

全息凹面光栅单色仪*

姜亚光 宋从龙
(江苏师范学院)

提 要

此种单色仪专配焦比约为 $F/3$ 的全息凹面光栅。在机械结构简单的前提下,设计了一种新光路,使其聚焦精度尽可能地提高。设计的基本思想是在濑谷-布岗 (Seya-Namioka)^[1] 和 Johnson^[3] 装置的基础上另选转轴的位置,并选用两个标准波长来校正光谱,这类似于三点统调法。所得结果比濑谷-布岗装置和 Johnson 装置都有改善。按照这种设计装架了 JS-II 型凹面光栅单色仪。仪器可在波长为 $2500 \text{ \AA}$ 至 $10000 \text{ \AA}$ 范围内工作,在 $3500 \text{ \AA}$ 至 $6500 \text{ \AA}$ 范围内,由于聚焦偏离而引起的分辨率损失不超过 $1 \text{ \AA}$ 。

引 言

上半世纪的四面光栅光谱仪器,一般说焦距都较长,装架成各种型式的罗兰装置,例如 Pashen-Runge 装置, Wadsworth 装置或 Eagle 装置。这些装置有的占面积太大,有的机械调节机构较复杂。1952 年濑谷提出一种单色仪装置:两个狭缝固定在一定角度,光栅绕固定轴转动以达到扫描光谱的目的。这个绕以转动的固定轴就选在通过凹面光栅刻划面中心并平行于光栅刻槽。这种装置结构简单,至今采用者甚多。1957 年 Johnson 做了一个真空单色仪,两个狭缝固定并相距很近,光栅所绕以转动的轴设在光栅中心切线上选定的点,转轴方向同样平行于光栅刻槽。这种装置与濑谷装置结构差不多,但其聚焦精度在真空紫外区比濑谷装置提高近八倍。这是因为光栅在 Johnson 装置中扫描光谱时既转动又移动。较为接近罗兰装置。近年来,全息凹面光栅问世,利用全息术,可以把光栅制造得焦比很小,装架成聚光能力很强的小单色仪。这种单色仪并不追求高分辨率,有 $1 \text{ \AA}$ 的精度足可应用,但另一方面却要求仪器结构尽可能地简单,以免杂散光及机械误差^[5,7]。根据这种要求,我们设计了一种类似濑谷与 Johnson 的单色仪,但光栅绕以转动的轴并不束缚于光栅面上或光栅切线上,而是按各个单色仪使用要求在空间选出一个特定的转轴,这个转轴的方向仍与光栅刻线平行。这样计算的精度又比 Johnson 的仪器提高两倍。南京分析仪器厂采用了这种光路,并与苏州市工人业余大学及我院合作试制成两台这种单色仪,调试结果与光学计算很好地符合。应用这种设计思想,可以改进各种同类型凹面光栅小单色仪的精度而不增加仪器的机械结构复杂程度。

* 1978 年 10 月 28 日收到。

光 路 设 计

JS-II 型单色仪的两个固定狭缝 s_1, s_2 相距 8 cm, 这是为了满足配套仪器提出的要求. 要使光栅绕固定轴 c 转动的径迹接近于罗兰圆聚焦条件, 必须选择适当的 c 点. 如果 c

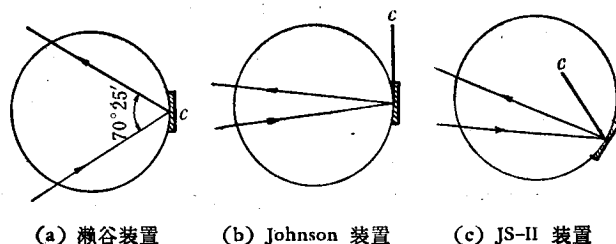


图 1 凹面光栅单色仪的三种装置

点设在光栅刻面中心, 进口、出口狭缝与光栅中心的连线呈 $70^\circ 25'$ 的夹角, 这就是濂谷装置 [如图 1(a)]; 如 c 点设在光栅中心切线的延长线上某选定点, 这就是 Johnson 装置 [如图 1(b)]; 现在我们选取了离越这条切线的 c 点 [如图 1(c)], 全部的问题就在于如何选择 c 点.

在仪器指定使用的光谱范围内选取两个波长 λ_1, λ_2 , 先使 λ_1 符合罗兰圆聚焦条件, 得到光栅的第一个基准位置 G_1 . 再使 λ_2 也符合聚焦条件, 一般地说, λ_2 也必须在同一个罗兰圆上, 但这种装置就变成罗兰装置了. 因此, 在两个狭缝不动的条件下, 能否让光栅 G_2 偏离原来的罗兰圆而 λ_2 正确聚焦? 幸而这样的位置是可以找到的. 根据 Beutler 展开的公式, 符合垂直聚焦的条件由如下方程给出^[1]:

$$\left(\frac{\cos^2 \alpha}{r} - \frac{\cos \alpha}{R} \right) + \left(\frac{\cos^2 \alpha'}{r'} - \frac{\cos \alpha'}{R} \right) = 0, \quad (1)$$

其中 α, α' 分别为入射角、衍射角; r, r' 分别为进口狭缝、出口狭缝到光栅的距离; R 为光栅的曲率半径.

方程 (1) 的一个解 $r = R \cos \alpha; r' = R \cos \alpha'$. 这就是罗兰圆条件. 这是其中一个解, 不是 (1) 式的唯一解, 也就是说 (1) 式还有其他解, 狭缝、光栅三者不共处于一个罗兰圆, 在一定条件下同样能聚焦^[2,6]. 根据这个道理, 我们找出方程 (1) 的另一个解作为 λ_2 的正确聚焦位置, 得到光栅的第二个基准位置 G_2 . 当光栅绕固定轴 c 转动时必须经过 G_1, G_2 两点, 使光栅在 λ_1, λ_2 时聚焦无偏离. 根据光栅方程和初等几何学的关系, 用数值解的办法求得 c 点的位置, 但因其中转换关系较多, 不能归结为一个简单的数学表达式. 应该指出, 光栅在 $G_1 \rightarrow G_2$ 的转移过程中, 相对于入射光线有大约 8mm 的横向偏离. 在一般长焦距的仪器中, 这种偏移还要大, 其结果会损害光栅的实际分辨本领及仪器的光强度. 但是在我们的单色仪中, 光栅刻纹面积大、焦距短、照明光栅的光斑一般总是大于光栅面积, 所以这种损害对我们的仪器来说是在设计容限之内的, 同时却换取了聚焦精度的提高.

用这种光路设计的单色仪举例:

江苏师范学院 II 型单色仪 (JS-II)

光栅规格: 基片直径 70mm, 刻纹面积 $\phi = 64\text{mm}$,曲率半径 $R = 350\text{mm}$, 刻槽密度 1000 l/mm ;波长范围: $2500\text{ \AA}$ 至 $10000\text{ \AA}$;校正波长: $\lambda_1 = 4046.94\text{ \AA}$, $\lambda_2 = 5896.74\text{ \AA}$.

在 $3900\text{ \AA}$ 至 $6200\text{ \AA}$ 由于聚焦不精确而造成的分辨率损失不超过 $0.75\text{ \AA}$.

图 2 表示罗兰装置、濂谷装置以及 JS-II 单色仪的狭缝到光栅平均距离与光栅转角的曲线. 罗兰圆装置聚焦到处是清晰的, 其余装置所描绘的曲线与罗兰圆装置的曲线偏离越大, 误差越大. 图中纵轴 l 表示光栅到狭缝距离的平均值, 横轴 $\sin\theta$ 表示光栅扫描光谱时转角的正弦值. 图中长短虚线表示罗兰装置. JS-II 单色仪用实线表示. 可以看出, 它与罗兰装置的曲线有两个交点, 这就是校正波长 λ_1, λ_2 处, 濂谷装置是绕固定轴转动, 所以 l 不变, 曲线是一条平行于横轴的直线, 用虚线在图中示出. 从图 2 可以看出, JS-II 单色仪的 $l-\sin\theta$ 曲线与罗兰装置相近. 在 λ_1 与 λ_2 之间, l 值与罗兰装置的最大偏离值为 0.26 mm . 远离 λ_1, λ_2 处则误差就很大. 但一块光栅的闪耀区段本身也很短, 只要恰当地选取 λ_1, λ_2 , 在 $3000\text{ \AA}$ 的光谱区间里可以调节出足够使用的分辨率. 顺便比较一下 Johnson 装置在 $l-\sin\theta$ 图中应该呈现为一条斜线^[3], 所以其聚焦精度优于濂谷装置而不及 JS-II 装置.

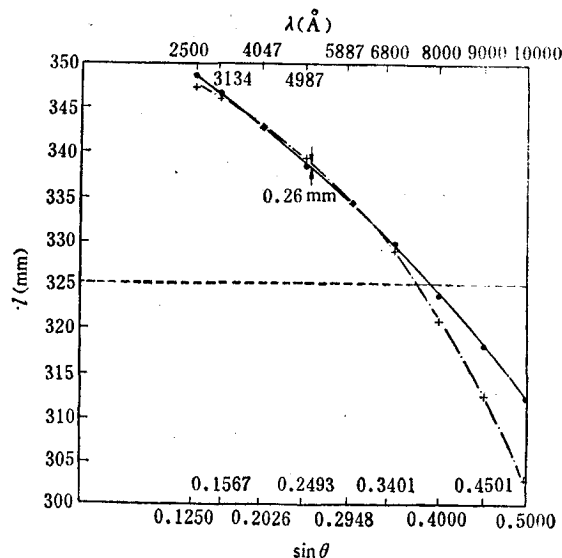


图 2 三种单色仪衍射角与光栅相对狭缝平均距离的关系

机 械 设 计

JS-II 型单色仪的光路设计是除了光栅与两个狭缝以外不加任何其他光学元件的;但是也可以根据使用方便插入一块到两块反光镜以改变狭缝与光栅的相对配置(如图 3 所

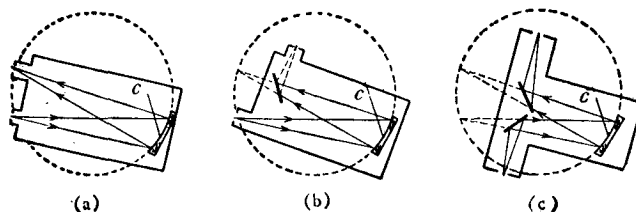


图 3 JS-II 单色仪光路的机械安排

示)。图 3(a) 是目前我们已试制的样机, 它的优点是不加任何反射镜; 图 3(c) 是目前法国 J-V 公司生产的 H-20, H-10 单色仪外形, 其优点是进、出口狭缝在一条直线上, 便于实验时调光路, 但其内部光路仍为濠谷装置。

JS-II 的样机外形照片见图 4, 其中机械设计本文不详述。仅指出该仪器可以用正弦

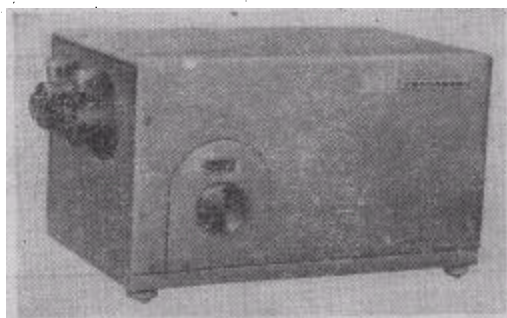


图 4 JS-II 型单色仪外形

机构来显示波长读数。根据光栅方程 $d \sin \alpha = \lambda$ 。波长可用入射角与衍射角的正弦来线性表示, 但现在光栅扫描时转动的角 θ 并不是真正衍射角 α , 故如果用 θ 角的正弦来表示波长会存在误差 (见表 1)。

表 1 各波段示值误差表 (计算值, 单位为 $\text{\AA}$)

刻度标值 (λ)	2500	3133.73	4046.94	4986.80	5896.74	6799.73	8000	9000	10000
波长真值 (λ_0)	2495.31	3132.14	4046.94	4986.75	5896.74	6801.77	8010.66	9024.78	10048.81
误差 ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$)	+4.96	1.59	0	+0.05	0	-2.04	-10.66	-24.78	-48.81

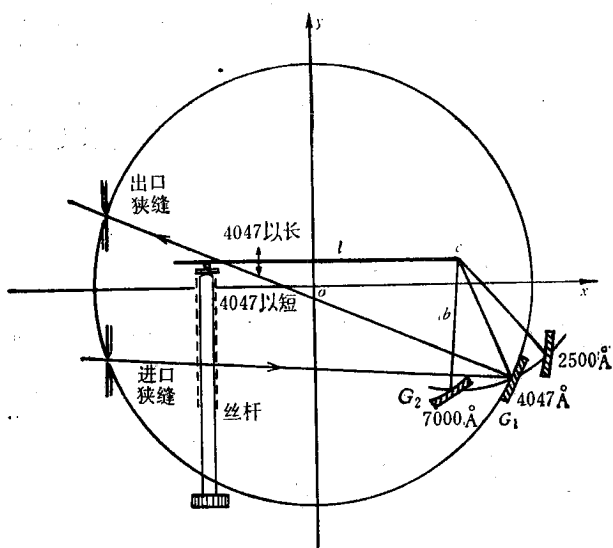


图 5 JS-II 单色仪机械设计示意图

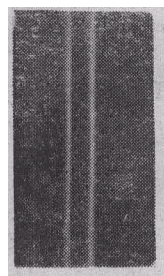


图 6

在 $3400 \text{ \AA} \rightarrow 6300 \text{ \AA}$ 时, 误差小于 $1 \text{ \AA}$;

在 $2500 \text{ \AA} \rightarrow 3400 \text{ \AA}$; $6300 \text{ \AA} \rightarrow 10000 \text{ \AA}$ 可给予误差校正曲线。

为了实现上述光路计算,我们用如下的机械装置来使光栅绕固定轴转动。图5是一张示意图。转轴中心 c 支持一个可转动的弯臂,弯臂一端装一块凹面光栅,另一端由丝杆来驱动,以实现 θ 角的扫描。弯臂两端长度以及弯曲的角度是经过计算的,其目的是使丝杆每给进一个螺距光谱扫描 $100\text{ \AA}$ 。便于仪器显示波长读数。

由于本仪器用双波长校正,在机械设计时必须留以充分的调节容限。

测 试 结 果

1. 分辨率 当狭缝开至 $50\mu\text{m}$ 时钠双线的照片(见图6)。

2. 波长读数误差 经过调试,用Hg, Ag, Li, Ne等光谱线进行多次测量,今把实测数据记录见表2。

表2 各波段示值误差表(实测值,单位为 $\text{\AA}$)

波长真值	波 长 读 数					
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	方均根误差
3280.62 (Ag)	3279.5	3279.5	3280.0	3280.0	3279.5	0.99
3382.98 (Ag)	3382.5	3382.5	3382.5	3382.5	3382.0	0.61
3650.15 (Hg)	3650.5	3650.5	3650.5	3650.5	3651.0	0.45
4047.56 (Hg)	4047.5	4047.5	4046.5	4047.0	4046.5	0.68
4358.33 (Hg)	4359.0	4359.5	4359.0	4359.0	4358.5	0.74
5460.73 (Hg)	5461.5	5461.5	5461.0	5461.5	5461.0	0.62
5769.60 (Hg)	5769.5	5770.0	5769.5	5769.5	5769.0	0.33
5790.66 (Hg)	5790.0	5790.0	5789.5	5790.0	5790.0	0.79
6707.84 (Li)	6707.0	6707.5	6707.5	6707.0	6707.5	0.59
7245.16 (Ne)	7243.0	7243.0	7242.5	7242.0	7243.0	2.50

测量结果证明仪器与设计要求符合良好。

感谢江苏师范学院激光研究室及协作单位同志们的帮助, 特别感谢南开大学沈寿春教授和江苏师范学院周孝谦、凌德洪两位教授对本工作自始至终的关心和指导。

参 考 文 献

- [1] H. G. Beutler, *J. Opt. Soc. Am.*, **35**(1945), 341.
- [2] 波岗武、野田、英行, 光学, **3**(1974), No. 1.
- [3] P. D., Johnson, *Rev. Sci. Instr.*, **28**(1957), 833.
- [4] T., Namioka, *J. Opt. Soc. Am.*, **49**(1959c), 951.
- [5] W. T., Welford, *Progress in Optics*, **IV**(1965), 243.
- [6] 物理系光栅组, “全息凹面光栅象差理论”, 江苏师范学院学报, 第一期(1978).
- [7] 姜亚光、宋从龙, 物理, **8**(1)(1979), 62.

HOLOGRAPHIC CONCAVE GRATING MONOCHROMATOR

JIANG YA-GUANG SONG CONG-LONG

(*Soochow University*)

ABSTRACT

This monochromator is specially designed for the $F/3$ holographic concave grating. Having taken into first consideration the simplicity of mechanical structure, a new kind of optical path has been designed to increase the focussing precision as much as possible. Based on Seya-Namioka Mounting and Johnson Mounting, the new design is characterized by choosing a more suitable position of the rotation axis and selecting two wavelengths for spectrum correction. The method employed is similar to that of the three point ganged tuning. The new mounting is named JS-II Concave Grating Monochromator. So far, the results obtained have proved that the new mounting is an improvement over the Seya-Namioka and Johnson mountings. The monochromator functions within the range of $2500\text{\AA} \rightarrow 10000\text{\AA}$, the loss of resolution due to defocussing being less than $1\text{\AA}$ within the range of $3500\text{\AA} \rightarrow 6500\text{\AA}$.