光学多道与氢氘同位素光谱

一、引言

光谱学在原子分子物理、天文物理、等离子体物理、激光物理和材料物理等物理学科中 占有极为重要的地位,在计量学、化学、生物学、医学、刑侦学、地质学、冶金学、矿物学、 考古学及许多技术方面也有重要的应用,主要用于材料结构的参数测定、物理性质的诊断以 及物质中元素的定性和定量分析。在光谱学史乃至近代物理学史上,氢光谱的实验和理论研 究都占有特别重要的地位。早在 1885 年瑞士物理学家巴尔末就发现了可见光区氢(H)光 谱谱线波长的规律,即巴尔末公式。这些谱线构成了一个谱线系,即巴尔末系,并用 H_a、 H_β、H_γ、...等字母代表巴尔末系的第一条、第二条、第三条、...谱线。1892 年,美国物理学 家尤雷等发现氢 H 的同位素—氘(D)的光谱。D 的巴尔末系前几条线则用 D_a、D_β、D_γ、... 等字母表示。由于 H 原子和 D 原子的核外都只有一个电子,故光谱极为相似。但是,它们 的原子核质量不同,因而,H_a,D_a; H_β,D_β; H_γ,D_γ; ...等对应谱线的波长都稍有差别。 这种差别被称为"同位素位移"。

本实验利用光学多道分析仪研究 H 的同位素光谱, 了解 H、D 原子谱线特点, 学习光 学多道分析仪的使用方法及基本的光谱学技术。

二、实验原理

在量子化的原子体系中,原子能量状态 *E*₁, *E*₂,.....为一系列分立的值,原子的每一个 能量状态称为原子的一个能级。原子的最低能级称为原子的基态,高于基态的其余各能级称 为原子的激发态。处于高能级的原子,总是会自发跃迁到低能级,并发射出光子。设光子能 量为*ε*,频率为*ν*,高能级为 *E*₂,低能级为 *E*₁,则:

$$\varepsilon = hv = E_2 - E_1, \qquad v = \frac{E_2 - E_1}{h}$$
 (1)

由于原子的能级是分立的,所以原子由高能级向低能级跃迁时,会发射一些特定频率的 光,在分光仪上表现为一条条分立的光谱线,称为"线状光谱"或"原子光谱"。波长λ的倒 数是波数,它的值由巴尔末公式决定。对于 H 原子有:

$$\frac{1}{\lambda_H} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \tag{2}$$

式中R_H为H原子的里德堡常数。

当 n_1 =1, n_2 =2,3,4,……时,所对应的线系为赖曼系,位于紫外光区;当 n_1 =2, n_2 =3,4,5,……时,为巴耳末系,大部分在可见光区; n_1 =3,4,5……等其他线系均在红外光区。

与H类似,其同位素D的巴耳末系的公式为:

$$\frac{1}{\lambda_D} = R_D \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \cdots$$
(3)

式中 R_D为 D 原子的里德堡常数。H 和 D 的巴耳末系对应谱线的波长差为:

$$\Delta \lambda = \lambda_H - \lambda_D = \left(\frac{1}{R_H} - \frac{1}{R_D}\right) \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)^{-1}, \quad n = 3, 4, 5, \cdots$$
(4)

显然,H、D光谱之间的差别在于它们的里德堡常数不同。这是由于二者原子核质量不同引起的。H核是质子,D核由一个质子和一个中子组成。质子的静止质量为1.6726485×10⁻²⁷ kg,中子的静止质量为1.6749543×10⁻²⁷ kg,相差约千分之一。因此可以忽略二者的差别,统一设为质子质量 *m*_p,则二同位素原子的里德堡常数可分别写为:

$$R_{\rm H} = R_{\infty} \frac{m_{\rm p}}{m_{\rm p} + m_{\rm e}} , \qquad R_{\rm D} = R_{\infty} \frac{2m_{\rm p}}{2m_{\rm p} + m_{\rm e}}$$
(5)

式中, R_∞=109737.31cm⁻¹, 表示原子核质量为无穷大时的里德堡常数。

由二同位素原子的里德堡常数之比可得:

$$\frac{1}{R_H} = 2 \left(\frac{m_p + m_e}{2m_p + m_e} \right) \frac{1}{R_D}$$
(6)

因而有:

$$\frac{1}{R_{H}} - \frac{1}{R_{D}} = \frac{m_{e}}{2m_{p} + m_{e}} \frac{1}{R_{D}}$$
(7)

式(7)代入式(4)得到:

$$\Delta \lambda = \frac{m_e}{2m_p + m_e} \left[R_D \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \right]^{-1} = \frac{m_e}{2m_p + m_e} \lambda_D \tag{8}$$

电子的静止质量为 9.109534×10⁻³¹kg,比质子质量的两倍小约 4 个数量级,比忽略的中子质量还要小约 1 个量级,因此,式(8)右侧分母中的电子质量完全可以忽略。由此可得:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_D} \approx \frac{m_e}{2m_p}.$$
(9)

如果能从实验中测出对应谱线的波长λ和波长差 Δλ,即可由公式(9)得出电子和质子的质量比。

三、实验装置

光栅光谱仪主要由光源、光栅色散系统、光电接收系统三部分组成。根据光电接收系统的不同,光栅光谱仪又可以分为光学多道分析仪和单色仪。光学多道分析仪(Optical Multichannel Analyzer)简称 OMA,主要由光栅色散系统、电荷耦合器件(简称 CCD)或光导摄像 管,以及带有专用微处理器组成的数据处理系统三部分组成。OMA 是一种采用多通道方法 检测和显示微弱光谱信号的光电子仪器,具有高灵敏度,高效率,瞬时宽光谱探测范围和时 间分辨等优点。上世纪 90 年代以来,CCD 技术从航天逐渐走向民用,得到了极为迅速的发 展,在光谱学中的应用越来越普遍。

1. 仪器结构

本实验使用的光栅光谱仪 由光栅色散系统、CCD 接收单 元、光电倍增管、电子子信号处 理单元、A/D 采集单元和计算机 组成。

2. 光栅光谱仪

图 1 是平面光栅光谱仪的 光路图。通过入射狭缝 S₁的光 经平面镜 M₁反射后,被凹面镜 M₂反射为平行光投射到光栅 G 上。由于光栅的衍射作用,不同 波长的光被反射到不同的方向 上,再经凹面物镜 M₃反射,成 像在光电倍增管 P 上,还可以 由可旋转的平面镜 M₄反射到 CCD 上。

3. CCD 光电探测器



S1:入射狭缝, P:光电倍增管, M1:平面反射镜, M2:准光镜, M3:物镜, M4:可旋转平面镜, G:平面衍射光栅

图 1 光栅光谱仪光路图

CCD 探测器件是 20 世纪 70 年代 发展起来的新型半导体集成光电器 件,由于 CCD 可以将光学图像转换为 电学"图像",即电荷量与各成像点照 度大致成正比的电荷包空间分布,因 此,它可以"瞬时"记录光信号的空间 分布。CCD 探测器件具有高灵敏度, 低噪声,快速读出,高动态范围和宽光



图 2 CCD 工作原理

谱响应范围等优点,已经成为集光学,电子学,精密机械与计算机技术为一体的综合性技术。 金属氧化物半导体(MOS)是 CCD 的常用的制作材料, CCD 探测器件就是由这类半导体 制作的光电转换二极管作为感光像元,排成面阵列或线阵列形成的固体成像器件。我们在实 验中使用的 CCD 是具有 2048 个像元的线阵列成像器件。光电转换二极管将信号光子转变 为信号电荷,并实现电荷的存储、转移和读出。当二极管受到光照射时,被吸收的光子产生 电子-空穴对,其中的电子被吸引到电荷反型区,形成电荷的存储。将按一定规则变化的电 压脉冲加到 CCD 各像元的电极上,电极下的电荷包就能在半导体表面按一定方向移动,使 电荷发生转移。转移到 CCD 输出端的信号电荷在输出电路上实现电荷一电压(电流)的线 性变换,从而完成电荷的读出。CCD 的上述工作过程是通过驱动电路实现的,而数据输出 通常通过模/数转换交由计算机处理,其工作原理如图 2 所示。

CCD 的灵敏度受光电转换二极管电荷改变量测量极限的限制,并受材料无规则热运动 所致暗电流形成的表面漏电的影响,还受放大器噪声的影响。OMA 的分辨率主要取决于多 色仪,但也受 CCD 像元大小的限制。

4. 光电倍增管

光电倍增管是将微弱光信号转换成电信号的真空电子器件。光电倍增管一般由光电发射 阴极(光阴极)和聚焦电极、电子倍增极及电子收集极(阳极)等组成,其工作原理建立在 外光电效应、二次电子发射和电子光学理论基础上,并结合了高增益、低噪声、高频率响应 和大信号接收区等特征。基于上述结构与原理,光电倍增管能对微弱光信号实现具有极高灵 敏度的探测并具有超快时间响应特性,可以工作在紫外、可见和近红外区的光谱区。典型的 光电倍增管按入射光接收方式可分为端窗式和侧窗式两种类型。图 4 所示为端窗型光电倍 增管的剖面结构图和一般光电倍增管的电原理图。当光照射到光阴极时,光阴极向真空中激 发出光电子。这些光电子按聚焦极电场进入倍增系统,并通过进一步的二次发射得到的倍增 放大。然后把放大后的电子用阳极收集作为信号输出。在光电倍增管的实际使用中,光电倍 增管的的工作电压将显著影响光信号的探测效果。通常是工作电压越大,信号增益越大。但 过大的工作电压容易使信号失真,甚至导致光电极烧毁,这点需要在使用中注意避免。



图 3 端窗型光电倍增管的剖视图(上图)和光电倍增管的电原理图(下图)。

四、实验要求

- 1、根据巴尔末公式计算氢、氘元素 n=3,4,5,6 四条谱线在真空中的理论波长。
- 2、熟悉光栅光谱仪各元件及操作软件的使用方法。
- 3、设计用 CCD 和光电倍增管 (PMT) 测量氢、氘光谱波长及其同位素位移的实验操作步骤。实验室提供氢灯、氘灯、氢氘混合气体灯、氦灯和氖灯。
- 4、分别用 CCD 和光电倍增管测量氢、氘的波长和波长差,并对测量波长进行误差修正得到 氢氘在空气中的准确波长λ。
- 5、根据空气的折射率修正公式得到不同波长的空气折射率 n,并计算氢、氘在真空中的波 长λ₀。则该谱线在真空中的波长 λ₀ 为

$$\lambda_0 = n\lambda \tag{10}$$

其中空气折射率 n 由下式确定:

$$n-1 = \frac{n_g - 1}{1 + at} \cdot \frac{P}{P_0} - \frac{be}{1 + at} \tag{11}$$

式(11)中 $t(\mathbb{C})$ 是室温, P(Torr)是气压, e(Torr)是水蒸汽压力, $a = 1/273 \mathbb{C}^{-1}$, $P_0 = 760 \text{ Torr}$, $b = 5.5 \times 10^{-8} \text{ Torr}^{-1}$, n_g 是标准大气($t = 0^{0}$ C, $P = P_0$, e = 0 Torr)下的群速度 折射率,

$$n_g = 1 + A + \frac{3}{\lambda^2}B + \frac{5}{\lambda^4}C$$
(12)

其中 $A = 2876.04 \times 10^{-7}$, $B = 16.288 \times 10^{-7} \mu m^2$, $C = 0.136 \times 10^{-7} \mu m^4$ 。本实验中只考虑温度、不考虑气压和空气湿度对折射率的影响,

用巴耳末公式:

$$\widetilde{v} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{13}$$

计算氢、氘原子的里德堡常数 R_H ,其中 n 依次为 3, 4, 5, 6,将实验测得的 R_H 取平均。

计算各谱线所对应的光谱项 $\frac{R_H}{n^2}$,以光谱项的负值- $\frac{R_H}{n^2}$ 为纵坐标,以n→∞ 时的光谱 项的值 0 为原点,用横线表示氢原子的能级画出氢的能级图。用带箭头的直线标出 n= 3,4,5,6到 n=2 的能级线间的对应跃迁,并依次标做 H_a 、 H_b 、 H_y 、 H_{δ} ...及相应的谱 线在真空中的波长值。

- 6、记录光谱谱线,分析影响谱线分裂间距的因素。
- 7、计算质子与电子的质量比,并与理论值比较。
- 8、分析 CCD 和 PMT 两种测量方法的误差来源。根据实验结果改进自己的实验方案,以减 少误差,提高测量结果的精确度。

五、实验仪器操作要点

1、光源的使用

本实验所用光源皆为高压气体放电灯,电压大于 2000V. 氢氘灯的使用寿命有限,只 有测量时才能打开电源,测量完毕及时关闭电源,避免氢氘灯长时间工作。多组灯在转 换光源时,应先关闭电源开关,再拔出电极棒并插入所需光源位置后,再打开电源开关。

- 2、光谱仪开机顺序
- (1)检查光电倍增管的高压电源是否为零,若不为零,必需先把电源置于零,然后打开电源总开关。关机时需先将 PMT 电源高压降为零,然后才能关闭总电源。
- (2) 然后打开电脑,将光谱仪左下侧的 CCD 和 PMT 转换开关置于所需位置,然后点击相应的软件,CCD 的控制软件是: WGD-8A-CCD, PMT 的控制软件是: WDG-8A 光电倍增管。等待软件进行检零和初始位置设置并进入数据采集界面。

3、CCD 操作

- (1)本实验采用的 CCD 共有 2048 道,波长采集范围为 22nm。中心波长(1024 道对应的波长)的设置范围为 300~660nm.
- (2) 依次单击"运行"、"<u>实时采集</u>",使计算机进入光谱采集状态。调节中心波长,使之位 于待测谱线附近。

中心波长的调节有两种方法,在未采集数据时,按"检索",然后输入波长值,仪 器会运行到设置波长,通常若当前中心波长与期望波长相差较大时(大于 100nm)采 用此方法。在数据采用过程中,可以按"手动前进"和"手动后退"调整中心波长, 注意:在调节中心波长时,每次只能点击一次手动前进或手动后退,待机械部分完成 操作后,才能进行下一次调节,切忌连续点击。每次调整波长的步长为 1nm~50nm,根 据需要自行选择步长。

(3)仔细调节氢灯光源的位置,确认能否观察到氢谱线。再换上标准灯(氦灯或氖灯),反 复调节 CCD 中心波长的位置,使在同一个摄谱范围内既可观察到待测的氢谱线,也可 观察到至少两条标准灯谱线。基于上述要求,在下面的实验中,测量氢的 n₂=3,4,5 的三谱线的波长

想一想:如果所观察到的光谱线强度不够、线形不好,会对波长测量结果有何影响? 你可以通过调节哪些参数来改变其强度和线形?

- (4)由于机械误差的存在,显示的中心波长并不一定准确,可能有 0~10nm 的误差,在采 集到相应谱线后,需自行判断,如果中心波长与实际波长差别较大,应先对光谱仪进 行波长修正:先点击软件上部的。。。
- (5) CCD 道址的波长定标:由于 CCD 采集的波长范围是变化的,若要测量谱线的波长, 必须确定每个道址对应的波长。通常常用线性定标,定标时,除了待测谱线外,还应 选择至少3条已知谱线(本实验利用氦灯和氖灯为标准光源),其中两条谱线的波长用 于确定线性方程中的未知参数,一条用于检验定标的正确性。注意这四条谱线间的最 大波长差必需小于22nm,只要改变了中心波长就必学重新定标。
- (6) 定标的具体过程如下:
- (a)首先反复调节中心波长,使待测谱线和3条标准谱线均处于 CCD 显示波长范围内,确定最佳中心波长并保持不变。然后分别采集待测光谱和标准光谱,并将这两光谱分别保存在不同寄存器中。根据光强的大小选择曝光时间、累积次数,光强的最大值不能超过4000。
- (b)在获得理想的标准光谱谱图后,暂停采集。单击"数据处理"、"手动定标",对照实验室给出的标准氦光谱图,在所测光谱图上选定一条已知波长的谱线,单击这条谱线,便能看到在这条谱线上有一红"X",用"←"、"→"键将"X"移到该谱线峰尖,回车,即见"输入显示波长"框,在白框中输入选定谱线的波长值,然后点击添加下一点,用同样的方法输入第二条谱线的数值。点击按添加定标,选"线性定标",点击确定,即出现拟合函数和相应的参数,点击退出,图谱的横坐标变为以波长表示。此后在"寻峰"中寻出所有的峰,对照标准氦谱上的波长核对定标是否正确。
- (c)选择对标准谱线寄存器进行"自动寻峰",测得三条标准谱线的波长,并与实验室标准 谱线对照,确定定标误差(需小于 0.5Å),如不正确可能是对标准谱图和实验谱图的对 照分析有错,导致输入谱线波长和实际值不对,需重新定标。
- (d)确认定标无误后,测量得到待测谱线的波长值。检峰的方法是单击"数据处理"、"检 峰"选取适当的最大值和最小值,测出该氢谱线的波长值。
- (e) 再将中心波长定在另一条氢谱线附近, 重复上述步骤 2-6 测量其波长。
- 4、PMT 操作
- (1) 先在 CCD 模式中调节光源的位置与距离,使光路最佳(如何判断?)。然后退出 CCD 进入 PMT 采集状态。PMT 的横轴为波长值,但其波长值存在误差,其读数不能直接 作为波长测量值,需想办法消除零误差,消除方法请同学们自行设计。
- (2) 在屏幕左侧相应的位置输入光谱测量的起始波长(不能小于 300nm)和终止波长(不能大于 660nm),选择扫描步长,PMT 高压电源电压调制 600V,按"单程"扫描采集光谱。
- (3) 根据光强大小和分辨率要求调节高压(通常为 600~1000 V)、采集次数、前后光缝等参数,直到获得理想的光谱。如果谱线不光滑可以进行光滑处理,可选择扩展功能缩小

谱线的显示范围。

- (4) 采用自动寻峰功能,获得谱线波长。
- (5) 记录氢、氘的 n=3,4,5,6 四条谱线的波长及其波长差,要求打印一幅 400nm-660nm 范 围谱图和一幅扩展后的、434nm 氢氘光谱线谱图

六、注意事项

1. CCD 及光电倍增管的转换开关在主机的侧面,选择工作方式时置于所需位置。

- 2. 为延长氢氘光谱灯的使用寿命,测量结束时及时关闭光源。
- 3. 尽量不使用移动 U 盘拷贝数据。
- 4. 多组放电灯换灯时,需要先关闭电源,再接电极棒。

七、预习思考题

- 1. 什么是光谱?如何根据 H、D 光谱计算电子、质子质量比?
- 2. 根据光谱实验总结出来的巴尔末公式如何说明氢原子的能级是分立的?
- 3. 说明光栅光谱仪的分光原理和主要光路,描述单色仪和多色仪的区别和工作方式。
- 4. 什么是光学多道分析方法? 在实验中如何利用光学多道分析方法测量 H、D 谱线?
- 5. 实验结果的分辨率受哪些具体因素影响?

参考文献

[1] 褚圣麟. 原子物理学. 北京: 高等教育出版社, 1979 [2] 杨经国, 冉瑞江, 杜定旭, 刘新明编著. 光电子技术. 成都: 四川大学出版社, 1990

附录 几种光谱仪的结构和原理

研究光谱,需要用到光谱仪。光谱仪是一种把复色光分离成光谱的光学仪器。光谱仪主要由三个部分组成,准直系统、色散系统和成像系统。使用中按感光波段、色散元件、探测方法等不同角度区分有多种类型,但它们的结构和原理大同小异。按色散元件的不同可分为 棱镜光谱仪、光栅光谱仪和干涉光谱仪等。像平面处如果放上感光片用成像的方法记录光谱, 就构成了我们常说的摄谱仪。如果像平面处装上出射狭缝,经过色散系统得到的单色光可从 狭缝相继出射,这种仪器通常叫单色仪;如果像平面处有系列狭缝或矩形开口,可同时出射 多个单色光,这种仪器通常叫多色仪。单色仪或多色仪的狭缝后常放置光电倍增管或其他光 电转换接受元件(如我们 H-D 光谱实验中所用的 CCD)记录光谱。下面介绍光学实验中常 用的棱镜光谱仪和光栅光谱仪。

一. 棱镜光谱仪

1. 结构

图 4 是棱镜光谱仪的光路图。狭缝 S 和准直 透镜 L₁组成准直系统, S 位于 L₁的焦面上, 被分 析的光通过狭缝 S 后再经准直透镜 L₁就变成平行 光。色散系统就是一个棱镜 P, 有的棱镜光谱仪的 色散系统具有两个或三个棱镜。如果从准直系统 出射的平行光是单色光,则通过棱镜后平行光只 是被偏折了一定的角度。被棱镜偏折的单色平行 光被成像物镜 L₂成像于它的焦面 FF'上。这个像



就是狭缝 S 的单色像即光谱线。也可以认为透镜 L₁ 和 L₂构成一个成像系统,它把由被分析 的单色光照亮的狭缝 S 成像于 FF'上。棱镜 P 的作用是使单色光偏折一定的方向。如果照 亮狭缝的是复色光,则由于棱镜的色散作用,不同波长的单色光偏折的方向也不同,于是在 FF' 上得到一排被分开的单色像,即不同波长的谱线,这就是被分析的光谱。如果用光谱底 片代替屏 FF',就能得到光谱照片。

2. 色散率和分辨本领

色散率是光谱按波长被分开的尺度,它可以用角度表示,称为角色散率,也可用线度表 示称为线色散率。角色散率 dθ/dλ 在数值上表示波长差为1个单位的二单色光在空间所分 开的角度。线色散 dl/d λ 则表示波长差为 1 个单位的二单色光在光谱成像面上被分开的间 隔。二者的关系为:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda} f_2 \frac{1}{\cos \delta}$$
(14)

(1

5)

式中 δ 是光谱焦面与光轴夹角, f_{2} 是成像物镜的焦距。因此,对于同样角色散率的光谱仪,成 像物镜的焦距越长,它的线色散率也越大。

一般使棱镜光谱仪的中心波长处于棱镜最小偏向 角 θ_m 的位置,因为这时棱镜的角放大率为1,它的像差 最小。此时有:

$$\frac{d\theta_m}{d\lambda} = \frac{2\sin\frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 2\sin^2\frac{\alpha}{2}}} \frac{dn}{d\lambda}$$



式中 α 是棱镜的顶角, $dn/d\lambda$ 是棱镜材料的色散率。由此可见, 棱镜的角色散与它的顶角大

小有关,也与棱镜的材料有关。应该注意,棱镜材料 的色散 dn/dλ 对不同波长不是一个常数。例如,在可 见光范围内,棱镜对红光的色散小,对紫光的色散大。 因此,由棱镜得到的光谱不是均匀排列的。

一个用色散率为 $dn/d\lambda$ 材料做成的底边为t的棱 镜,其分辨本领为

$$R = t \frac{dn}{d\lambda} \tag{16}$$

由此可见, 选择棱镜材料对仪器的色散率和分辨 本领都有关系。公式中底边 t 的意义在于, 对于没有 被光束照满的棱镜来说, 它的有效底边不是 t 而是 t', 如图5所示。因此,当照明条件不满足要求时,将不 能充分利用棱镜的分辨本领。

3. 棱镜单色仪

如果光谱仪的成像焦面 FF' 上放置一个狭缝 S', 则只有某一狭窄波长范围的光才能通过狭缝,通常近 似看作单色光。只要旋转棱镜的方向,就可以使不同波 长的单色光依次从狭缝 S'出射。通常是通过一带有刻 度的鼓轮使棱镜旋转,鼓轮上的刻度指示出射单色光 的波长。



图6 横向棱镜示意图



图 7 小型棱镜单色仪

由于光在最小偏向角的条件下通过棱镜时具有最小的像差,因此,设计了一种"恒偏向 棱镜",它使各种不同波长的光都能在棱镜的最小偏向角条件下从出射狭缝射出。在单色仪 中经常使用的一种恒偏向棱镜是"阿贝棱镜"。它可以看做是由三块棱镜组成的,如图 6 所示。

ABC 和 BDE 是两块形状相同的棱镜。ACD 是一块全 反射棱镜。设入射光 OP 的波长为 λ ,且设这时棱镜 ABC 恰好满足波长为 λ 的光的最小偏向角条件,则入 射光 OP 进入棱镜 ABC 后其折射光 PQ 应与棱镜的底 边 BC 平行,且平行于 CD。棱镜 ACD 是全反射棱镜, 故 PQ 被 AD 面反射后又与棱镜 BDE 的底边 DE 平行。 因此棱镜 BDE 对波长 λ 的光也满足最小偏向角的条 件。显然出射角 i'与入射角 i 相等。由于 EB_AB,



图 8 反射式单色仪光路图

故 RS⊥OP。棱镜对不同波长的光有不同的最小偏向角,但任何波长的入射光,只要满足最 小偏向角的条件,都能在与入射光相垂直的方向上得到它的出射光。不同波长的光有不同的 一对入射角和出射角,这只要旋转棱镜的方向就可以做到。

我国生产的小型棱镜单色仪就采用这种恒偏向棱镜做为色散系统。其光路如图 7 所示。 图中 S、L₁、P、L₂、S′构成单色仪系统,如果将出射狭缝 S′改为底片,就变成了摄谱仪。 也可以用一个 60⁰棱镜和一平面反射镜组成恒偏向棱镜,如图 8 所示。我国生产的 WDS-2 型反射式单色仪就采用这种类型的恒偏向棱镜做为色散系统。但它的成像系统不是用透镜而 是用凹面反射镜代替,这样可以适用于更广泛的波长范围。

二. 光栅光谱仪

1. 光栅光谱仪的结构

棱镜光谱仪的最大缺点是它的工作范围受到棱镜材料的限制。如我们最常用的光学玻璃材料的工作范围一般在 360nm~25000nm之间,熔融石英的范围约为 185nm~3200nm。熔融石英棱镜只适用于紫外范围,对于可见和红外光,它的色散率很小,故不适用。相对而言,采用光栅作为分光元件的光栅光谱仪具有较大的适用范围。光栅光谱仪也是由准直系统,色散系统和成像系统组成的。光栅光谱仪中采用凹面反射镜代替透镜,由于使用的是反射系统,因此它的工作范围不受光学元件的材料限制。

光栅光谱仪也可以有多种光路布置方等 一块凹面反射镜,利用其中的 M₁和 M₂两 部分别作为准直镜和成像物镜。通过狭缝 S 的光经平面反射镜 R 改变光路方向后, 被准直镜 M₁反射为平行光,从 M₁反射的 平行光射到光栅 G 上。由于光栅的衍射作 用,不同波长的光被分解到不同的方向 上,不同方向的单色光又经成像物镜 M₂ 的反射,聚焦于焦面 FF'上。由于 M₁和 M₂同是一面反射镜,故准直镜和成像物镜 的焦距相等。一般光谱仪都用它的焦距长 度做为型号,如焦距为一米时称为一米光 栅光谱仪,两米的称为两米光栅光谱仪等

光栅光谱仪也可以有多种光路布置方案, 图9给出了一种典型的光路布置方案。M是



图 9 光栅光谱仪的光路图

等。由于光栅的色散较大,FF′上若放置光谱底片摄谱,每次只能摄得光谱的一部分。为了 得到较大波长范围的光谱,可以转动光栅台。一般一米光栅光谱仪需要改变光栅台的方向三 次,才能得到从近紫外到可见光的全波段一级光谱。对于反射式光栅,其分光原理可用图 10 描述。在入射光和反射光同在法线一侧情况下,光程差为 $a(\sin\gamma + \sin\beta) = m\lambda$

式中 *a* 为光栅常数, γ 和 β 分别为入射光与出射光和光 栅法线的夹角。从式(17)可见,波长不同,出光角度不 同,从而达到分光效果。

一般地说,光栅光谱仪的色散和分辨本领都比棱镜 光谱仪大,但是光栅光谱的强度比较弱。为了得到较强 的光谱,近代光栅的沟槽断面形状是特意设计的,以使 大部分入射到光栅上的光都集中在一定光谱级的一定 范围内。这种光栅称之为强度定向光栅,或闪耀光栅。

 光栅光谱仪的色散率和分辨本领 光栅光谱仪的角色散率为

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{a\cos\theta}$$

在衍射角 θ不太大的情况下

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{a}$$

式中*a*为光栅常数,*m*为干涉级数。公式表明,光栅常数越小即刻线越密,它的角色散率越大,干涉级数越高角色散率也越大。

光栅的不同光谱级是有重叠的。例如,在二级光谱某条谱线附近可能出现一级和三级光 谱的谱线。由于重叠的光谱级波长不同,可用适当的滤色片消除不需要的谱线。

和棱镜光谱仪一样,光栅光谱仪的线色散率等于它的角色散率与成像物镜焦距的乘积。 光栅光谱仪的分辨本领为

R = mN

其中 N是光栅的总刻线数。因此,同样光栅常数的光栅,它的刻划面越大,即总刻线的条数 越多,分辨本领也越大。但是,正如棱镜的分辨本领一样,当光束不能照满整个光栅刻划面 时,只有被照量的光栅划线部分才对它的分辨本领有贡献。

参考文献

[1]褚圣麟. 原子物理学. 北京: 高等教育出版社, 1979 [2]吴国安.光谱仪器设计.北京:科学技术出版社,1978.



图 10 反射式光栅的分光原理图

(20)

(18)

(19)