

单色仪的定标

1672年牛顿发现了光的色散现象，而早在我国北宋初年（公元974-1020年），杨亿著的《杨文公谈苑》一书中说：“嘉州峨眉山有菩萨石，人多收之，色莹白如玉，如上饶水晶之类，日射之有五色。”这表示物质的折射率和光的频率有关，而折射率取决于光在真空中的传播速度和物质中的传播速度之比。不同频率的光在同一物质中的传播速度不同，因而棱镜的色散作用是显而易见的。

单色仪是一种常用的分光仪器，利用色散元件把复色光分解为准单色光，能输出一系列独立的、光谱区间足够窄的单色光，可用于各种光谱分析和光谱特性的研究，如测量介质的光谱透射率曲线、光源的光谱能量分布、光电探测器的光谱响应等，应用相当广泛。

【实验目的】

通过单色仪的定标，掌握棱镜单色仪的工作原理和正确使用方法。

【实验仪器】

反射式棱镜单色仪，会聚透镜，汞灯，读数显微镜。

【实验原理】

实验室中常用的棱镜单色仪通常分为两类：一类是透射式单色仪，一类是反射式单色仪。本实验所用的是国产的WDF型瓦兹渥斯反射式单色仪，其外形图如图23.1所示，内部装置图如图23.2所示，主要由以下三部分组成：

1. 入射准直系统

由入射狭缝 S_1 和使入射光束变为平行光束的准直物镜 M_1 组成。

2. 色散系统

主要是分光棱镜 P 使光束色散，这是因为棱镜的材料对不同波长（或频率）的光有不同的折射率 n 所致，即 $n = n(\lambda)$ 。所以各种波长的光透过棱镜后能向不同方向散开，如图23.3所示。复色光 $\lambda(\lambda_1, \lambda_2, \dots)$ ，以入射角 i_1 射入棱镜，单色光 λ_1 以出射角 i_2 射出，不同波长的光的出射角



图 23.1 单色仪外形图

i_2 是不相等的。入射光和出射光之间的夹角称偏向角，如图 23.3 中的 δ 即为单色光 λ_1 与入射光之间的偏向角。

棱镜转动时，偏向角可以发生变化，当转动到某一位置时，偏向角具有最小值，称最小偏向角，用 δ_{\min} 表示。光学理论可以证明，当 $\delta = \delta_{\min}$ 时， $i_1 = i_2$ ，并且还可以证明，对顶角一定的棱镜， $\delta_{\min} = f(n)$ ， n 为棱镜 P 的折射率，前面已经指出了 $n = n(\lambda)$ ，所以， $\delta_{\min} = f(\lambda)$ 。棱镜 P 和平面镜 M 作为一个整体，由单色仪下部的鼓轮手柄操纵。转动鼓轮，就改变棱镜 P 的位置，刻度鼓轮上的读数 T 就表示出棱镜 P 的精确位置。由此可知，对一定棱镜而言， $T \sim \delta_{\min} = f(\lambda)$ 。另外由于反射镜 M 和棱镜 P 一起转动，这就保证了轴向光束始终满足最小偏向角的条件。



图 23.2 单色仪内部俯视图

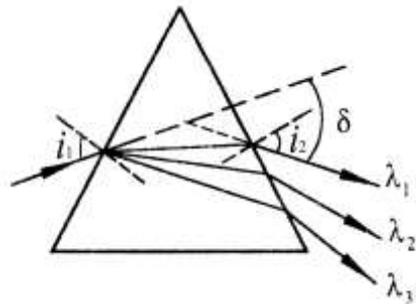


图 23.3 棱镜色散原理图

3. 出射光聚系统

由出射狭缝 S_2 和聚焦物镜 M_2 组成。色散后沿不同方向行进的单色光经物镜 M_2 会聚到出射狭缝 S_2 的平面上形成不同波长的光谱。随着棱镜的转动，在出射狭缝处将得到不同波长的单色光。

图 23.2 所示为瓦兹渥斯单色仪色散装置的俯视图，该装置的作用是使以最小偏向角通过棱镜的光束在未经平面反射镜 M 反射之前和通过棱镜之后的光线只有一个平行的位移，方向不变。这种设计的目的是为了保证不论棱镜处于何种位置，只有对应于最小偏向角的波长的光正好成像在出射狭缝 S_2 上。这样，在入射准直系统位置保持不变的情况下，随着棱镜 P 的转动，对应于最小偏向角的光的波长将跟着改变，出射狭缝 S_2 处将有不同波长的光射出，而棱镜转动的位置与仪器外部转动轴杆的鼓轮读数相对应，因此出射光的波长即与鼓轮读数相对应。这样只要读出鼓轮读数 T ，就可以知道所对应的出射光的波长 λ 。由于单色仪不是直接用波长分度标定，而是采用相应的鼓轮读数来表示，因此使用前必须对该单色仪定标，即利用已知波长的光谱线来定标鼓轮读数，作出鼓轮读数 T 与波长 λ 的关系曲线，该对应曲线称为单色仪的色散曲线或定标曲线。这样，在测量未知光的波长时，用该光作入射光源，只要读出鼓轮读数，就可以在定标曲线中查知入射光的波长值。

单色仪在出厂时，一般都附有色散曲线的数据或图表，但由于长期使用之后，或是经长途运输，重新组装调整后会有偏离(这就是单色仪不便于直接用于波长标定的原因)，就需要重新测定色散曲线进行定标，以对原数据进行修正。

单色仪色散曲线的定标是借助于已知线光谱波长的光源来进行的，为了获得较多的点，必须有一套包含多个已知谱线波长的光源，通常采用汞灯、钠灯、氢灯、氖灯以及用铜、锌、铁做电极的弧光源等。借助于这些光源可以进行光谱范围较为宽广的标定工作。本实验选用汞灯作为已知线光谱光源，在可见光波长范围(400~700 nm)进行定标，可见光波长范围内汞灯主要谱线的波长见表 23.1。观察汞灯的谱线采用的是读数显微镜。实验所用装置如图 23.4 所示。

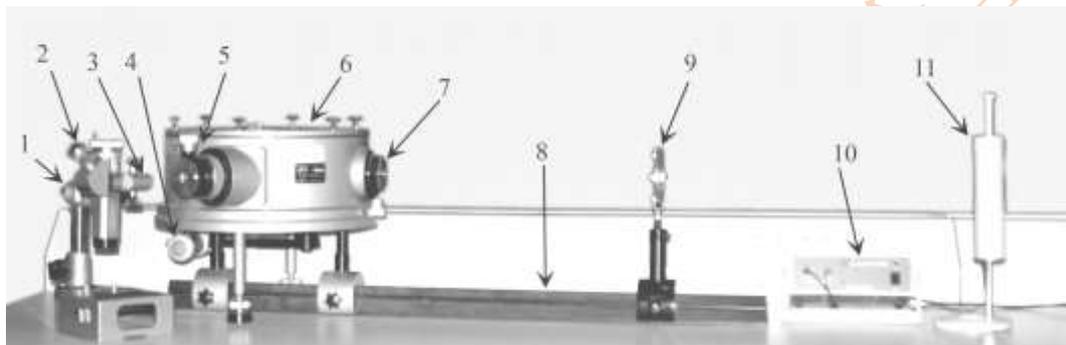


图 23.4 实验装置图

- 1.显微镜 2.目镜 3.物镜 4.鼓轮 5.出射狭缝 6.单色仪 7.入射狭缝 8.导轨
9.汇聚透镜 10.汞灯电源 11.汞灯

单色仪入射狭缝和出射狭缝(如图 23.5 所示)的调节旋钮从上方看，沿顺时针方向旋转打开狭缝，逆时针方向旋转则减小狭缝。实验中当狭缝宽度比较窄时，应在通过显微镜看清谱线的情况下调节狭缝宽度，切忌将狭缝全部关闭。

调节棱镜的鼓轮上的刻度是一个镜像，与平常刻度尺上左小右大相反，是左大右小，其最大值为 25mm，通过反射镜可看到与平常习惯一致的刻度尺。如图 23.6 所示



图 23.5 出射狭缝

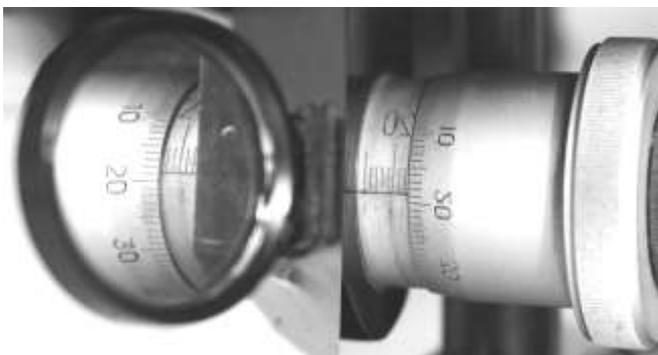


图 23.6 鼓轮

【实验内容】

1. 光源的调整

将汞灯放在入射狭缝 S_1 前一定距离，并把 S_1 和 S_2 适当放宽（缝宽约 0.3 mm），用眼睛在出射狭缝 S_2 处向单色仪内观察，同时缓慢地转动鼓轮，当视场中出现单色的光源像时，再调节光源的高低和左右位置，使光源像处在视场中央。这就保证光源和入射狭缝 S_1 、准直物镜 M_1 共轴。然后，在光源和 S_1 之间放置会聚透镜，使光源成像在 S_1 上。

2. 调节狭缝宽度

(1) 用眼睛在出射狭缝 S_2 处向单色仪内观察，转动鼓轮直至看到黄光。如图 23.7(a) 所示。

(2) 置读数显微镜于出射狭缝 S_2 处，对出射刀口进行调焦，使清晰地看到谱线。如图 23.7(b) 所示。

(3) 将 S_1 缝减小到 $50\mu\text{m}$ （或者黄谱线清晰地分成两条）之后，如图 23.7(c) 所示；将 S_2 缝宽减小到恰好与一条黄谱线等宽；如图 23.7(d) 所示；观察出射的光线光谱，根据谱线的颜色、间距和相对强度辨认谱线。

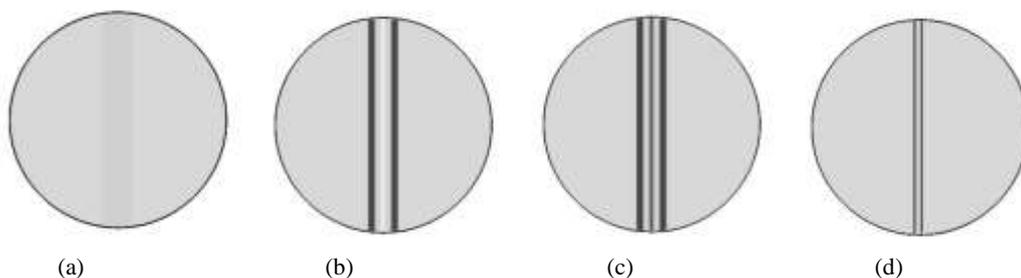


图 23.7

3. 定标

(1) 让鼓轮从 18mm 处位置开始缓慢地顺时针转动（注意：必须向一个方向转动，如从红光区到紫光区，中途不要倒退）。

(2) 当各谱线恰好位于狭缝中心时，记下鼓轮读数 T 与谱线所对应的波长，填入表 23.1 中。重复测量三遍，取 T 的平均值。三遍的测量方向必须一致。

(3) 在直角坐标纸上以 λ 为横坐标，以 \bar{T} 为纵坐标，绘制拟和曲线即得定标曲线。并在图上标出鼓轮转向（如从小到大读数）。

【注意事项】

调节狭缝时，以右手螺旋前进方向将调宽狭缝，倒退时特别注意观察狭缝跟随螺旋逐渐变窄，如宽窄不变应立即停止倒退，并告知指导教师，尤其在狭缝闭合后，不准再行倒退，否则很容易损坏仪器。

表 23.1 汞灯光源可见光区主要谱线的鼓轮读数

波长 λ 鼓轮读数 $T(\text{mm})$	黄 ₁	黄 ₂	绿	蓝绿	紫 ₁	紫 ₂
(nm)	579.1	577.0	546.1	491.6	435.8	404.7
T_1						
T_2						
T_3						
\bar{T}						

【思考题】

- (1) 本实验单色仪为什么要用凹面镜做物镜？改用平面镜行吗？
- (2) 实验时如何判断入射光源已聚焦成像在入射狭缝处？

【附录】

证明 当 $\delta = \delta_{\min}$ 时, $i_1 = i_2$; 对顶角一定的棱镜, $\delta_{\min} = f(n)$ 。

如图 23.8 所示, 由于 $A = r_1 + r_2$, 则

$$\delta = i_1 - r_1 + i_2 - r_2 = i_1 + i_2 - A$$

当 i_1 变化时 i_2 也变, 同时引起 δ 变化。上式对 i_1

求导得 $\frac{d\delta}{di_1} = 1 + \frac{di_2}{di_1}$

要使 $d\delta/di_1 = 0$ 时, 则必须 $di_2/di_1 = -1$, 此时 $\delta = \delta_{\min}$, 由于

$$A = r_1 + r_2 \quad \sin i_1 = n \sin r_1 \quad \sin i_2 = n \sin r_2$$

则

$$\begin{aligned} \frac{di_2}{di_1} &= \frac{di_2}{dr_2} \cdot \frac{dr_2}{dr_1} \cdot \frac{dr_1}{di_1} = \frac{n \cos r_2}{\cos i_2} \cdot (-1) \cdot \frac{\cos i_1}{n \cos r_1} = (-1) \frac{\cos r_2}{\cos r_1} \cdot \frac{\cos i_1}{\cos i_2} \\ &= -\frac{\cos r_2}{\cos r_1} \cdot \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 r_1}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 r_2}} = -\frac{\sqrt{\sec^2 r_1 - n^2 \tan^2 r_1}}{\sqrt{\sec^2 r_2 - n^2 \tan^2 r_2}} \\ &= -\frac{\sqrt{1 + (1 - n^2) \tan^2 r_1}}{\sqrt{1 + (1 - n^2) \tan^2 r_2}} \end{aligned}$$

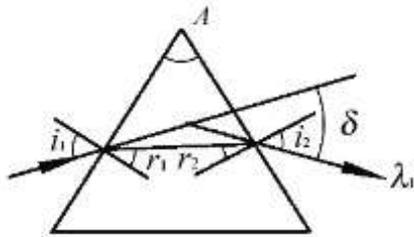


图 23.8

可见, 当 $r_1=r_2$ 时, $d i_2/d i_1=-1$, δ 有最小值。当 $r_1=r_2$ 时, 有 $i_1=i_2$ 。所以, δ 取极小值的条件是 $r_1=r_2$ 或 $i_1=i_2$ 。此时

$$\delta_{\min}=2i_1-A \quad \text{即} \quad i_1 = \frac{\delta_{\min} + A}{2}$$

$$A=2r_1 \quad \text{即} \quad r_1 = \frac{A}{2}$$

由折射定律得

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin r_1} = \frac{\sin \frac{A + \delta_{\min}}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

【应用提示】

单色仪是产生单色光和测量波长, 进行光谱分析的基本仪器。在本实验中所使用的反射式棱镜单色仪其色散器件是棱镜, 目前许多的单色仪使用的是光栅。通过使用不同光栅常数的光栅可以有不同的波长分辨率。

光栅单色仪:

光栅单色仪是把复合光分解为一系列高纯度的单色光的仪器。仪器具有波长范围宽、分辨本领高、波长精度高、扫描速度调节范围大等特点。主要用于物质的定量和定性分析、光源特性、溶液的浓度、光的生放效应和透明物质的光学特性等研究工作。自动化程度高(能自动扫描光谱, 自动滤波光片), 可用于测各种辐射源的光谱分布、探测器的光谱灵敏度、发光材料及光学薄膜的光谱特性等等。它可广泛地用于化学、制药、造纸、建筑、材料、仪器仪表、环境保护、光学真空镀膜等方面。

与棱镜单色仪不同, 光栅单色仪是通过衍射来实现复色光的分解的(在“衍射光栅测

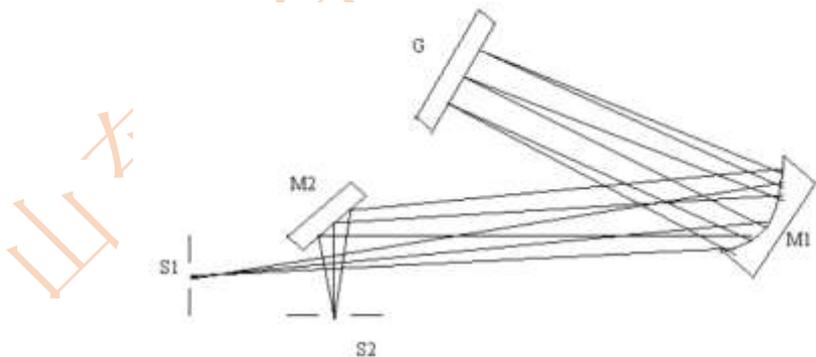


图 23.9

波长”实验中我们看到了衍射产生的色散)。光栅光谱仪是多种多样的, 其主要是由光栅、狭缝、成像系统和感光板(或出射狭缝)等部件组成。光栅单色仪与棱镜单色仪最大的不同主要是在光学系统上。如图 23.9 所示, 这是一种平面光栅单色仪的光学系统。

它的工作原理是光源发出的光均匀的照亮在位于抛物镜的焦平面上的狭缝 S1, 然后

经过凹面镜 M1 的反射到光栅 G 上。由光栅的衍射光再经过 M1、M2 的反射后射出狭缝 S2。相比于棱镜单色仪来说，光栅单色仪由于没有太多折射，光强减少相对较小，出射光强较大。因此光栅单色仪比较容易与其它检测设备配套使用。而且由于光栅相对于棱镜来说体积较小，并且光栅制作技术的不断进步，现在光栅单色仪的应用更加广泛。因此，光栅单色仪的分类也就比较多了。它们的结构大多是保持入射狭缝和出射狭缝不动，仅光栅自身转动来实现谱线的扫描和波长的选择。

现在，众多的光谱仪谱线的观测一般也不再是凭肉眼观察，而是利用光电倍增管、线阵 CCD 等高灵敏光电转换器件，不仅可以观察谱线位置，而且可以精确测量各波长处的光谱强度；其棱镜或光栅的转动也利用步进装置实现自动精确的转动，在计算机的控制下自动实现调节、测量和分析。

光谱：

光谱是复色光经过色散系统（如棱镜、光栅）分光后，被色散开的单色光按波长（或频率）大小而依次排列的图案，全称为光学频谱。根据实验条件的不同，各个辐射波长都具有各自的特征强度。通过光谱的研究，可以得到原子、分子等的能级结构、能级寿命、电子的组态、分子的几何形状、化学键的性质、反应动力学等多方面物质结构的知识，广泛应用于材料、考古、生物科学、食品科学、医疗等领域。

原子光谱：

原子光谱，是由原子中的电子在能量变化时所发射或吸收的一系列波长的光所组成的光谱。原子吸收光源中部分波长的光形成吸收光谱，为暗淡条纹；发射光子时则形成发射光谱，为明亮彩色条纹。两种光谱都不是连续的，且吸收光谱条纹可与发射光谱一一对应。每一种原子的光谱都不同，称为特征光谱。

原子光谱中某一谱线的产生是与原子中电子在某一对特定能级之间的跃迁相联系的。因此，用原子光谱可以研究原子结构。另一方面，由于原子光谱可以了解原子的运动状态，从而可以研究包含原子在内的若干物理过程。原子光谱技术广泛应用于化学、天体物理学、等离子物理学和一些应用技术科学中。

拉曼光谱：

拉曼光谱 (Raman spectra)，是一种散射光谱。拉曼光谱分析法是基于印度科学家 C. V 拉曼 (Raman) 所发现的拉曼散射效应，对与入射光频率不同的散射光谱进行分析以得到分子振动、转动方面信息，并应用于分子结构研究的一种分析方法。

通过对拉曼谱的分析，可以获得：

- 定性的信息：拉曼光谱是物质结构的指纹光谱，拉曼光谱常包含有许多确定的能分辨的拉曼峰，应用拉曼管光谱分析可以区分各种各样的试样。定性分析的一个必须做的工作是根据测得的拉曼谱判定出可能的材料和混合物，限定这些可能物的数量。

- 定量的信息：测得的分析物拉曼峰强度与分析物浓度间有线性比例关系。分析物拉曼峰面积与分析物浓度间的关系曲线是直线。

即：通过拉曼频率的确认可以判断物质的组成，根据拉曼偏振可以确认晶体对称性和取向，



图 23.10 显微拉曼谱仪

根据拉曼峰宽可以判断晶体质量好坏，而根据拉曼峰强度可以确定物质的总量。

拉曼光谱方法具有以下诸多优点：对样品无接触，无损伤；样品无需制备；快速分析，鉴别各种材料的特性与结构；能适合黑色和含水样品；低温及高压条件下测量；光谱成像快速、简便，分辨率高；仪器稳固，体积适中，维护成本低，使用简单等。因此，拉曼光谱在半导体材料、聚合体、碳材料、地质学用、物学 / 宝石鉴定、生命科学、医药、化学、环境、物理、法庭科学、违禁药品检查、区分各种颜料，色素，油漆，纤维等、爆炸物的研究、墨迹研究、子弹残留物和地质碎片研究等等领域有着广泛应用。

山东大学普通物理实验室