

# 新型强光单色仪

陈捷光

## 前言

单色仪是一种用途非常广泛的分光仪器。人们对单色仪感兴趣的主要特性是分辨率、色散率和集光本领。使用者希望单色仪能够出射单色性好而强度又高的单色光。目前国内有许多类型的棱镜或光栅单色仪，它们大多数是把色散元件放在平行光束中，这样产生的像差小。利用准直物镜和成像物镜对消像差，可以获得较高的分辨率。为了得到高分辨率，一般光学系统的相对口径都不大，常在1:6~1:10之间。如果再增大相对口径，要给设计和制造上带来一系列的困难。因此，许多仪器的集光本领都不够理想。如果考虑将平面光栅放在非平行光束中，单色器的光学系统除光栅外只要用一块凹面反射镜成像，系统中反射镜面最少，可以减少光束的反射损失，对紫外波段有更明显的好处。系统中光栅通光的面积小于凹面反射镜的面积，即是可以用小面积光栅得到大相对口径，因而容易做成大相对口径的强光单色仪。采用此种光学系统的单色仪具有中等分辨率和高强度的单色光输出，仪器结构简单，制造成本低廉，适用于许多要求强集光、中等分辨率的测量。

曾经有一些作者，如Monk<sup>[1]</sup>，Gillieson<sup>[2]</sup>，Schroeder<sup>[3]</sup>等，介绍了此种系统的某些特性，最近国外采用此种系统做成结构新颖的单色仪<sup>[4]</sup>，为式样繁多的单色仪增加了独特的品种。把平面光栅放在非平行光束中的光学系统，可以有水平排列、垂直排列和同轴排列三种方式<sup>[5]</sup>，本文将介绍采用垂直排列方式研制成的强光单色仪，仪器使用四块平面光栅，光栅刻线密度为2400条/毫米，1200条/毫米，600条/毫米和300条/毫米，波段范围2000埃—3.2微米，入射相对口径1:4.2，出射相对口径1:2.6。

## 一、光学系统的像差计算

仪器光学系统如图1所示，从光源 $P$ 发出的光束经过光源聚光镜 $L_1$ 和场镜 $L_2$ ，成像在入射狭缝 $S_1$ 上，进入狭缝的光束射到平面光栅 $G$ ，然后经球面反射镜 $M$ 成像在出射狭缝 $S_2$ 。光栅放置在发散光束中，而且相对于球面镜是在离轴光路上，系统中光栅和球面镜产生的像

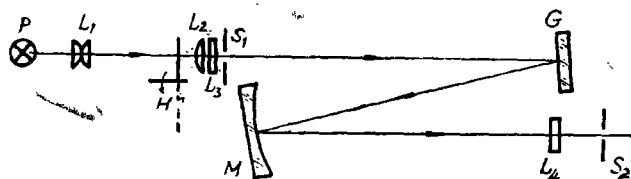


图1. 强光单色仪的光学系统图

$P$ —光源， $L_1$ —光源聚光镜， $L_2$ —场镜， $L_3$ —滤光片， $S_1$ —入射狭缝， $G$ —平面光栅， $M$ —球面反射镜， $L_4$ —校正镜， $S_2$ —出射狭缝， $H$ —调制盘

差主要是彗差和像散,其余像差如球差和场曲,影响都较小。另外,由于光束在光栅主截面内构成一个倾斜角,为了补偿谱线的倾斜,光路中还要加入校正透镜 $L_4$ 进行校正。

所用的平面光栅用发散光束照明,与凹面光栅的照明条件相同,因此可以用凹面光栅的成像公式表示,得出:

$$\begin{cases} \frac{\cos^2\alpha}{r} + \frac{\cos^2\beta}{r_1'} = 0 & (1) \\ \frac{1}{r} + \frac{1}{r_2'} = 0 & (2) \end{cases}$$

其中 $r$ 是入射狭缝至光栅中心的距离, $r_1'$ 是子午焦线至光栅中心的距离, $r_2'$ 是径向焦线至光栅中心的距离, $\alpha$ 和 $\beta$ 分别是光束在光栅上的入射角和衍射角。

如果用径向焦点至子午焦点之间的距离 $A_g$ 表示光栅的像散,从(1)、(2)式得出:

$$\begin{aligned} A_g &= r_2' - r_1' \\ &= r \left( 1 - \frac{\cos^2\beta}{\cos^2\alpha} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

在垂直排列方式的光学系统中,光束在光栅面上的入射角始终等于衍射角,即 $\alpha = \beta$ ,得出 $A_g = 0$ ,表示光栅不产生像散。

光栅另一主要像差是彗差。当 $\alpha = \beta$ ,子午方向的彗差为 $(l^2/r_1') \operatorname{tg} \alpha$ 。在一般情况下,子午彗差与径向彗差之比为1:3,因此,光栅的径向彗差表示为:

$$C_g = 3 (l^2/r_1') \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

其中 $l$ 为光栅的半口径,彗差的尾巴方向远离光栅法线,向着长波一侧,即谱线轮廓在短波一侧清晰,在长波一侧较不清晰。

由于光栅放置在球面反射镜之前,光栅在出射狭缝处形成的径向彗差还与球面反射镜的放大率 $M$ 有关。即:

$$C_g' = 3M (l^2/r_1') \operatorname{tg} \alpha \quad (5)$$

取 $M = 0.5$ ,光栅产生的径向彗差在出射狭缝处被缩小一半。 $M$ 值取小于1较为有利。

光路中采用的球面反射镜是最简单的一种反射式物镜,反射镜离轴使用时的径向彗差 $C_m$ ,可用下式表示:

$$C_m = 3 (1 - M) Y^2 \varphi / 2R. \quad (6)$$

式中 $Y$ 为反射镜的半口径, $R$ 为反射镜的曲率半径, $\varphi$ 为主光束在反射镜上的入射角, $M$ 为反射镜放大率。从式中看出,当 $M > 1$ ,彗差为负值,即彗差尾巴方向向着反射镜的光轴。当 $M < 1$ ,彗差为正值,即彗差尾巴方向离开反射镜的光轴。

反射镜产生的像散 $A_m$ 同样也用径向和子午像之间的距离表示:

$$A_m = 2S_1' S_2' \varphi^2 / R. \quad (7)$$

$S_1'$ 和 $S_2'$ 分别是反射镜的径向和子午像距,对于球面反射镜子午像比径向像更靠近反射镜,为正值。由于子午光束所成的像,其长度方向与狭缝平行,因此一般出射狭缝放在子午光束所成像的位置,这样像散的主要影响是使光强下降。

选取仪器参数:入射狭缝至光栅距离190毫米,光栅至球面反射镜距离135毫米,球面镜曲率半径250毫米, $\varphi = 10^\circ$ ,球面镜口径 $60 \times 60$ 毫米<sup>2</sup>,光栅刻划面积 $40 \times 40$ 毫米<sup>2</sup>。在 $\lambda = 6000$ 埃,由上述公式计算结果: $A_g = 0$ , $A_m = 10.05$ 毫米, $C_g = 0.38$ 毫米, $C_m = 0.01$ 毫米。可以看出,系统中的彗差主要是光栅引起的,像散主要是球面反射镜引起的。在 $\lambda = 6000$ 埃,线

色散率倒数为84埃/毫米,由径向彗差决定的分辨率可达16埃。仪器实际有效的入射相对口径为1:4.2,出射相对口径为1:2.6。

## 二、仪器的机械结构

仪器采用了组合式结构,由下述三部分组成。各部分可以单独使用,也可连接在一起使用。

### (一) 光源室

采用高强辐射的光源,在2000埃—3.2微米波长区域内,有氖灯和卤钨灯两种光源可供选择,光源发出的光束通过光源聚光镜成像在入射狭缝上,灯的位置在箱体外用螺钉进行调节。光源聚光镜采用熔石英透镜,也可用手动进行调焦。

### (二) 调制盘

放置在入射狭缝前,由电动机带动调制盘旋转,使光束调制800周/秒,输出交流信号,当调制盘不旋转时,输出直流信号。

### (三) 单色器

单色器由入射狭缝、平面光栅、球面镜和出射狭缝组成。在入射狭缝前备有JB4, HB13, HB16和HW4四种滤光片,消除由光栅级次重叠产生的杂散光。入射狭缝和出射狭缝宽度可调,最大缝宽6毫米,缝高20毫米,平面光栅有2400条/毫米,1200条/毫米,600条/毫米和300条/毫米四种不同的刻线密度,可以更换。为了实现波长线性读数,光栅扫描采用正弦杠杆机构。光栅和波长传动系统安装在一个上盖内,更换光栅时连同传动系统和上盖一起更换,保证了光栅与传动系统之间的相对位置不变。光栅扫描可用手动也可用电机扫描,波长位置由机械计数器显示。在出射狭缝外套上备有连接螺纹,可供安装光电探测器之用。

波长扫描误差的计算:

由光栅方程式:  $\lambda = 2d \sin \alpha$ , 其中  $\sin \alpha = \frac{h}{L}$   $h$  为丝杆上螺母移动的距离,  $L$  为正弦杠杆长度。因此  $\lambda = 2d \frac{h}{L}$ 。

如果忽略光栅间距  $d$  的变化, 波长误差与  $h$  和  $L$  有关。

由丝杆螺距误差产生的波长误差:

$$d\lambda_1 = \frac{dh}{h} \left| \lambda_2 - \lambda_1 \right|.$$

正弦杠杆长度误差产生的波长误差:

$$d\lambda_2 = \frac{dL}{L} \left| \lambda_2 - \lambda_1 \right|.$$

取正弦杠杆长度为50毫米,在4000—8000埃工作波段,使用1200条/毫米光栅,丝杆的工作长度为12毫米。如果丝杆全程螺距累积误差  $dh = \pm 0.01$  毫米,计算出波长误差  $d\lambda_1 = \pm 3$

埃。如果正弦杠杆长度调正误差  $dL = \pm 0.05$  毫米，产生波长误差  $d\lambda_2 = \pm 4$  埃。因此，总的波长误差  $d\lambda = \sqrt{(d\lambda_1)^2 + (d\lambda_2)^2} = \pm 5$  埃。

单色器中可换光栅的规格见表 1。

表 1

工作波长范围 (埃)	光栅刻线密度 (条/毫米)	闪耀波长 (埃)	线色散率倒数 (埃/毫米)
2000—4000	2400	2500	42
4000—8000	1200	5000	84
8000—16000	600	10000	168
16000—32000	300	20000	336

### 三、主要性能实测结果

仪器的实际性能，在可见光范围内，我们对1200条/毫米光栅，利用45倍读数显微镜观测了汞灯的谱线位置和谱线质量。还利用EMI9659QB光电倍增管，后接LN124A型锁相放大器，PZ8数字电压表和LY<sub>4</sub>数字打印机测量了氦氖激光（波长6328埃）经过单色器后的谱线轮廓，实测结果如下：

1. 波长准确性：± 2 埃
2. 波长重覆性：2 埃
3. 像放大率：0.5倍
4. 在入射狭缝宽度0.02毫米，明显分开汞灯的5770埃和5790埃双线（如图2所示）。

5. 在入射狭缝宽度0.02毫米，出射狭缝宽度0.01毫米，所测氦氖谱线的半宽度为18埃，谱线轮廓形状如图3所示。从图中看出，在长波一侧背景杂光较大，6328+100埃范围以外，背景杂散光才小于0.1%。

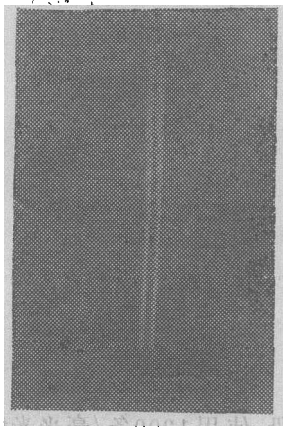


图2 在出缝处，汞灯5770和5790埃的两条谱线像

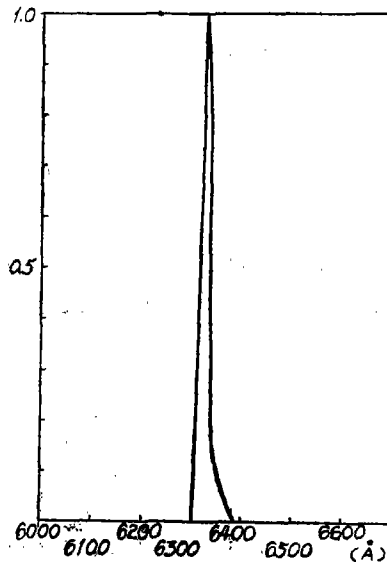


图3 氦氖激光的谱线轮廓

本仪器与美国Baush and Lomb高强度单色仪相比较，他们的出射相对口径为1:3.5，我们的出射相对口径为1:2.6，在相同的光源条件下，光强度是美国仪器的1.8倍。在可见区范围，美国仪器标称的波长准确性为 $\pm 20$ 埃，波长重覆性为 $\pm 5$ 埃。成像质量两者基本相同。

参加本仪器研制工作的还有长春光机所董玉华、廉隅本、杨方珍、周立民、兰戈稚，四平光学仪器厂邵春田、霍玉琨、苏红等同志。

#### 参 考 文 献

- [1]. G. S. Monk, Jour. Opti. Soc. Amer., 1928, 17, 358.
- [2]. A. H. C. P. Gillieson, J. Sci. Inst., 1949, 26, 335.
- [3]. D. J. Schroeder, Jour. Opti. Soc. Amer., 1970, 60, 1022.
- [4]. The Bausch and Lomb High Intensity Monochromator (仪器说明书)