线中采用的单色仪多数是结构较简单或通用的仪器，不如后建的一些装置采用了更多的专门设计的新型仪器及新技术，可认为这是一个较早期的典型。

2. SRS (英国Daresbury)

这是一台近期建立的同步辐射装置，1981年出光，目前尚在不断完善中，整台装置共有十三条光束线，其中真空紫外光束线有三条，即VUV3, VUV6及大孔径12线。

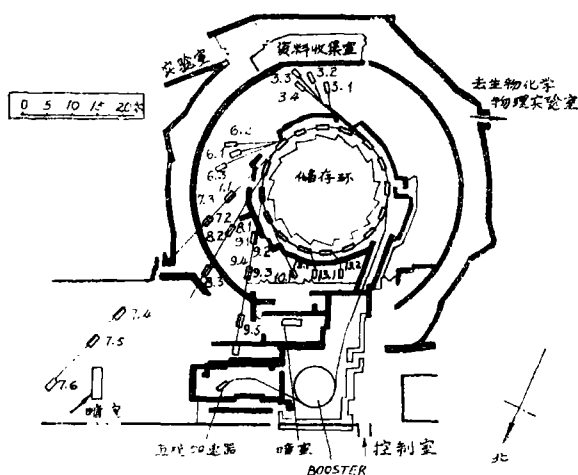


图3

这三条光束线的参数如下^[5]：

表3

光束线号	光路号	水平接收光束角mr	反射镜及聚焦比	单色仪	窗口	光通量 光斑尺寸等 (2Gev, 100mA)	主要用途
3	3.1	7.5	SiC柱面前置镜 4:1水平缩小率	Seya单色仪 350~2500Å ~0.5Å分辨率	LiF 窗口 或无	~5 × 10 ¹² 光子/秒在1000Å	光离子质谱学 (PIMS)
	3.2	3.5	平面偏向用SiC 平面镜，后面是 熔石英的椭球镜 3:1垂直缩小率	5米正入射 400—3000Å	无窗或 LiF 窗口	~3 × 10 ¹² 光子/秒 在1000Å	高分辨率分子光谱学 (HRMS)

续表3

光束线号	光路号	水平接收光束角 m_r	反射镜及聚焦比	单色仪	窗口	光通量 光斑尺寸等 (2Gev, 100mA)	主要用途
3	3.3	10	SiC柱面镜, 2:1水平聚焦, 后面是熔石英柱 面镜, 4:1垂直 缩小率	超环面光栅 (TGM) 120—1200Å 分辨率~0.05Å	无窗口	$\sim 2 \times 10^{14}$ 光子/秒 在200Å	角分辨光电子谱 (ARPS)
	3.4		(工作于X线区, 从略)				
6	6.1	8	镀金玻璃柱面 镜, 2:1水平聚 焦	掠入射50—300Å 分辨率~0.1Å	无窗	$\sim 2 \times 10^{12}$ 光子/ 秒/Å 在 $\lambda = 100\text{Å}$, 5毫米 ² 内	角色散电子谱 (ADESI)
	6.2	10	两个石英镀金柱 面镜, 4:1垂直 和2:1水平聚焦	掠入射超环面光 栅, 120—1200Å 分辨率~ 0.05ev	无窗	$\sim 2 \times 10^{14}$ 光子/ 秒/Å 在 $\lambda = 200\text{Å}$ 2毫 米 ² 内	(ADESII)
	6.3	10	两镀金石英聚焦 镜2:1水平及垂 直聚焦	光栅及晶体软 x 线1.5—50Å 分辨率~2ev	无窗	$\sim 8 \times 10^{18}$ 光子/ 秒/Å 在 $\lambda = 10\text{Å}$ 5毫 米 ² 内	(SEXAFS)
12	12.1	垂直 40 水平 7	镀铝SiC100× 75毫米 ² 球面, 后面是超环面镀 金镜185×60毫 米 ² , 1:1水平 和垂直聚焦	正入射 (CT型) >1200Å	LiF 或硅	$\sim 10^9$ 光子/脉冲 单束在10mA束 流, 在0.1% $\frac{\delta\lambda}{\lambda}$	荧光寿命及时间 分辨谱

从上述配置情况可见:

① 除荧光试验需要大孔径截取较大光束以外, 其它光束线也被分成多路, 分别满足不同实验的要求。

② 上述三条光束线共配置了三台正入射单色仪及三台掠入射单色仪, 说明这两类仪器的配置所占比重亦相当。

③ 正入射仪器包括高分辨率及中等分辨率两种, 这与DESY的布局是相似的。

④ 掠入射单色仪主要是超环面光栅单色仪。

⑤ 由于SRS建立时间较晚, 故光束线中采用了大量新技术, 如分光镜多数采用SiC作材料, 反射镜及光栅多数是超环面、柱面等非球面系统, 仪器也都能适应 10^{-9} 托超高真空要求, 并考虑了消除高级次光谱重叠等, 这些都比DESY有了较大的进步。

三、对镜胚材料及光学元件的要求

真空紫外光束线上所用的光学元件主要是二种，一是反射镜，一是光栅。为了尽量减少光能的损失，在满足光路偏折、成象、色散的条件下，应尽量减少这些光学元件的数量。另外，由于光学元件要承受高强度辐射，要在超高真空下工作，要防止镜面污染，因此，其材料、镀膜、面型等都具有与一般光学仪器不同的要求。下面，将分别予以讨论。

1. 分光镜的材料

分光镜是光束线上第一个光学元件，对它有一系列特殊要求：

① 要求能承受高功率密度的辐射。

分光镜截取光束时，表面要承受每平方公分上百瓦至几千瓦功率密度的辐照，如在DORIS曾对一实验反射镜进行测试，该镜离辐射源4米，入射角 45° ，表面温度达 600°C （镜胚为SiC）最大功率密度 $84\text{瓦}/\text{厘米}^2$ ，尤其是由于镜面上辐照的不均匀，不仅使镜胚产生很大变形，材料选择不当还将引起镜面不规则的热畸变。这样，不仅影响成象质量，也容易使镜胚或镀层产生龟裂。因此，镜胚应选取 $\frac{\alpha}{K}$ 较小的材料为宜。 α ：线膨胀系数， K ：热导率（ $\frac{K}{\alpha}$ 称为材料热畸变品质因数）

② 要求具有良好的抛光性能，使表面rms粗糙度尽可能小。

这是为减小杂散光所要求的。

光在镜面上产生的散射光的强弱取决于入射角的大小，入射角愈大，表面微弱不平对光的散射就愈严重；另外，还取决于光子能量的大小，光子能量愈高，即波长愈短的光引起的散射也愈严重。若按瑞利散射，散射光强比例于波长 λ^{-4} ；若按随机不规则性的衍射来考虑，则散射光强比例于波长 λ^{-2} 。由于同步辐射主要是真空紫外和软x线区的光辐射，波长极短，大多数情况下镜面又处于掠入射工作状态，入射角极大，因此，光的散射十分严重。如在SPEAR同步辐射装置，用了一块镀铂铜镜，表面rms粗糙度为 186\AA ，这在普通光学仪器中已经是很好的抛光表面了，但对同步辐射却产生严重的杂光。在 300eV 处，杂光强度可达10%，以后改用一块新的铜镜，rms粗糙度为 30\AA ，在 280eV 处杂光强度降至1.6%，性能明显改善。所以，减小杂光的重要措施是要选择抛光性能好的材料，并在加工镜胚时精心制作，使rms粗糙度尽可能小。

③ 要求能提供足够大小的镜胚，并易于磨制成所需的面型。

从安全考虑并为了使各实验站之间有足够的空间，一般实验站都离开辐射源相当远，即使第一面分光镜离开发光点也都有几米，加上入射角又大，故镜胚尺寸需要相当大，同时，为了减少整个光束线中反射面的数量，又能保证最后输出光束的像质，一般都要求将反射面具有复杂的面形，如柱面，超环面等。这些要求给某些材料的制备带来了困难。

从上述几个要求出发，目前应用比较成熟的是镀铂铜镜，铜胚为0.99999的纯铜。

下表列出了各种材料的热畸变品质因数^{(6)*}：

表 4

材 料	$K(w/cmK^{\circ})$	$\alpha(10^{-6}/K^{\circ})$	$\frac{K}{\alpha}(10^5 w/cm)$
单晶金刚石	6.0	1.5	40
CVD—SiC	2.0	3.0	6.7
W	1.7	4.6	3.7
Super Invar	0.12	0.36	3.3
Zerodur	0.016	0.05	3.2
Mo	1.14	5.1	2.7
Si	1.0	4.0	2.5
Cu	4.0	16	2.5
Ir	1.6	6.7	2.4
Ag	4.3	19.5	2.2
Au	3.1	14.5	2.1
Os	0.86	4.8	1.8
Be	2.1	12.7	1.7
Cr	0.9	7.0	1.3
Al	2.4	24.0	1.0
α -SiO ₂	0.014	0.55	0.25
Ti NO. 1173	0.0029	15	0.019

*此节内引用资料均可见此文

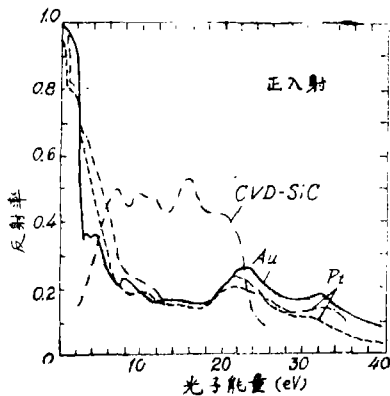


图 4

CVD-SiC还有一些其它不可忽略的优点,如化学稳定性好,可耐各种酸类(包括HF)又耐高温,反射镜不需冷却等。

CVD-SiC最大的弱点是制造大尺寸镜胚有困难,晶体SiC是通过加热石英和石墨使石英分解的Si蒸气和石墨蒸气结合而成。这种方法不可能制成大尺寸。多晶SiC也已有多种制造方法,但最大的材料对于制造反射镜来说仍是太小了, SiC陶瓷在烧制前可以加工,烧制中有1%的变形,大尺寸可以做到但不能做到高质量的抛光表面。文献(6)介绍的办法是用SiC陶瓷作基体,上面用化学沉淀法涂上一层3毫米厚的SiC层,这就是所谓CVD-SiC,

从上表可知,由于CVD-SiC具有中等热膨胀系数及足够好的热导率,故热畸变品质因数是首屈一指的。

CVD-SiC的可抛光性亦是非常突出的,美国的一个实验室测定了40多块CVD-SiC镜,其rms粗糙度在 $16 \geq \delta \geq 3 \text{ \AA}$ 范围内,他们指出,按现有水平3吋见方的镜胚能做到 $\delta \leq 8 \text{ \AA}$,这比铜镜的 $\delta \approx 30 \sim 40 \text{ \AA}$ 能提高5倍左右。杂光测定的结果说明,其杂光比石英镀金属镜小10—20倍,比镀铂铜镜几乎能小100倍⁽⁴⁾。

CVD-SiC在 $500 \text{ \AA} - 1000 \text{ \AA}$ 范围的正入射反射率高于其它一切材料(见图4)对于高能光子采用掠入射时SiC仍具有较高的反射率。(见图5)

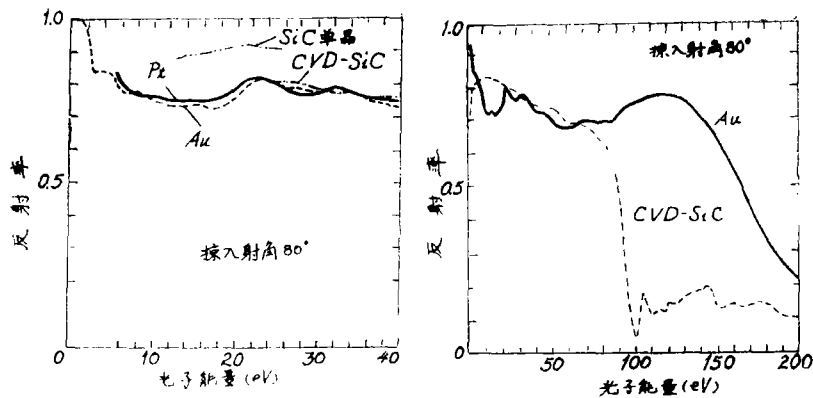


图5

尺寸可做得相当大，文献（7）介绍的方法是将镜胚放在一个密闭的容器内，基体有一定温度，容器有一定气压，使 H_2 和 CH_3SiCl_3 发生化学反应，并使SiC沉积于基体表面上。在英国SRS所用的反射镜多数已采用SiC，尺寸最大的已有一、二百毫米见方，可见近几年已在这方面有相当大的进展。

第一块分光镜后面的所有反射镜采用陶瓷玻璃是最有效的，其低膨胀系数使其面型准确，表面光洁度亦高、但也有不少是采用熔石英做镜胚的。

2. 镜面镀层

镀层的选择应满足以下条件：

- ① 能牢固地粘附于基体上，耐高温不脱落，并容易重复制备；
- ② 对所要求的光谱段有尽可能高的反射率；
- ③ 能适应于超高真空的环境；
- ④ 对污染和氧化不敏感。

其中最基本的要求是第二条，为此，下面对不同材料的反射特性作一简略介绍。

一个忽略了表面粗糙度的表面的正入射反射率，可按费涅耳公式计算。

$$R = |\tilde{r}|^2 = \left| \frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1} \right|^2 = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2}$$

其中 \tilde{r} 是复数的反射系数， \tilde{n} 是复数的折射率。

由上述公式可知，当 $n \rightarrow 1$ 时，反射率变得非常小。

下图列出了C、Al、Au的正入射反射率的计算结果及实测结果⁽⁴⁾。

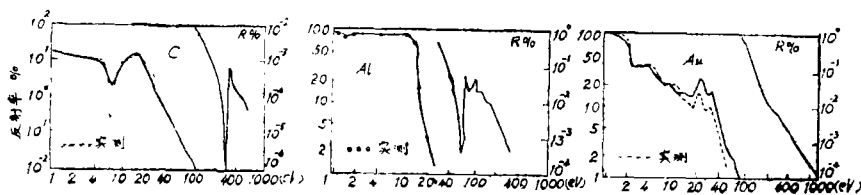


图6

由图可见，在30eV—40eV(300—400 Å)反射率有明显下降，这是正入射仪器不能在软X线区域采用的根本原因。

当入射角增加时，根据费涅耳定律，其反射率将明显增大。

下图是Pt, Au在不同入射角对各种光子能量的反射率，(是应用同步辐射S偏振——光的E向量垂直于入射平面——测得的结果。)

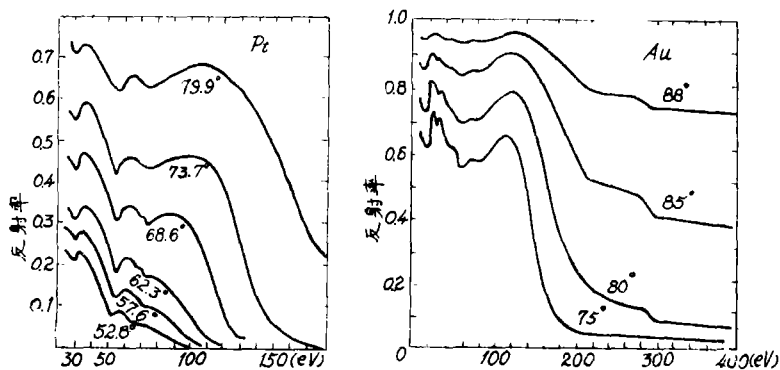


图7

由此可见。

① 随着入射角增加反射率将明显增大。

② 反射光的截止波长将随不同入射角发生变化，人们已利用这一点用于消除高级次重叠(详见本文第五节)

由于入射角加大后，在一般情况下像质都将变坏，而且表面粗糙度引起的杂散光也将变得严重，因此，应该在所需波段内保证足够反射率的条件下，尽量减小入射角。

如设工作波段的短波极限波长为 λ_{min} ，与此截止波长相对应的最小入射角为 θ ，则应满足下式：

$$\cos\theta = \lambda_{min} \left(\frac{e^2}{mc^2} \frac{N}{\pi} \right)^{1/2}$$

式中 N 是镀层材料的电子数/单位体积。

由上式可见， λ_{min} 选定后， $N^{1/2}$ 愈大，则要求的 θ 角愈小。

下表列出了各种常用材料的对应值：

表5

材 料	密 度	电子数/厘米 ³	$N^{1/2}$	$\lambda_{min}(\text{Å})$
油	0.77	27×10^{22}	5.2×10^{11}	$641 \cos\theta$
碳	1.90	57×10^{22}	7.5×10^{11}	$447 \cos\theta$
玻 璃	2.60	78×10^{22}	8.8×10^{11}	$379 \cos\theta$
铝	2.70	78×10^{22}	8.8×10^{11}	$379 \cos\theta$
氧化铝	3.90	115×10^{22}	10.7×10^{11}	$312 \cos\theta$
银	10.50	276×10^{22}	16.6×10^{11}	$201 \cos\theta$
金	19.30	466×10^{22}	21.6×10^{11}	$154 \cos\theta$
铂	21.40	514×10^{22}	22.7×10^{11}	$147 \cos\theta$
铱	22.40	542×10^{22}	23.3×10^{11}	$143 \cos\theta$

由此表可见，在真空紫外区，掠入射镜面采用金、铂等高电子密度金属能使入射角尽可能小，或在一定的入射角条件下能反射更短波长的光。

从上表也可看出，当镜面受油污染或受碳氢化合物分解的碳微粒污染后，将使镜面对短波辐射的反射率明显下降。

目前，正入射波段最常用的镀层材料是铝，铝镜可适用到12eV，镀上100Å—250Å厚的MgF₂或LiF层以防氧化，反射率可达90%以上。在10eV—40eV，更好的镀层为金和铂，其最大反射率分别为17%和23%。对金来说，镀层厚度增加到200Å，反射率将达到最大。再增加厚度，金微粒堆积成团，使粗糙度增加，反射率反而下降。在掠入射条件下，Au, Pt, Ir, W都能给出较高的反射率。至150eV，反射率可达70—80%。其中Au和Pt是最常用的材料。

3. 光栅

在真空紫外波段，光栅是通用的色散元件。其中最简单的型式是平面光栅，而最常用的是凹面球面光栅，近代已随着光学工艺及全息术的发展，广泛地应用超环面全息光栅，近二年，在软X线区又发展了透射光栅。

平面光栅要求在平行光条件下工作，对于同步辐射来说，由于有良好的光束准直性，可认为近似于平行光。因此，已有不少单色仪采用平面光栅。但由于同步辐射实际上是一个具有一定尺寸大小的点光源，故除非不顾光能损失增加必要的聚焦镜，平面光栅系统很难达到高分辨率的要求。

球面凹面光栅的优点是它兼顾了色散与聚焦双重特性，因此，既能满足色散的要求，又能保证系统内镜面最少。在正入射条件下，球面凹面光栅能保证相当好的谱线像质，因此，这类光栅在正入射真空紫外单色仪中得到广泛的应用。但随着入射角的增加，尤其是处于掠入射工作条件时，像质明显下降，其中像散和像散慧差两项像差严重地限制了系统的分辨率。

1974年开始采用超环面的镜胚并用全息术制成超环面全息光栅，使光栅的质量提高了一大步，而且由于波长扫描时只要求光栅绕通过其顶点的轴转动，可使单色仪的结构得到简化，因此，目前国外在同步辐射装置中使用的掠入射单色仪几乎大多数都已采用这类光栅。

采用全息光栅有以下一些好处：

- ① 不存在刻划光栅中由于沟槽间隔周期性的不规则造成的鬼线；
- ② 杂光甚低；
- ③ 光栅大小仅受产生干涉花样的光学装置的限制；
- ④ 面型较特殊的光栅也一样便于制造；
- ⑤ 每毫米沟槽数可做得很大；
- ⑥ 可用于消像差。

计算和分析超环面全息光栅各参数及像质的文章很多^(8,9)，这里只指出一点，即光栅的沟槽数和入缝与出缝对光栅的夹角（偏向角）如果已根据波段范围和分辨率的要求确定以后，超环面全息光栅的各项像差将由入缝、出缝及制造光栅用光源点的座标来决定。因此，适当选择上述各参数，能使光栅在一定波段范围内满足消像差的要求。

下图是对沟槽数为950条线/毫米，固定偏向角为146°的I型和IV型超环面全息光栅计算求得的像差曲线。（法国Jobin-Yvon公司生产的全息光栅分I、II、III、IV型四种，I型与刻划光栅相当，II型能消部分像差，III、IV型能较完善的消像差）

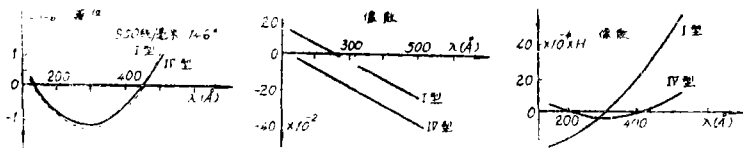


图 8

由图可见，I型全息光栅不能消慧差和像散，而IV型全息光栅可选择在某个波长处使慧差为零，并能保证二个波长消像散，如此，可使某个要求的波长达到最高的分辨率，同时使整个波段的谱线质量提高。

Jobin-Yvon公司推荐了一组IV型超环面全息光栅，标出了使用波段，入缝和出缝至光栅的距离 l_A 、 l_B ，及各项参数，有一定参考价值。

表 6

参考号	光谱范围 (Å)	刻线数 线/毫米	入缝距		固定偏向角 (D°)	分辨率 (Å)	光栅尺寸 (毫米 ²)
			l_A (毫米)	l_B (毫米)			
1	125—525	950	100	1170	146°	0.3 0.24	20 × 100
2	125—300	2400	900	1690	150°	0.04	10 × 100
3	50—105	3000	2200	3570	160°	0.03	24 × 164
4	60—210	800	1850	2450	164°	0.1	30 × 100
5	50—90	1800	1700	3220	166°	0.03	24 × 165
6	14—21	2000	1850	5900	174°	0.007	6 × 250
7	10—24	800	1850	3090	175°	0.07 0.035	30 × 105 125 × 250

光栅效率是指：当入射的光为单色光时，在一固定的投射角条件下，衍射光束的强度与入射光强之比。

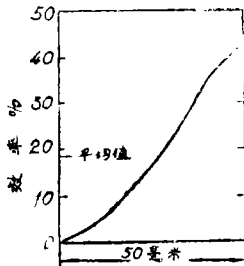


图 9 光栅600条线/毫米，镀Al+MgF₂，闪耀角4°45'，入射角0°。时在1608Å处二级效率图（光栅曲率半径1米）

美国海军实验室对凹面刻划光栅和全息光栅作了大量测试工作⁽¹⁰⁾，有如下结论：

① 用小光束照射光栅，可测得光栅不同部位的效率，由于凹面光栅的闪耀角在发生变化，故光栅不同部位的效率不是常数。图9是一个典型的例子，该刻划光栅曲率半径1米，600条线/毫米，表面镀Al+MgF₂，4°45'闪耀角，入射角0°。

② 全息光栅采用正弦形的沟槽，其表面具有非常均匀的效率分布，效率随波长的变化也不大，其杂光用不相干光源照明时与刻划光栅是相当的，但如用相干光源照明时，则要优于刻划光栅。

③ 刻划光栅在闪耀波长位置效率最高，其它级次又弱得

多，故级次分离比较容易，但由于不同部位效率不均匀，相当于整个表面未被充分利用，故分辨率受到影响，全息光栅不同级次强度接近，故级次分离比较困难。（国外已有研究全息闪耀光栅的，这类光栅具有在某个波长闪耀的特性，它兼有刻划光栅和全息光栅双重优点，但工艺上比较困难，至今尚未被普遍采用）。

④ 整个光栅面的平均效率是波长的函数。实测结果表明，在短波，全息光栅一般较刻划光栅为高，300 Å 正入射时达0.7%，（刻划光栅约0.1%）到大约700 Å 时两者大致相同，更长的波长则刻划光栅要好一些。

⑤ 用于掠入射时，两种光栅的效率都明显提高，如其中一块刻划光栅在192 Å 处，一级平均效率约18%，最大值可达24%，二级约小十倍。

透射光栅是近几年发展起来的又一种适用于软X线区的色散元件^(11, 12)。它是在一个厚度为几千埃的薄膜上用全息术复盖一排矩形截面的线条组成的。平行光通过线条间空隙，衍射后形成光谱。

采用透射光栅有如下好处：

- ① 在基体薄膜透过的波段内具有高效率，一般可达10%甚至可高达50%；
- ② 由于效率高，对碳微粒污染就不敏感；
- ③ 比高质量的反射型凹面光栅成本低得多。

透射光栅的性能主要取决于薄膜上不透明线条的材料，线条厚度，线条截面形式（矩形或正弦形、锯齿形等），线条间隔距及线条宽与线隔距的比值。通过合理的选择上述各参数，能使透射光栅在软X线区（波长小于200 Å）具有比反射光栅优越得多的性能，如文献（11）中指出，若单色仪由双透射光栅组成，线隔距为5000 Å，在12 Å 处，分辨率达0.012 Å，较SSRL现有的单色仪能高17倍，而且高级次仅占1.2%，也远远好于其它仪器，假设透射光栅支撑薄膜的网拦去40%光通量，光栅效率取10%，并设系统内反射镜的损失为20%，则整个系统的通光能力为0.58%，这比“Grasshopper”型单色仪的最大通光能力0.15%要好得多。

透射光栅一个突出的问题是不能经受强辐射，如常用的~1000条线/毫米，薄膜2000 Å 厚，支撑结构拦光40%的透射光栅只允许表面辐照不超过0.5瓦/厘米²，这就限制了它的使用，而且用透射光栅制成的仪器结构比较庞大，（如SSRL提出的一台适用于（250—10 Å）范围的单色仪，长度达11呎）这亦带来了不少困难。

四、同步辐射装置中几种常用的单色仪

1. 对单色仪的要求

由于同步辐射与普通光源相比较有许多特殊的特性，因此，在单色仪设计时将受到许多限制，下面将列出这些限制，并指出在单色仪设计中要考虑的问题。

表 7

序号	限制	涉及的问题
1	光源是固定不动的, 在许多情况下实验站也如此	要求入射光束和出射光束之间偏向角保持不变在掠入射情况下, 往往需要复杂的机构运动。
2	同步辐射在轨道平面是高度偏振的	垂直面内反射和色散是更愿意被采用的。
3	同步辐射光束在宽度方向大于高度 (典型的大 5—10 倍)	对于没有入缝的单色仪, 垂直色散能提供更高的分辨率。
4	高能装置具有大量硬 x 线	光束线的第一个光学元件能被辐射损坏, 表面易产生碳氢化合物污染, 故应易于更换。
5	在高能装置存在辐射危险	必须进行遥控, 并采用长光学管道使实验站与辐射源有足够远间距。
6	同步辐射的高度准直性给出近似的平行光	使单色仪不用入缝有了可能, 有人缝的系统, 必须在入缝前加聚焦镜。
7	储存环由于不同时间不同的注入情况光强会有明显变化	为了补偿, 适当的强度监测是必要的。
8	光束垂直位置会有所变化	有人缝系统, 加大前置镜可减小其影响。
9	储存环要求超高真空	不允许真空环境中有小电机和润滑油, 扫描机构变得复杂了。
10	有时要求一个光束管道适用于多种装置	要求仪器可整体移开或至少部分能移开。

以上所列限制在设计光束线及单色仪时都是应该注意到的, 而对单色仪的最主要的要求可归纳为以下几点:

- ① 入射光束方向和出射光束方向不能变;
- ② 光学元件应尽量少, 保证系统效率尽可能高;
- ③ 扫描机构的运动应尽量简单;
- ④ 尽可能消除高级次重叠;
- ⑤ 满足不同实验项目对输出光的波段范围, 分辨率, 光通量, 光斑尺寸, 偏振度等方面的要求。

在同步辐射装置中采用的单色仪一般可分为两大类, 一类称为正入射真空紫外单色仪 ($\approx 300\text{\AA} - 2000\text{\AA}$) 另一类称为掠入射真空紫外单色仪 ($44\text{\AA} - 300\text{\AA}$)。下面将分别介绍这二类常用的单色仪。

2. 正入射真空紫外单色仪⁽¹³⁾

常用的正入射单色仪有三种类型: Wadsworth改进型, Mcpherson型, Seya-Namioka型。

① Wadsworth 改进型

这类仪器第一次应用于1967年,利用同步辐射的准直性,故仪器没有入缝,由于光学元件少,光能损失少,要求输出高光通量时比较适用。

由于离焦和光源有一定大小,分辨率受到限制,其中主要的影响是光源在色散平面内的尺寸^[14]。如用 DESY/DORIS 源,光栅曲率半径为2米,2400条线/毫米,分辨率只能达到1—2Å。

采用垂直色散时,光束偏振度高,分辨率也优于水平色散。

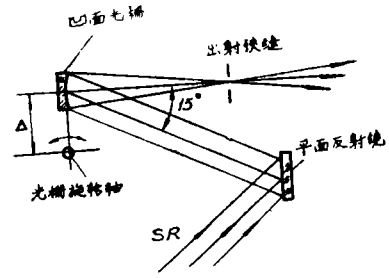


图10

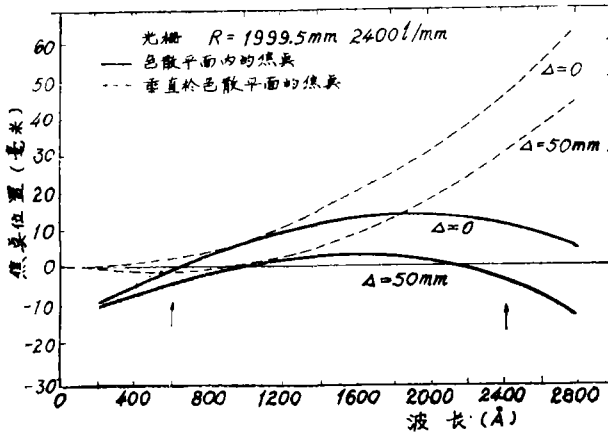


图11

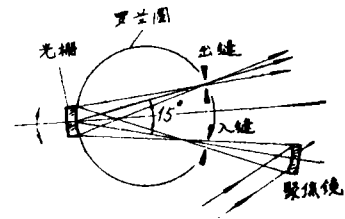


图12

波长扫描时为减小离焦,使光栅绕偏心轴旋转,选取合理的偏心距 Δ 可使离焦量为最小。

② Mcpherson 型

有入射狭缝,故分辨率优于上述方案。

波长扫描时,光栅除转动外并沿狭缝对光栅夹角的平分线移动。

由于这类仪器入射角小,谱线像质好,故分辨率较高。

常用的三米Mcpherson单色仪性能指标如下:波段范围3000—300Å,分辨率0.03Å (10μm狭缝宽) 光栅面积82.5×60毫米²,闪耀波长处光强(200mA环流时) (0.7—2)×10⁷光子/秒(10μm狭缝)。

这类仪器的缺点是短波反射效率低,传动机构比较复杂

③ Seya-Namioka 型

这类仪器在波长扫描时只要求光栅绕其顶点的轴作转动,结构最简单,因此较适用于超高真空,在同步辐射装置中被广泛采用。

由于入射角较大,像散较大,而且受结构限制光栅曲率半径不可能做得过大,因此,这类仪器只能做到中等分辨率,如典型的单色仪 $R = 1$ 米,1200条线/毫米,狭缝20μm时分辨率为0.18Å。

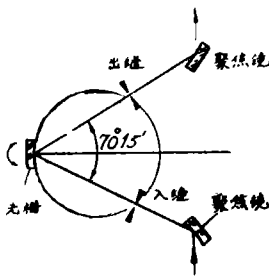


图13

3. 掠入射单色仪:

当工作波长小于 300\AA 后, 因正入射反射率过低, 必须采用掠入射单色仪, 常用的方案亦有三种型式: 平面光栅型, 凹面光栅型和超环面光栅型。

① 平面光栅型

与正入射单色仪类似, 利用同步辐射的准直性, 这类仪器也没有入缝, 并取大的通光口径。因此, 光通量大, 加上光栅扫描机构简单, 出射光束方向恒定, 在同步辐射中应用广泛。

图示单色仪由一块平面光栅和二块(或一块)聚焦反射镜FM组成, 反射镜能将单色辐射聚焦在出射狭缝上。有四种(或二种)聚焦条件把工作波段分成四段: $36-75\text{\AA}$, $58-130\text{\AA}$, $96-270\text{\AA}$, $170-500\text{\AA}$, 通过选择合适的对光栅及反射镜的掠射角, 可在一定波段范围内抑制高级次的重叠。分辨率能做到 $0.1-0.2\text{\AA}$, 这类仪器已应用于Daresbury同步辐射装置。

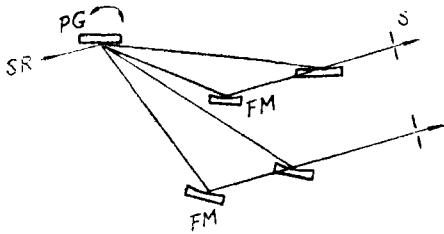


图14

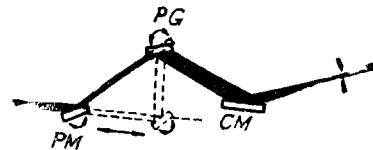


图15

图示另一种平面光栅掠入射单色仪已用于DESY, 平面光栅前加一平面镜可使光栅不直接对着同步辐射源, 对保护光栅有好处, 但波长扫描时平面反射镜将沿SR光束线方向移动, 同时与光栅一起作转动, 运动比较复杂, 由于系统内有三个光学元件, 抑制高级次重叠的能力加强。

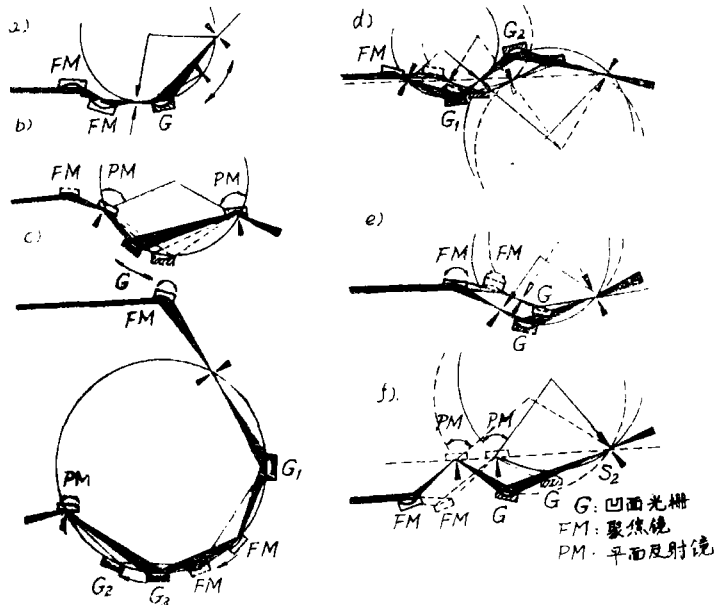


图16

以后DESY又改进了上述结构,将移动加转动的一块平面镜改成可移动的六块反射镜,分别安置在六个不同的位置上,工作时使它们依次准确地进入光路,这就简化了结构。这种仪器被称为FLIPPER单色仪^[15]。波段范围20eV—300eV,分辨率 $E/\Delta E = 1500-5000$ 之间变化。

② 凹面光栅型(或称罗兰型)

这类仪器的狭缝和光栅均严格的安置在罗兰圆上,具有较高的分辨率但结构复杂,一般有下列六种形式:

上图(a)(e)两种形式其出射光束方向随波长而变化,用户安置的试验装置亦要随之运动,很不方便,故一般情况下不宜采用;(Mcpherson247型就属(a)型)(b)型虽然克服了上述缺点,但当光栅处在长波位置时,掠入射角偏大,除引起较大的像差外,结构安排困难;(c)型因采用了双光栅其分辨率高,杂光小,级次选择能力好,但反射率低,机械结构复杂;(d)型有一个中间狭缝,并有刻线数相同的两块光栅,波长扫描时可保证出射光束方向不变,但结构过于复杂;(f)型是目前较为先进,应用较普遍的一种凹面光栅单色仪,称为“Grasshopper”型,波长扫描时,反射镜FM、PM平行于同步辐射源作移动,平面镜PM转动,光栅沿出射光束方向移动,如此,相当于罗兰圆绕出射狭缝转动,出射光束方向始终保持不变,并能获得较高的分辨率。如在SSRL的一台半径为1米的单色仪,掠射角 2° ,分辨率为 0.15 \AA ,工作波长可做到 20 \AA 附近。

③ 超环面光栅型(亦称非罗兰型)

超环面光栅单色仪的特点是采用了超环面形基底的光栅,能有效地校正象散,提高了仪器的通光效率,而且波长扫描时光栅只作简单旋转,机构简单,适用于超高真空,因此,近年来,在新建的同步辐射装置中所用的掠入射单色仪几乎绝大多数都用这种方案。

这类仪器的结构方案大致都相似,如下图所示

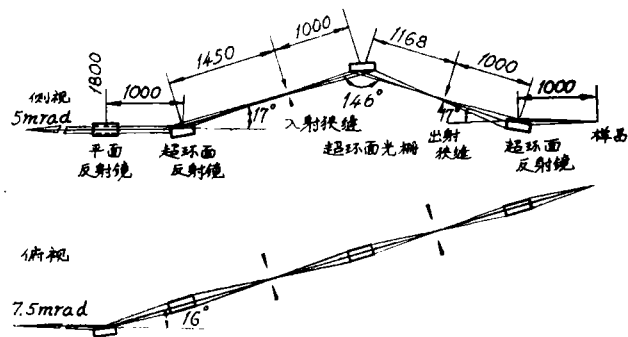


图17

前置超环面反射镜将同步辐射发光点成象于入缝处,根据入缝处要求的光斑大小及位置可确定前置镜的聚焦比及相应的参数。后置镜是将出缝成象于实验站样品处,其参数可根据实验站对光斑大小的要求按上述类似原则确定。至于超环面光栅的参数则需根据波段范围、分辨率等指标确定。

在ACO,用了四台超环面光栅单色仪,其中一台^[16]可更换三块光栅,波段范围100—2000 \AA ,入射臂长1000毫米,出射臂长1168毫米,光束夹角 146° ,用950条线/毫米光栅时在171 \AA 及304 \AA 分辨率接近 0.25 \AA 。

如果超环面加工、检测及超环面全息光栅的制造工艺都已经解决,那么这是目前最有希望的一个技术途径。

下表列出了各类单色仪在十二个同步辐射装置中已被采用或准备采用的情况⁽¹⁾;

表 8

同步辐射装置	单色仪种类	掠入射罗兰型	Grasshopper	Seya	正入射罗兰型	Wadsworth	超环面光栅型	平面光栅型
ACO (法)		1			2		4	
ALADDIN (美)			4	3	4	1	4	
BESSY (西德)				1	2	4	3	1
Bonn (西德)		3		4	3			1
Daresbury (英)				1	4		2	2
Electrotech (日本)		1	1					1
HASYLAB (西德)		3		1	3		1	2
INS-SOR (日本)		2		1				1
NSLS (美)				2	5	1	6	4
PhotonFactory (日本)		1	1	1	1		1	
SSRL (美)			2		1			
SURF-II (美)		2			1		3	
总 计		13	8	14	26	6	24	12

由此可见,超环面光栅型,Mcpherson型及Seya-Namioka型是最常用的几种仪器。

五、光束线的光学总体设计

将整个光束线作为一个整体来考虑，并采取适当的折衷使系统能满足各方面的要求，这就是总体设计需要解决的课题。这里不可能介绍光束线总体设计的全部内容，只能提出一些在总体设计中应考虑的原则。

1. 光束线总体设计的一个重要原则应保证光束通过整个光路后在实验站样品处获得最大的光通量。

设 $N_s(\lambda)$ 为达到样品上的光通量

$$N_s(\lambda) = N(\lambda) \cdot \theta_x \cdot T_B \cdot T_M \left(\frac{\alpha_x}{\varepsilon'_x} \right) \left(\frac{\alpha_y}{\varepsilon'_y} \right)$$

式中 $N(\lambda)$: 同步辐射源单位水平角、单位波段(\AA)内的光通量

θ_x : 光束线水平孔径角

T_B : 光束线透过率

T_M : 单色仪透过率

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: 同步辐射源水平及垂直方向的发射度

$\varepsilon'_x, \varepsilon'_y$: 经光束线后在单色仪前光源的发射度变成光束线的发射度

α_x, α_y : 单色仪水平及垂直方向的接收度

一般情况下 $\left(\frac{\alpha_x}{\varepsilon'_x} \right), \left(\frac{\alpha_y}{\varepsilon'_y} \right)$ 都小于 1

由上式可知，当同步辐射的光强已知，样品处的光强亦已提出要求，就必需合理选择光束线及单色仪的透过率即反射镜面的数量及入射角，并合理选择光束线水平接收角。往往从成象质量出发需要附加必要的镜面，但如果光强的要求十分严格，就只能对像质有所牺牲，或增加面形工艺上的困难选择结构更简单的方案。

2. 总体设计应保证实验站样品处的光斑尺寸及分辨率

当采用无人射狭缝的单色仪时，系统内的反射镜和光栅应统一在一条光路内进行计算，当采用有人射狭缝的系统时，往往需将光路分成三段，光源点至入缝，单色仪部分及出射狭缝至样品室，每一段应分别消像差，并达到要求。

光源是一个垂直方向 0.1—0.5 毫米，水平方向 1—5 毫米的点光源，如采用垂直面作色散平面，前置镜的聚焦比取 3—5 倍为宜，使光能集中在接近 0.1 毫米 × 1 毫米的光斑内投射到入射狭缝上。

单色仪的成象质量必须严格的进行计算。最直接的方法是通过大量的追光线求得出射焦平面的点列图。即取光栅表面不同点的座标 y 、 Z 、求出⁽¹⁸⁾：

$$\Delta Z = r' \frac{\partial F}{\partial y}$$

$$\Delta \lambda = d \frac{\partial F}{\partial Z}$$

r' : 光栅至出射狭缝的距离

d : 光栅常数

F : 光程函数

ΔZ : 像面上像点离开主平面的距离

$\Delta\lambda$: 波长分辨率, 标识谱线像在主平面内分散情况的量

在掠入射 (狭缝对光栅的夹角 $> 150^\circ$) 及超环面光栅的情况下可作一些简化:

① 在入射狭缝高度只有几毫米的情况下, 只需考虑主平面内一个点光源即可, 即忽略入缝高度是允许的;

② $\Delta\lambda$ 只需考虑离焦和像散彗差两项即可, 其误差小于 10%;

③ 同样的近似 ΔZ 只需考虑像散和像散彗差两项, 而实际上只需考虑像散项就已足够。

$$\Delta\lambda \cong \frac{1}{KN} \left[2 \cdot \frac{y}{R} C_{20} + \left(\frac{Z}{R} \right)^2 C_{12} \right]$$

$$\Delta Z \cong \frac{2r'Z}{R} C_{02}$$

$$C_{20} = \frac{1}{2} \left[\frac{\cos^2 \alpha}{r^*} - \cos \alpha + \frac{\cos^2 \beta}{r'^*} - \cos \beta \right]$$

$$C_{12} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin \alpha}{r^*} \left(\frac{1}{r^*} - \frac{\cos \alpha}{\rho^*} \right) + \frac{S - \beta}{r'^*} \left(\frac{1}{r'^*} - \frac{\cos \beta}{\rho^*} \right) \right]$$

$$C_{02} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{r^*} - \frac{\cos \alpha}{\rho^*} + \frac{1}{r'^*} - \frac{\cos \beta}{\rho^*} \right]$$

式中 K : 光谱级次, N 光栅刻线数线/Å,

R 光栅主曲率半径, r, r' 入缝及出缝至光栅距离, ρ 光栅次曲率半径, $\rho^* \times R = \rho$, $r^* R = r, r'^* R = r'$ y, Z 光栅表面点坐标, α, β 对应波长 λ 的入射角和衍射角。

在光栅表面取点多少取决于计算机容量和选用的计算程序, 画出点列图后, 即可求得谱线轮廓并根据半宽较精确的确定单色仪的分辨率。

在总体设计时, 应合理的选择 r', r, ρ 等参数及光栅合理的遮栏, 使谱线质量满足要求。

3. 总体设计应尽量消除高级次重叠的影响。

由于同步辐射的波段很宽, 因此高级次的混合是非常明显的。

消除高级次主要有二个办法。

① 在系统内加金属薄膜滤光片。

某些金属薄膜在一定波段内具有“窗口。”特性, 故在系统内加入这类薄膜制成的滤光片后, 就能起限制高级次的作用, 如采用几千 Å 厚的铝膜, 由于它透过的波段是 170—680 Å, 因此, 如果采用了铝膜制成的滤光片, 在 170—340 Å 范围内将不存在高级次辐射。

下表列出各种透过材料的有用光谱范围:

表 9

材 料	石英玻璃	MgF ₂	LiF	In	Al	Te	Mg	Si	C	碳 氢 化合物 薄 膜	Pr
透过波段范围 (Å)	可见—1650	可见 1150	可见 1050	1120 750	680 170	600 300	600 250	600 120	270 44	270 44	200 110

其中铝膜是最常用的一种滤光片材料，其透过率曲线如右图。

某些材料由于污染或氧化，其透过特性将有明显变化，为防止变化，可在表面镀上一层 50\AA 厚的碳膜，证明是有效的。

② 选择适当的掠入射角，使短波被截止，从而在一定波段范围内抑制高级次。

1968年Fujiwara⁽¹⁸⁾提出自由光谱区的概念，以后K.P.Miyake⁽¹⁹⁾等又发展了其理论，并用于单色仪的设计中，为以后深入考虑高级次的抑制问题打开了思路。

自由光谱区是这样一个波段，在这个波段内无二次以上高级次光谱的重叠。

光束经过一个反射面，如果入射角为 α ，则与此相对应有一个特征波长 λ_0 ，高于 λ_0 的光波将被全反射，低于 λ_0 则不能全反射，因此，特征波长具有反射效率明显变化的特点。特征波长值的计算可根据前述第三节“镜面镀层”中介绍的公式进行。显然，由此反射面限制的自由光谱区是 $\lambda_0 \rightarrow 2\lambda_0$ ，因为在 $2\lambda_0 > \lambda > \lambda_0$ 范围内的二级光谱全部都小于 λ_0 不能全反射，以极弱的光强进入光路，故其影响可被忽略。由此可知，适当选择镜面的入射角，可在一定波段内消除高级次的重叠。

光栅自由光谱区的确定是比较麻烦的事，有兴趣者可参阅上述(19)文献。

即使将上述两种方法结合起来，宽波段的高级次重叠问题仍很难全部解决，因此，如果用户对光谱纯度有过于严格的要求，总体设计时就会遇到相当大的困难。

由上述几条原则可以看到，光束线设计的根本出发点是由实验站的实验目的所规定的，只有由实验站提出的光通量，分辨率，光斑尺寸，光谱纯度，偏振度等要求都已经比较明确，而且合理，光束线的光学总体设计才能做出比较满意的结果。

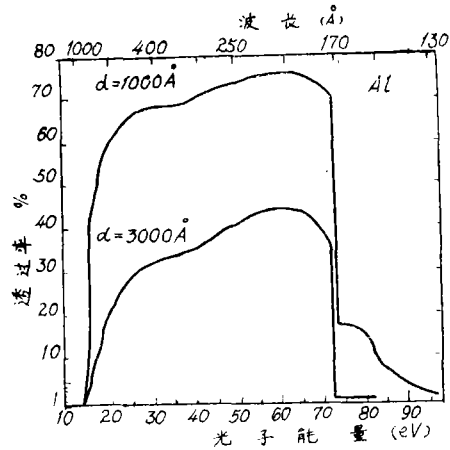


图18

参 考 文 献

- [1] M.R.Howells; Appl.opt. 1980, 19, No.23, 4027.
- [2] B.Buras, G.V.Marr; European Synchrotron Radiation Facility, ESF, 1979. 5.
- [3] 唐九华等; 光学工程, 1979, 2, 59—65.
- [4] C.Kunz; Synchrotron Radiation Techniques and Applications, Springer-Verlag, 1979,
- [5] M.W.Poole and K.R.Lea; Synchrotron Radiation Appendix to The Daresbury Annual Report 1981/1982, SERC, 13—16.
- [6] Victor Rehn; Nuclear Instruments and Methods, 1980, 177, 173—178.
- [7] P.Z.Takacs; Nuclear Instruments and Methods, 1982, 195, 259—266.
- [8] W.R.Mckimney, M.R.Howells; Nuclear Instruments and Methods, 1980, 172, 149—156.
- [9] J.Flamand, et al.; Nuclear Instruments and Methods, 1980, 172, 167—171.
- [10] W.R.Hunter; Nuclear Instruments and Methods, 1980, 172, 259—268.
- [11] R.Tatchyn, I.Lindau; Nuclear Instruments and Methods; 1982, 195, 163—173.
- [12] R.Tatchyn, I.Lindau; Nuclear Instruments and Methods, 1982, 195, 239—243.

- [13] Volker Saile; Nuclear Instruments and Methods, 1978, 152, 59—67.
- [14] M.R.Howells; Nuclear Instruments and Methods, 1982, 195, 215—222.
- [15] W.Eberhardt, K. Kalkoffen, C.Kunz; Nuclear Instruments and Methods, 1978, 152, 81—83.
- [16] W.Gudat, E.Kisker; Nuclear Instruments and Methods, 1982, 195, 233—237.
- [17] D.L.Ederer; Nuclear Instruments and Methods, 1982, 195, 191—206.
- [18] S.Fujiwara, y. Iguchi; J.O.S.A. 1968, 58, 1189.
- [19] K.P.Miyake et al.; Sci. of lighr, 1969, 18, No.1, 39—56.