

补充实验 1 光栅特性与激光波长

具有空间周期性结构的衍射屏统称为衍射光栅。最简单的衍射光栅是由等间距的透明与不透明的条纹组成的一维光栅。此外，有各种平面点阵或网格构成的二维光栅、立体点阵（如晶格）构成的三维光栅等。光栅的衍射有十分广泛的应用：利用衍射光方向与波长的关系，可构成光栅光谱仪，它比棱镜光谱仪的分辨率更高，并且是线性的，易于计算机处理；利用 X 光在晶体上的衍射方向与晶格常数有关，可构成各类 X 光衍射仪，它是近代研究物质结构的重要手段。图 1 是用连续谱的 X 射线照在 NaCl 晶体（三维光栅）上而衍射出现主极强的亮斑，即所谓劳厄斑。这样的一张图样叫做劳厄相。用劳厄相可以确定晶轴的方向。劳厄因这方面的工作荣获 1914 年的诺贝尔物理学奖。历史上，生物分子的 DNA 螺旋结构就是首先用 X 光衍射的方法揭示出来的，图 1 NaCl 单晶的劳厄相

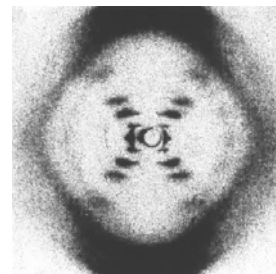
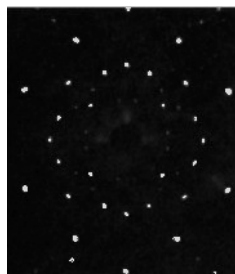


图 2 DNA 结构的 X-射线衍射图样

拍摄它的物理学家和生物学家 (J. D. Watson, F. H. C. Crick 和 M. H. F. Wilkins) 共同获得了 1962 年的诺贝尔生理学 and 医学奖。而图 2 则是他们发表的一张揭示生物大分子 DNA 双螺旋结构的 X 光衍射照片 (Nature, 171 (4356) (1953) 738)。

本实验研究最简单的一维或二维光栅，要求通过实验理解光栅衍射的原理与一般规律，学会测量光栅的基本特性及用光栅测量未知波长。

实验原理

透射光栅由大量相互平行、等间距又等宽的透明狭缝组成。透明区宽度与不透明区宽度之和 d 是该光栅的周期，它决定了光栅的基本性质，一般称为光栅常数。当波长为 λ 的光束垂直入射到一块周期为 d 的光栅上时，通过各透明区（即光栅缝）的透射光将在各个方向发生衍射，如图 3 所示。

若 θ 角满足条件

$$d \sin \theta = K \lambda \quad (1)$$

($K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时，这些衍射光都是同相位的，因此，在衍射角（光栅的法线与衍射光的夹角称为衍射角）为 θ 方向的中心处看到亮斑。

当 $L \gg d$ 时， $\overline{PB} - \overline{PA} = d \sin \theta$ 。式 (1) 称为光栅方程， K 称为光栅光谱（极大值）的级次。显然，由于每个光栅缝的衍射光强都随衍射角增大而减弱，故光栅光谱强度也必然随其级次的增加而降低。

光栅作为一种色散元件，其基本特性可用色散率 D 来描述。角色散率定义为同一级光谱中，单位波长间隔的两束光被分开的角度，

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

将 (1) 式微分即可得

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

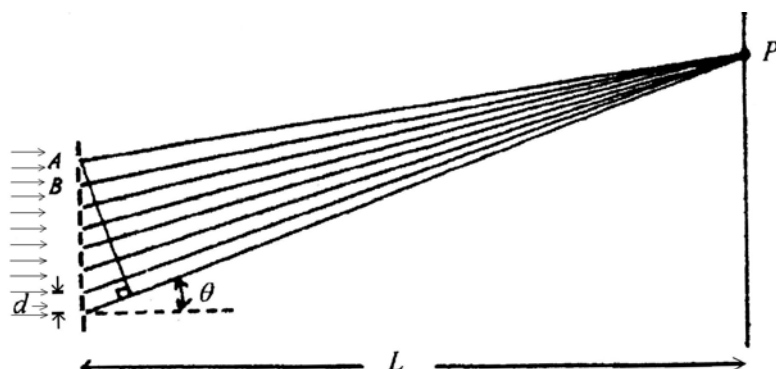


图 3 光栅的衍射示意图

由此可知，光栅常数越小（即光栅各缝越紧密），其角色散率越大，即两个波长差很小的光谱线被分开的角度越大；同时，光谱线的级次 K 越高，角色散也越大。

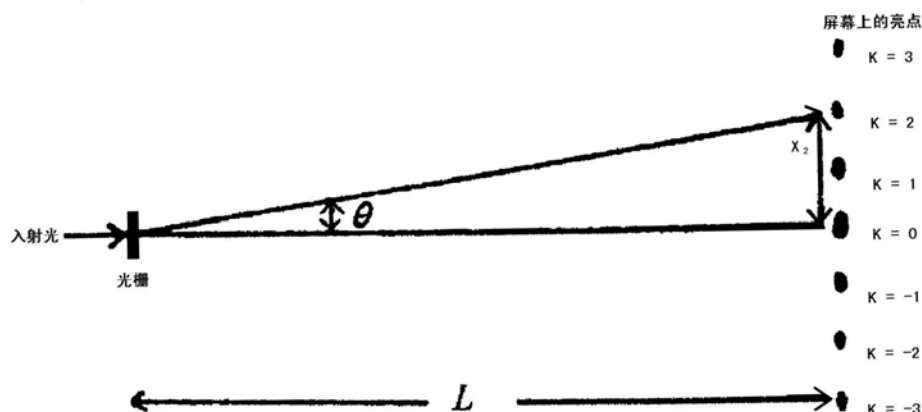


图 4 实验元件装置示意图

实验所使用的光栅为 150 lines/mm(或 100 lines/mm)，即光栅常数 $d = 1/150$ mm(1/100 mm)。将激光束打在光栅上，在屏幕上就可以观测到衍射图样，如图 4 所示。若光栅距屏幕的距离为 L ，当 $X \ll L$ 时， θ 将很小，故可以利用下列近似关系式：

$$\sin\theta \approx \theta \approx \tan\theta = X/L \quad (4)$$

则根据光栅方程可得

$$d \sin\theta \approx d \cdot X / L = K\lambda \quad (5)$$

因而在实验中，如果波长 λ 值已知，只要测出 L 和 X 后，即可以求出光栅常数 d ；反之，已知光栅常数 d ，可以求出光波波长 λ 值。另外，由 $\tan\theta$ 值求出 θ ，再利用式(3)可以得到角色散率 D 。

实验装置

米尺、透射光栅（一维或二维）、二维调节架、激光器（氦-氖激光器或半导体激光器）、毫米方格纸、衍射屏等。

实验用的光栅是一种精密的光学元件，易污、易损，要十分小心。不要用手或其他物品接触其表面，（只能拿其支架），也不要对着它讲话（以免唾沫污染）。

激光安全！

激光是一种方向性和单色性都很好的强光，使用时要格外小心。本实验所用的激光功率虽然不大，但也绝不能让激光直接射入眼睛，它会对视网膜产生永久的伤害。同时任何光滑的表面均可造成光线的反射，也要避免反射的激光射入眼睛。做实验时，要留意其他同学，勿让他们受到激光的照射。不用激光时，最好用不透明的幕挡掉或关掉电源。

实验内容

- （一）必做部分一：给定光栅，根据已知的光栅常数 d ，测量未知光波波长及角色散率
1. 实验时，如图 3 所示，在光学平台（桌面）上设置远场接收光路，进行共轴调节。
 2. 打开激光电源，利用衍射屏的前后移动，并调节激光器的仰角，使激光光束与光学平台（桌面）平行（在同一水平面内，即高度不变）。
 3. 确定入射的激光光束是垂直入射到光栅的表面和衍射屏幕上的（为什么要这样做？其调节

顺序是什么?)

4. 在上述步骤 2 的基础上,就可以在屏幕(贴有毫米方格纸)上观察到 $K=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 等级次的亮点(如图 3 所示)。如果各级次亮点的高度不一致,导致该现象发生的原因是什么?调节哪一个光学元件可以避免这一现象的发生。
5. 在贴有毫米方格纸的屏幕上,直接用眼睛读出各级中心最亮点的位置,用米尺读出光栅到屏幕的距离 L 。将数据代入式(5)中,求出激光的波长 λ ,并给出波长的平均值和不确定度以及相对不确定度。
6. 用直角坐标纸作 $\sin\theta \sim K$ 的关系图。对 $\sin\theta$ 及相应 K 的数值用最小二乘法(也可用计算机通用软件自带的功能来处理)作直线拟合,求斜率,并由此求出激光波长的数值。将其与上述所得的平均值进行比较,并给出合理的解释。
7. 利用(3)式计算透射光栅的角色散率 D 。

(二) **必做部分二:**把光栅放在眼前,直接观察日光灯、汞灯、钠灯。记录观察到的现象并进行分析。

(三) **必做部分三:**给定激光器的波长(如氦氖激光器的波长为 632.8nm),而光栅常数 d 未知,测量 6 组 L 和对应的 X ($K=1$ 级)值,用最小二乘法求出光栅常数及其不确定度以及相对不确定度。

(四) 选做部分

1. 保持 L 的距离不变,若将激光束斜入射到光栅的表面,观察各相应级次亮点位置的变化情况如何,并进行分析。
2. 若将两个光栅互相垂直(构成正交光栅)且依次放置在激光器之前,此时激光束穿透光栅后,在屏幕上的衍射图样如何?说明其原因。
3. 给你一把普通的钢尺,你是否可以用它来测量激光光束的波长?若可以,其物理原理是什么?请用示意图及相应的物理公式来表述。

思考题

1. 本实验用的光栅是刻在或贴在一块平面玻璃基板上的。实验中,将光栅的正面或反面对着入射光,对实验结果有何影响?
2. 使用公式(1)要满足什么条件?实验中是如何保证的?如何判断这些条件已经具备?
3. 试导出平行光斜入射时的光栅方程。
4. 公式(2)和(3)有何区别与联系?

参考材料

1. 贾玉润,王公治,凌佩玲. 大学物理实验. 上海:复旦大学出版社. 1987, 323~325
2. 章志鸣,沈元华,陈惠芬. 光学(第二版). 北京:高等教育出版社. 2000, 89~101
3. 赵凯华,钟锡华. 光学(下册). 北京:北京大学出版社. 1984, 1~38
4. “纪念劳厄发现晶体 X 射线衍射 90 周年”专栏(四篇文章),物理, 32(7)(2003): 唐有祺(从劳厄发现晶体 X 射线衍射谈起) 423-426; 郭可信(X 射线衍射的发现) 427-433; 冯端,冯少彤(晶体的 X 射线衍射理论——劳厄与埃瓦尔德的遗产) 434-440; 林帆,陆金生(X 射线粉晶衍射仪的今天和明天) 441-444

附录

1. 测量未知光波波长 λ

光栅狭缝密度 = _____ (lines/mm), 光栅常数 $d =$ _____ (mm) = _____ (cm)

光栅到屏幕的距离 $L =$ _____ (cm)

衍射级次 K	亮点位置 X / mm	衍射角度 θ / rad	光波波长 λ / nm	波长平均值 λ / nm
-3				
-2				
-1				
0				
+1				
+2				
+3				

不确定度 $u(\lambda) =$ _____ nm, 最后结果 $\lambda \pm u(\lambda) =$ _____ nm

2. 测量角色散率 D

衍射级次 K	亮点距离 X / mm	衍射角度 θ / rad	角色散率 D / nm^{-1}	光栅到屏幕的距离 L / mm
1				
2				
3				

由上述结果, 你所得出的简单结论是_____。

3. 测定光栅常数 d (级次 $K = 1$, 波长 $\lambda =$ _____ nm)

序数	亮点位置 X / mm	光栅到屏幕的距离 L / mm	光栅常数 d / cm	光栅常数平均值 d / cm
1				
2				
3				
4				
5				
6				

不确定度 $u(d) =$ _____ cm, 最后结果 $d \pm u(d) =$ _____ cm