

光栅衍射

光栅是根据多缝衍射原理使光波发生色散的光学元件，又称衍射光栅，由一组大量的相互平行、等宽、等间距的狭缝（或刻痕）构成。原刻光栅是在玻璃或金属材料上用金刚石刀刻划出等宽、等间隔的平行条纹而制成。每毫米间隔内刻划出数十条至数千条。原刻光栅刻划工艺难，材料要求高，制造周期长，其价格十分昂贵。用原刻光栅可以制成复制光栅，用激光全息技术可以制成全息光栅。衍射光栅是研究光谱的最有力的工具，从红外到紫外，各种波长的单色仪、摄谱仪大多采用光栅作为分光元件，在研究物质结构、光通信、信息处理等方面得到了极为广泛的应用。

一、实验目的

1. 观察光栅的衍射现象，了解光栅衍射的主要特性。
2. 测定光栅常数、光波波长和光栅角色散率。

二、实验仪器

分光计、汞灯、双面反射镜、光栅。

三、实验原理

本实验所用的是复制的“平面投射光栅”，当光射到光栅面上时，在透光狭缝处光线可透过，而在不透光处则不能透过。若这些透光狭缝的宽度为 a ，相邻狭缝间不透光部分的宽度为 b ， $a+b=d$ ，称 d 为光栅常量。若在栅面上每毫米刻划 1000 条光缝，则 $d=0.001\text{mm}$ 。

光栅光谱是指复色光经过光栅衍射后，按波长的长短依次排列的图案。衍射

装置如图 1 所示。 L_1 ， L_2 是凸透镜， S 是被光源照亮的狭缝， G 是光栅， P 是接

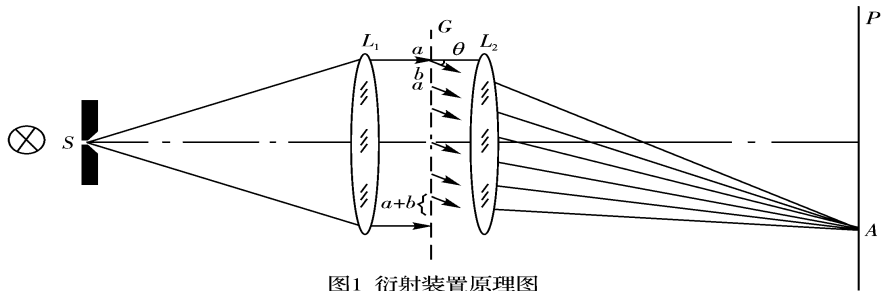


图1 衍射装置原理图

受屏。 S 位于 L_1 的物方焦面上，复色光通过 L_1 后成为一束平行光，垂直入射到 G 平面上。波长不同的单色光经 G 后被分开。波长为 λ 的单色光，经过 G 平面后，成为一束衍射角为 θ 的平行光，再经 L_2 ，汇聚到接受屏 P 上的 A 点。若 S 是狭缝，则衍射像就是一条亮线，在光谱学中也称为谱线。衍射角的大小由光栅方程

$$d \sin \theta = \pm k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

所决定。式中 k 为主极大的级次，也称光谱级次， λ 为入射光波的波长。

光栅方程是决定主极大方向的公式。等式左端 $d \sin \theta$ 表示两相邻衍射光束在 θ 方向的光程差，当它等于波长的整数倍，即 $d \sin \theta = 0, \lambda, 2\lambda \dots$ 时，在相应的 θ 角产生不同级次的主极大。即，当 $\sin \theta = 0$ 时，产生 $\theta = 0$ 的零级主极大，当 $\sin \theta_1 = \pm \lambda$ 时，在 $\pm \theta_1$ 方向产生 1 级主极大，当 $\sin \theta_2 = \pm 2\lambda$ 时，在 $\pm \theta_2$ 方向产生 2 级主极大。若入射光波为单色光，则每一级只有一条亮线；若入射光波为复色光，则每一级都包括若干条亮线，每一亮线对应一种波长。本实验所用光源为低压汞灯，其光栅光谱中比较强的谱线有 4 条，分别为黄（I）（579.1nm），黄（II）

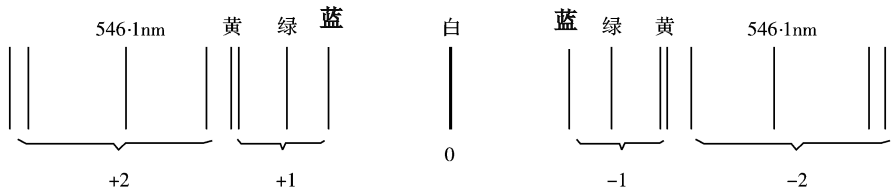


图2 低压汞灯的光栅光谱

(577.0nm), 绿 (546.1nm), 蓝 (435.8nm), 如图 2 所示, 其中绿色谱线光强最强。中央亮线是各种波长的零级主极大重合的结果, 仍然为白色。在它的左右两侧各分布着 ± 1 级, ± 2 级, ± 3 级各种波长的彩色亮线。如果用分光计测出某已知波长谱线的衍射角, 则由(1)式可求出光栅常量。反过来, 若已知光栅常量, 测得某谱线的衍射角, 则由(1)式可出其波长。

光栅对波长 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 两条谱线的衍射角之差与这两条谱线波长差的比值, 称为角色散率

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

角色散率描述了光栅将不同波长分开能力的大小。将(1)式微分, 代入(2)式中, 得

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \theta} \quad (3)$$

由(3)式可知:

(1) 光栅的角色散率与光栅常数 d 成反比, 选用 d 小的光栅, 可以获得大的角色散率;

(2) 光栅的角色散率与光谱级次 k 成正比, 光谱的级次 k 越高, 角色散率越大, 光谱分得越开, 但谱线的强度随着 k 的增加而降低, 因而高级次光谱的利用受到限制;

(3) 在靠近光栅平面法线附近的角范围内, 衍射角 θ 很小, $\cos \theta \approx 1$, (3)式可写成

$$D \approx \frac{k}{d} \quad (4)$$

此时角色散率 D 可以看做一个常量, 衍射角 θ 与波长 λ 成线性关系。

四、实验内容

1. 分光计的调整

为满足平行光入射的条件及衍射角的准确测量,分光计的调整必须满足下述要求:平行光管发出平行光,望远镜对无穷远聚焦,并且二者的光轴都垂直于分光计的主轴,载物台水平。调节方法如下。

(1) 粗调

在侧面平视观察望远镜和平行光管,目测是否大致处于水平状态,否则调节各自下方的仰角调节螺钉,使其基本达到水平状态。转动载物台并估测载物台两层板间各处的距离,调节载物台下面的三颗螺钉,使各处间距基本相等,此时载物台台面即大体处于水平状态。

(2) 调节望远镜

①调节望远镜目镜焦距

打开分光计望远镜上照明灯管的电源,旋转目镜调焦手轮,调节目镜与分划板之间的距离,同时从目镜中观察分划板上的叉丝,直至叉丝最为清晰,锁紧目镜锁紧螺钉,此后就不要再变动目镜调焦手轮了。

②粗调望远镜物镜焦距

持双面反射镜正对望远镜物镜靠近镜筒,但不要让反射镜接触镜筒,同时从目镜中观察从反射镜反射回的绿色“十”字像,转动望远镜调焦手轮,调节望远镜物镜焦距,使看到的“十”字像大体清晰。

③粗调望远镜仰角和载物台倾角

按照图 3 所示,把双面反射镜正对望远镜放置在载物台中央,镜面过载物台的一颗螺钉,与另外两颗螺钉的连线方向垂直。因望远镜的视野较小,所以先在望远镜外侧用眼睛直接观察双面反射镜反射回的绿色“十”字像。在小范围内来回缓缓转动载物台,同时从望远镜外侧,与望远镜同一高度平视观察反射镜,从反射镜中寻找到的反射的“十”字像,并调节载物台下方靠近望远镜一侧的螺钉,使“十”字像移到反射镜中央。如果来回转动载物台找不到“十”字像,通常是因为载物台倾角过大,则调节载物台下方靠近望远镜一侧的螺钉以找到。再缓缓来回转动载物台,同时从望远镜中观察,找到反射回的“十”字像,并调节望远镜仰角螺钉使其移动到视野中央。如果来回转动载物台依然从望远镜中看不到反

射回的“十”字像，则调节望远镜的仰角调节螺钉以找到。然后将载物台转过 180° ，使双面反射镜的另一面正对望远镜，如果同样能够从望远镜中看到反射回的“十”字像，则本步调节完成。否则，先从望远镜侧面观察找到“十”字像，再重复前述操作，直至无论转动载物台使双面反射镜哪一面朝向望远镜时，都可以从望远镜中看到反射回的“十”字像。

本步操作非常重要，是保证实验后续操作能够顺利进行的基础。

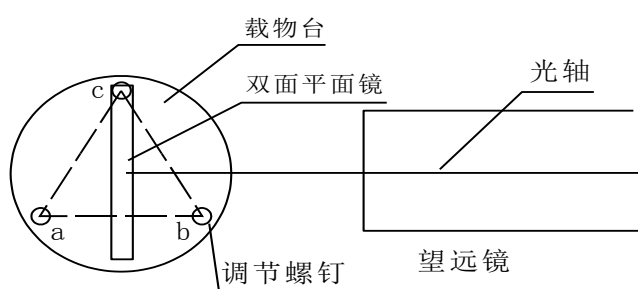


图3 反射镜摆放示意图

④调节望远镜聚焦于无穷远

通过望远镜观察双面反射镜反射回的绿色“十”字像，调节望远镜调焦手轮，改变望远镜物镜与分划板之间的距离，使看到的“十”字像最清晰，并上下左右移动眼睛观察“十”字像与分划板上的叉丝有无相对位移，即是否存在视差。若有视差，需反复调节望远镜焦距直至无视差，此时望远镜的物镜焦平面与分划板重合，望远镜聚焦于无穷远，适合于观察平行光了，此即自准直法调节望远镜聚焦。望远镜物镜焦距调节好后，就不要再变动物镜调焦手轮了。

⑤调节望远镜光轴与分光计主轴垂直

经过前面的调节，双面反射镜两个面反射回的绿色“十”字像已都可以从望远镜中看到，此时望远镜光轴与分光计主轴已基本垂直，下面还需要进一步调节至完全垂直。如果望远镜光轴与分光计主轴完全垂直，双面反射镜镜面又与分光计主轴平行，按照前面对望远镜部件的介绍，转动载物台，从望远镜中观察双面反射镜两个镜面反射回的“十”字像都会与分划板的叉丝上交叉点重合。若望远镜光轴和双面反射镜的方向不满足上述条件，则转动载物台时，从望远镜中观察

两个“十”字像必然不会同时与叉丝上交点重合，一般情况下两个“十”字像会落在叉丝上交点的上下两侧或同侧不同距离的地方，此时要采用“各半逐步逼近法”来进行调节。具体方法是：首先从反射“十”字像距离叉丝上交点比较远的一面开始调节，如图 4（a）所示，假设“十”字像与叉丝上交点的距离为 s ，先调节望远镜仰角调节螺钉，使距离减小为 $s/2$ ，如图 4（b）所示，再调节载物台下方靠近望远镜一侧的螺钉，使“十”字像与叉丝上交点重合；然后将载物台转过 180° ，使双面反射镜的另一面正对望远镜，采用同样的方法，依次调节载物台下方靠近望远镜一侧的螺钉（注意此螺钉不是刚调节过的那颗螺钉）和望远镜仰角调节螺钉，使“十”字像再次与叉丝上交点重合。如此反复转动载物台调节若干次，逐次逼近，直到无论双面反射镜的哪一面朝向望远镜，“十”字像都与叉丝上交点重合，此时望远镜光轴完全垂直于分光计主轴，注意此后就不要再变动望远镜仰角调节螺钉了。

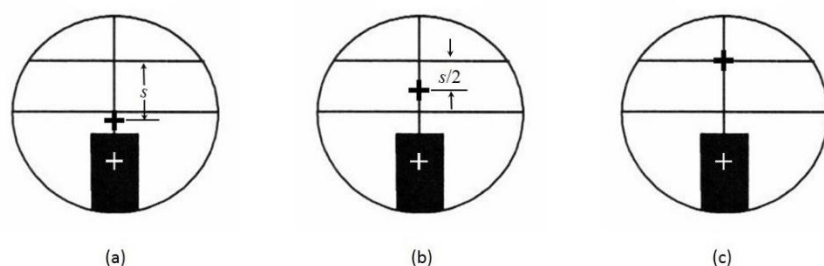


图 4 各半逐次逼近调节法

（3）调节载物台与分光计主轴垂直

经过前面步骤的调节，双面反射镜的镜面已与分光计主轴平行，即载物台的 a、b 两颗螺钉已基本等高，但过镜面的螺钉 c 可能还不在同一高度，需要再对螺钉 c 进行一次调节，使载物台与分光计主轴基本垂直，以方便后面的实验调节。将反射镜从载物台上拿起，旋转 90° 放回载物台上，使反射镜过载物台中心，镜面沿螺钉 a、b 的连线方向，再将载物台旋转 90° ，使反射镜正对望远镜，螺钉 c 在靠近望远镜一侧，如图 5 所示。从望远镜中观察反射回的绿色“十”字像，调节螺钉 c，使“十”字像与叉丝上交点重合，载物台即与分光计主轴基本

垂直。注意本步调节中只调节载物台螺钉 c，不要改变螺钉 a、b 和望远镜仰角调节螺钉，否则望远镜的光轴将不再垂直分光计主轴，载物台的水平状态也会被破坏掉。

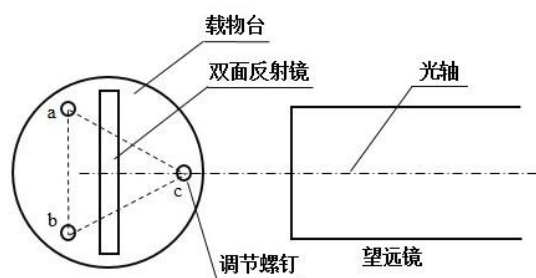


图 5 调节载物台与主轴垂直

(4) 调节平行光管

对平行光管的调节包括调节平行光管发出平行光和光轴垂直于仪器主轴两部分，这两项调节以调节好的望远镜为基准，建立在望远镜聚焦于无穷远和望远镜光轴垂直于仪器主轴的基础上。

① 调节平行光管发出平行光

把双面反射镜从载物台上取下，将汞灯正对平行光管的狭缝，打开汞灯照亮狭缝。将望远镜正对平行光管，从望远镜中观察来自平行光管狭缝的光，转动平行光管调焦手轮，改变平行光管狭缝与会聚透镜之间的距离，使看到的狭缝像最清晰，且狭缝像与分划板的叉丝之间无视差，此时平行光管狭缝成像于望远镜物镜的焦平面上，平行光管发出的光是平行光。转动平行光管狭缝宽度调节手轮，使望远镜视场中看到的狭缝像宽度较细，大约为 1~2 mm，并保持足够明亮，这样正式测量时读取角度位置较准确。

② 调节平行光管光轴与分光计主轴垂直

松开狭缝装置锁紧螺钉，将狭缝旋转（注意旋转时不能前后移动）至水平状态，调节平行光管仰角调节螺钉，使狭缝水平像移至视野中心，被分划板中央“十”字叉丝的水平线上下平分，如图 6 所示。然后再将狭缝转回竖直方向，与分划板“十”字叉丝的竖直线平行，并锁紧狭缝装置锁紧螺钉。此过程中狭缝与平行光

管会聚透镜之间的距离不能改变，否则应再调节，直至狭缝像恢复清晰无视差的状态。完成本步调节后，平行光管的光轴即与分光计主轴垂直了。

完成平行光管的调节后，此后就不要再变动平行光管的调焦手轮、仰角调节螺钉和狭缝调节螺钉了。

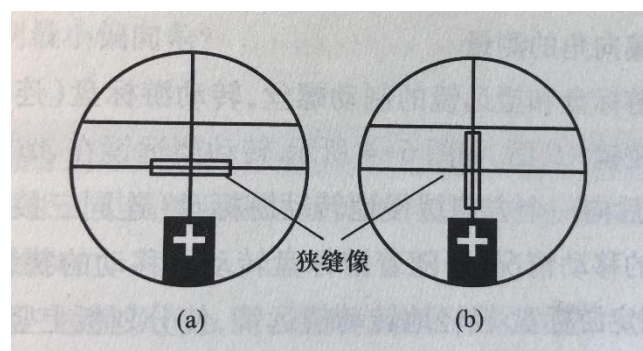


图6 调节平行光管光轴垂直于分光计主轴

(5) 调整读数装置

为避免本实验中读取望远镜转过角度时出现游标盘零刻线跨越圆环刻度盘 360° 位置的情况，从而减少读取数据的复杂，需要将游标盘和刻度盘设在合适的初始位置。首先，游标盘的两游标尺应位于仪器左右对称两侧，如若位置不对，则松开游标盘锁紧螺钉，将游标盘转到要求位置，并锁紧螺钉。然后检查刻度盘，当望远镜正对平行光管时，刻度盘的 90° 和 270° 刻线应该和游标盘的零刻线对齐或接近，如若位置不对，则松开转座与刻度盘之间的锁紧螺钉，将刻度盘调整到要求位置，并锁紧螺钉。

2. 光栅位置的调整

对光栅位置的调整要求达到：光栅平面与平行光管的光轴垂直；光栅刻线与分光计主轴平行。调节方法如下。

(1) 转动望远镜，使竖直叉丝对准狭缝的像，然后固定望远镜位置。按图7所示将光栅放在载物台上，即第一次摆放双面反射镜的位置，使光栅面垂直载物台下两调节螺丝a、b的连线。转动载物台，先目视使光栅平面和平行光管光轴大致垂直。然后用自准直法调节光栅面与望远镜轴线垂直，略微轻轻转动载物台，在望远镜中寻找光栅面反射回的绿色“十”字像，使“十”字像竖线与叉丝竖线重合，然后调节螺钉b，使绿色“十”字像上下移动，与上方叉丝重合。

注意：望远镜在此前已经调好，不能再调节望远镜的仰角螺丝。此时光栅面已与望远镜光轴垂直，也与平行光管光轴垂直了。完成此步调节后，固定载物台锁紧螺钉。提示：光栅两个面中有一个面反射的绿色“十”字像亮度较弱，如果反复转动载物台仍找不到绿色“十”字像，可尝试将载物台转过 180° ，用另一面做反射面。

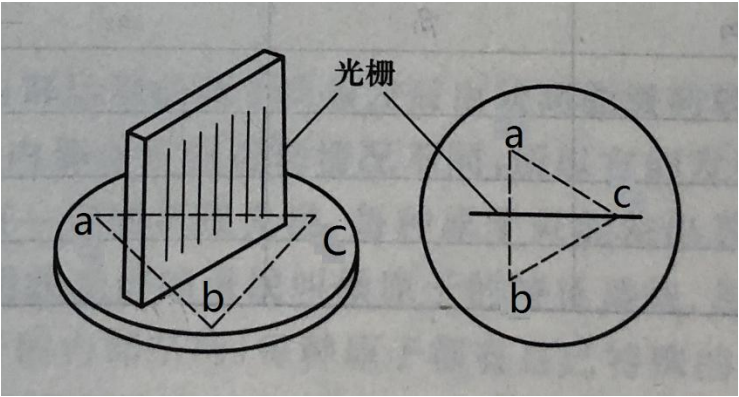


图 7 光栅的摆放位置

(2) 松开望远镜制动螺丝，向左右转动望远镜，可以看到汞灯光谱线，注意观察各条谱线高度是否在同一水平面内，在转动望远镜时如果观察到光谱线高度有变化，说明光栅刻痕与分光计主轴不平行，此时调节载物台的螺丝 c，直至各条谱线基本在同一高度为止。

(3) 此时将望远镜对准平行光管，观察绿色“十”字像是否与上方叉丝重合，如果不再重合，则反复重复第 (1) 和 (2) 步的调节，直至满足光栅位置的调节要求。

3. 测量一级衍射绿色谱线的衍射角

向左转动望远镜，使竖直叉丝对准一级衍射中的绿色谱线，记下两游标读数 θ_{1L} 和 θ_{1R} ，再向右转动望远镜，使竖直叉丝对准另一侧一级衍射中的绿色谱线，记下两游标读数 θ_{2L} 和 θ_{2R} ，填入表 1 中。重复对绿色谱线的测量 3 次。

表 1 测量汞灯一级衍射绿色谱线衍射角数据

		望远镜在位置 1 观测		望远镜在位置 2 观测	
		左游标 θ_{1L}	右游标 θ_{1R}	左游标 θ_{2L}	右游标 θ_{2R}
绿 (546.1nm)	1				
	2				
	3				

4. 测量二级衍射各谱线的衍射角

用同样方法，对二级衍射的黄（I）、黄（II）、绿和蓝色谱线各重复测量 3 次，数据填入表 2 中。

表 2 测量汞灯二级谱线衍射角数据

		望远镜在位置 1 观测		望远镜在位置 2 观测	
		左游标 θ_{1L}	右游标 θ_{1R}	左游标 θ_{2L}	右游标 θ_{2R}
黄（I） (579.1nm)	1				
	2				
	3				
黄（II） (577.0nm)	1				
	2				
	3				
绿 (546.1nm)	1				
	2				
	3				
蓝 (435.8nm)	1				
	2				
	3				

五、数据处理

1. 若已知汞灯绿光波长 546.1nm ，用测量二级衍射绿色谱线得到的衍射角，通过（1）式计算光栅常量 d ，并判断所用光栅是每毫米多少刻线的光栅。

2. 若已知光栅刻线为 300 线，用表 1 中的测量数据，通过（1）式计算汞灯绿光的波长，并计算与已知准确波长之间的相对误差；用表 2 中的测量数据，通过（1）式计算汞灯黄（I）、黄（II）、绿和蓝光的波长，并计算与已知准确波长之间的相对误差。比较用一级衍射和二级衍射计算出的绿光波长误差大小，谁的误差更小？为什么？

3. 已知黄（I）和黄（II）的波长差为 2.1nm ，用黄（I）、黄（II）的二级谱线衍射角测量数据，通过（2）式计算光栅二级衍射的角色散率。

六、注意事项

1. 不能用手直接触摸双面反射镜、光栅、分光计目镜和物镜等的光学表面。
2. 双面反射镜和光栅是易碎元件，取放时应轻拿轻放，小心滑落。
3. 调节分光计的螺钉和手轮时动作要轻缓，不要转到极限位置。
4. 汞灯打开后不要频繁开关。

七、思考题

1. 光栅光谱和三棱镜谱有什么不同？为什么会有这些不同？
2. 观察第三级衍射中的黄色谱线旁边是否可以发现不同颜色的谱线？为什么黄色谱线附近会出现不同颜色的谱线？它是什么颜色？波长是多少？通过实验测量数据回答上述问题。