《基础物理实验》课程完整报告

学院： 物理学院　专业： 物理学　年级： 2024 级　地址： 陆佑堂

日期： 2025 年 12 月 19 日　　时间： 上午

室温： 22°C　　相对湿度： 40%

实验人姓名（学号）： 周文斌 (　　)

参加人姓名（学号）： 焦润泽 (　　)

实验 D4 光栅常量及光波波长的测量

1　实验目的

1. 了解光的衍射基本原理，观察光栅衍射现象。

2. 掌握光栅常量、光波波长及角色散率的测量方法。

2　仪器用具

表 1: 仪器用具

仪器名称	数量
分光计	1
平面透射光栅	1
钠灯	1
汞灯	1

3　实验原理

3.1　光栅衍射原理

光栅是一种色散组件，在光谱分析、光信息处理等许多领域都有重要应用。光栅可分为反射光栅和透射光栅两种。透射光栅常用激光全息照相法于感光玻璃板上制成，可看成由许多平行、等距的单缝构成，如图 1 所示。若平均每毫米有 n 条狭缝，则相邻狭缝间距 $d = a + b = 1/n$（mm），称为光栅常量，n 称为光栅密度，其中 a 为透明狭缝的宽度，b 为不透明痕线的宽度。普通光栅密度只有几十条，优质光栅则超过千条。

用一束平行光照射光栅 D，由于各透光狭缝的衍射，光线将向不同的方向传播。若用透镜 L 把那些与光栅法线成 φ 角（衍射角）的光线聚集起来，由于光程差 Δ 不同，这些光线会在透镜的焦平面上发生干涉。由图 1 可知，φ 角相同时，相邻狭缝光线的光程差为

$$\Delta = (a+b)\sin\varphi + (a+b)\sin i = (a+b)(\sin\varphi + \sin i) \qquad (D4.1)$$

若光束垂直照射光栅，则 $i=0$，有

$$\Delta=(a+b)\sin\varphi=d\sin\varphi \qquad (D4.2)$$

当衍射角 φ 满足下列条件时：

$$d\sin\varphi=k\lambda \quad (k=0,\pm1,\pm2,\dots) \qquad (D4.3)$$

焦平面上会出现亮条纹。当 φ 满足条件

$$d\sin\varphi=\left(k+\frac{1}{2}\right)\lambda \quad (k=0,\pm1,\pm2,\dots) \qquad (D4.4)$$

时，则出现暗条纹。其他位置则是这两者之间的过渡状态。式 (D4.3) 称为光栅方程，k 称为光谱级数。在 $\varphi=0$ 的方向上可观察到中央极大，称为零级谱线 ($k=0$)。其他级数的谱线对称地分布在零级谱线两侧，如果光源中包含多种不同波长的光，则在透镜的焦平面上会出现多种颜色的谱线，称为光谱，如图 2 所示。同级光谱中，短波光谱线靠近零级谱线，衍射角小；长波光谱衍射角大。用分光计测出各谱线的衍射角 φ，若已知波长 λ，由式 (D4.3) 可得光栅常量 d；若已知 d，则可求得波长 λ。

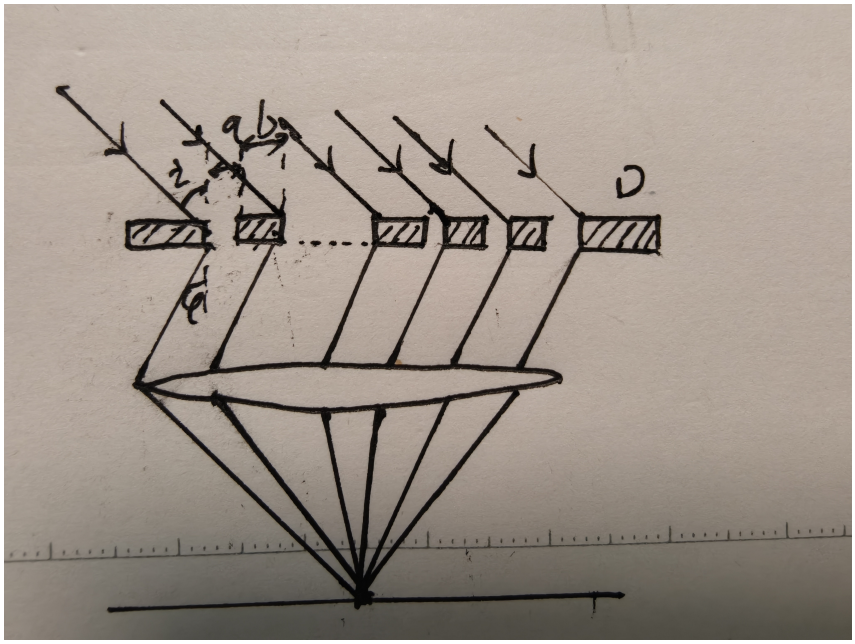


图 1: 透射光栅原理图

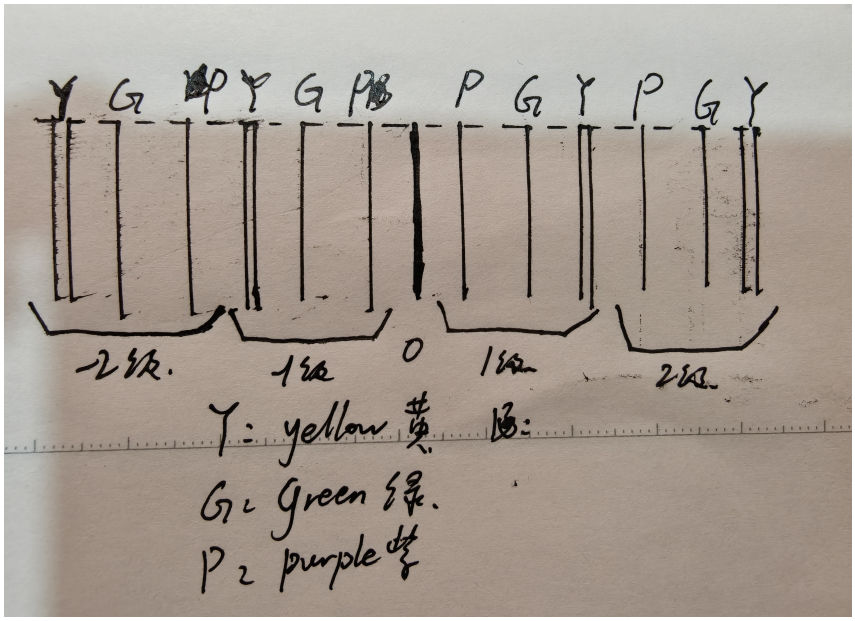


图 2: 光栅分光后光谱图

3.2 光栅的基本特性

角色散率 D 和分辨本领 R 是表征光栅特性的两个重要参数。角色散率 D 定义为同一级别两条谱线衍射角之差 $\Delta\varphi$ 与二者波长差 $\Delta\lambda$ 之比，由式 (D4.3) 可得

$$D = \Delta\varphi/\Delta\lambda = k/(d\cos\varphi) \qquad (D4.5)$$

由式 (D4.5) 可知，光栅光谱具有如下特点：

(1) 光栅常量 d 越小，角色散率 D 越大，谱线分得越开。

(2) 高级别的光谱比低级别光谱有更大的角色散率。

(3) 在衍射角很小时，角色散率 D 近似为一常数，衍射角 φ 与波长 λ 成正比，光栅光谱按波长均匀排列，称为标准光谱。

分辨本领 R 定义为两条刚可以被分开的谱线的波长差 $\Delta\lambda$ 除它们的平均波长 λ，即

$$R = \lambda/\Delta\lambda = kN \qquad (D4.6)$$

其中，N 为光栅狭缝的总数。可见通过减小光栅常量 d，或增大光栅的有效使用面积，均可以使 N 增大，从而提高光栅的分辨本领 R。

3.3 光栅的基本特性

角色散率 D 和分辨本领 R 是表征光栅特性的两个重要参数。角色散率 D 定义为同一级别两条谱线衍射角之差 $\Delta\varphi$ 与二者波长差 $\Delta\lambda$ 之比，由式 (D4.3) 可得

$$D = \Delta\varphi/\Delta\lambda = k/(d\cos\varphi) \qquad (D4.5)$$

由式 (D4.5) 可知，光栅光谱具有如下特点：

(1) 光栅常量 d 越小，角色散率 D 越大，谱线分得越开。

(2) 高级别的光谱比低级别光谱有更大的角色散率。

(3) 在衍射角很小时，角色散率 D 近似为一常数，衍射角 φ 与波长 λ 成正比，光栅光谱按波长均匀排列，称为标准光谱。

分辨本领 R 定义为两条刚可以被分开的谱线的波长差 $\Delta\lambda$ 除它们的平均波长 λ，即

$$R = \lambda/\Delta\lambda = kN \qquad (D4.6)$$

其中，N 为光栅狭缝的总数。可见通过减小光栅常量 d，或增大光栅的有效使用面积，均可以使 N 增大，从而提高光栅的分辨本领 R。

4 实验内容及步骤

4.1 调节分光计和光栅

(1) 按第 5.4.3 节“分光计”介绍的方法调节好分光计，包括载物台水平、望远镜对焦无穷远、平行光管输出平行光。用低压钠灯照射平行光管的狭缝，转动望远镜正对平行光管，使狭缝像与望远镜分划板的竖直线重合。

(2) 按图 3 所示放置光栅片，使光栅表面与载物台 $A'B'$ 螺钉的连线垂直。在固定平行光管和望远镜的前提下，转动游标盘，使光栅表面反射的绿色十字像的垂直线与望远镜分划板的竖直线重合，则光栅面与平行光管轴线垂直。锁紧游标盘制动螺钉，并在后续的实验中保持游标盘不转动。

(3) 转动望远镜并在视场中找到光栅的衍射光谱线，调节狭缝的宽度使谱线明亮、清晰。若发现左右两组光谱的高度不对称，可轻微调节螺钉 C'，直到左右两组谱线的高度一致。

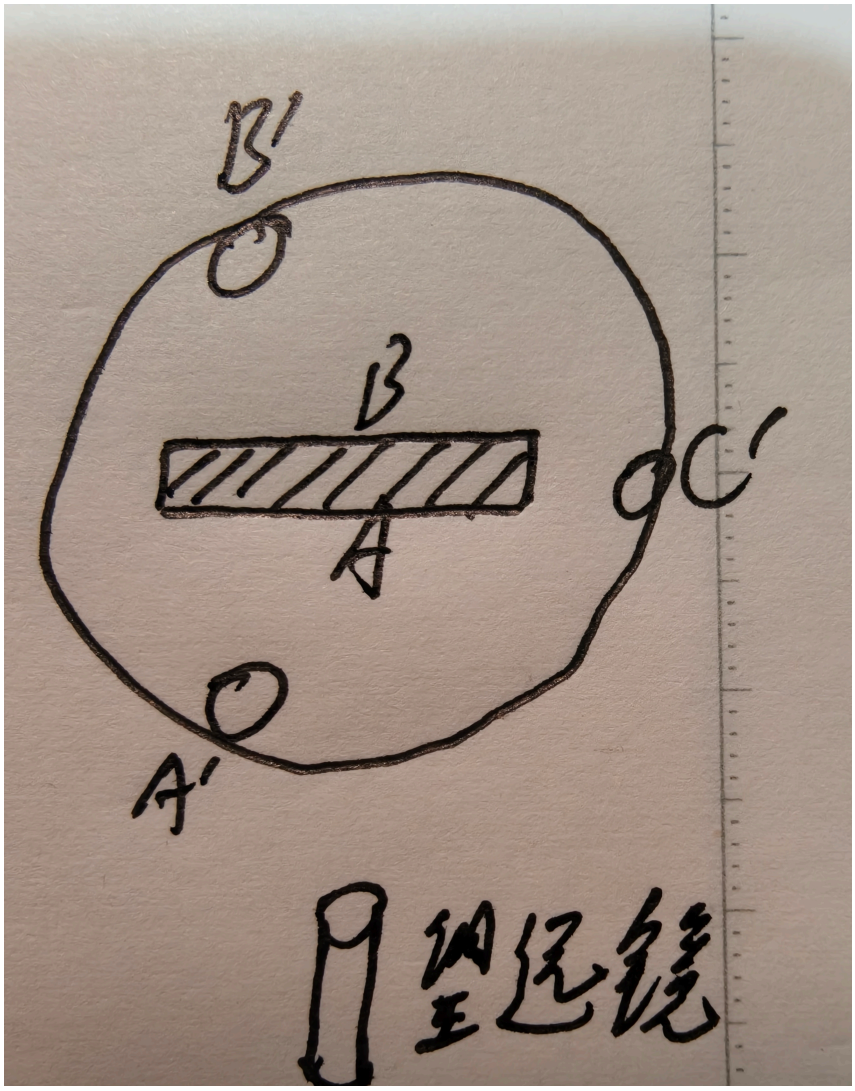


图 3: 光栅位置

4.2 测定光栅常量 (采用钠光灯)

(1) 记录主极亮的位置，即望远镜分划板竖直线与零级谱线（即平行光管狭缝像）重合时的位置，需同时记录游标盘上两个游标的读数。

(2) 把望远镜向零级谱线的一边转动，使分划板垂直线与一级光谱中的钠黄线 ($\lambda = 589.3$ nm) 重合，记录谱线位置。若光谱分辨率高时可能观察到两条黄线，这时应取双黄线的平均位置。

(3) 继续沿原方向转动望远镜，用相同方法测二级光谱中钠黄线的位置。

(4) 把望远镜往零级光谱的另一边转动，作与 (2) 和 (3) 相同的测量。

(5) 把光栅法线左右两边所测同级光谱中的两个衍射角 φ 求平均后代入式 (D4.3)，求光栅常量 d。要求两个 φ 值之差不超过 $10'$，否则需重新调节入射光与光栅面垂直。最后求一、二级谱线对应的 d 值及其不确定度。

4.3 测定未知波长及角色散率 D

以汞灯的黄线作为未知波长的谱线。按上述方法测出衍射角，计算波长，并代入式 (D4.5) 计算角色散率 D 及其不确定度。

4.4 观察分辨率与光栅刻线数目 N 的关系

用纸挡住光栅的一部分，使光栅的有效面积减少，观察汞灯的两条黄线，记录观察到的现象并解释原因。[1]

5 实验数据记录

5.1 4.2 光栅常量测定（钠光灯）数据记录

表 2: 钠光衍射角测量数据

谱线级次	-2	-1	0	1	2
游标 A 读数	$20°14'$	$10°0'$	$0°/360°$	$350°10'$	$339°55'$
游标 B 读数	$200°19'$	$190°0'$	$180°0'$	$170°18'$	$160°0'$
衍射角 φ	$20°16.5'$	$10°0'$	$0°$	$9°46'$	$20°2.5'$

5.2 4.3 未知波长及角色散率测定（汞灯）数据记录

表 3: 汞灯二级双黄线衍射角测量数据

谱线类型	左二级第二条	左二级第一条	0 级	右二级第一条	右二级第二条
游标 A 读数	$20°0'$	$19°17'$	$0°/360°$	$340°24'$	$340°16'$
游标 B 读数	$200°4'$	$199°53'$	$180°0'$	$160°30'$	$160°18'$
衍射角 φ	$20°2'$	$19°35'$	$0°$	$19°33'$	$19°43'$

5.3 4.4 分辨率与光栅刻线数目关系观察

5.3.1 遮挡前（光栅有效面积完整）

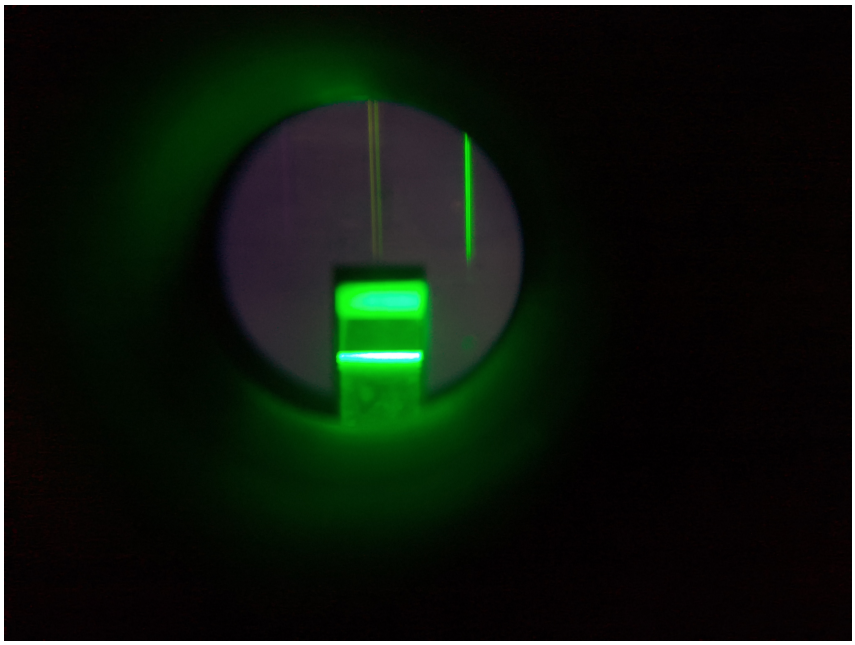


图 4: 遮挡前汞灯双黄线清晰成像

5.3.2 遮挡后（光栅有效面积减小）

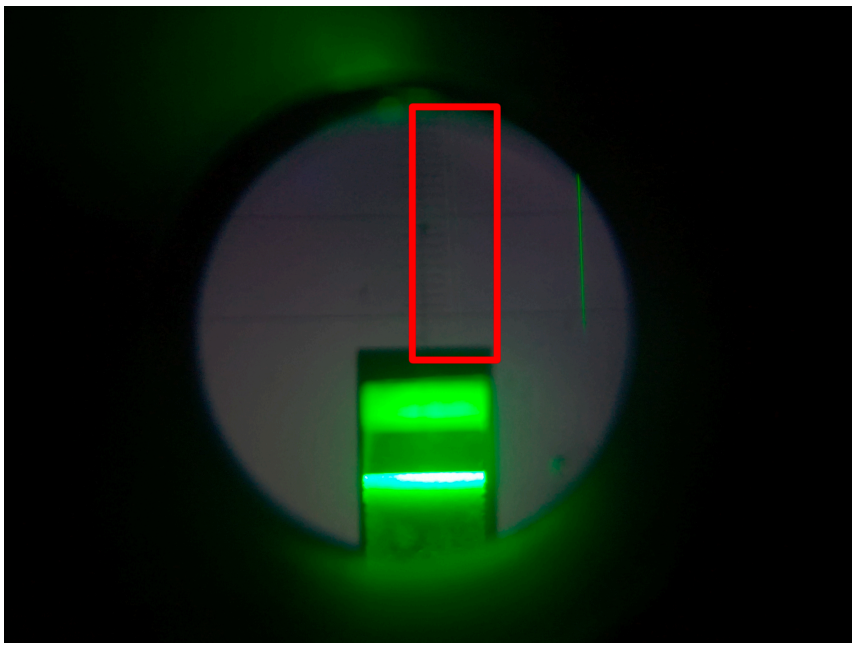


图 5: 遮挡后汞灯双黄线（红框内）变暗并部分重叠

6　数据处理过程与结果

6.1　光栅常数测定（钠光灯）

6.1.1　角度测量数据

一级光谱：$\varphi_1 = 10°0' = 0.174533\,\text{rad}$，$\varphi_1 = 9°46' = 0.170476\,\text{rad}$

二级光谱：$\varphi_2 = 20°16.5' = 0.353864\,\text{rad}$，$\varphi_2 = 20°2.5' = 0.349803\,\text{rad}$

6.1.2　平均衍射角

$$\bar{\varphi}_1 = \frac{\varphi_1 + \varphi_1}{2} = 9.8834° = 0.17249\,\text{rad}, \quad \bar{\varphi}_2 = \frac{\varphi_2 + \varphi_2}{2} = 20.1584° = 0.35183\,\text{rad}$$

6.1.3　光栅常数计算

钠黄光波长 $\lambda = 589.3\,\text{nm}$：

$$d_1 = \frac{\lambda}{\sin\bar{\varphi}_1} = \frac{589.3}{\sin 9.8834°}\,\text{nm} = 3436.2\,\text{nm} = 3.4362\,\mu\text{m}$$

$$d_2 = \frac{2\lambda}{\sin\bar{\varphi}_2} = \frac{1178.6}{\sin 20.1584°}\,\text{nm} = 3420.2\,\text{nm} = 3.4202\,\mu\text{m}$$

平均值：

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} = 3.4282\,\mu\text{m}$$

6.1.4　不确定度分析

角度测量最小分度 $1'$，取 $\Delta\varphi = 0.5' = 0.000145\,\text{rad}$：

$$u(\bar{\varphi}_1) = u(\bar{\varphi}_2) = \frac{\Delta\varphi}{\sqrt{2}} = 0.000103\,\text{rad}$$

$$\frac{u(d_1)}{d_1} = \cot\bar{\varphi}_1 \cdot u(\bar{\varphi}_1) = 5.748 \times 0.000103 = 0.000592$$

$$\frac{u(d_2)}{d_2} = \cot\bar{\varphi}_2 \cdot u(\bar{\varphi}_2) = 2.714 \times 0.000103 = 0.000280$$

合成标准不确定度：

$$u_c(\bar{d}) = \sqrt{\left(\frac{u(d_1)}{2}\right)^2 + \left(\frac{u(d_2)}{2}\right)^2} = 0.0011\,\mu\text{m}$$

扩展不确定度（$k = 2$）：

$$U = 2 \times u_c(\bar{d}) = 0.0022\,\mu\text{m}$$

6.1.5　最终结果

$$d = (3.428 \pm 0.002)\,\mu\text{m}, \quad k = 2$$

6.2 未知波长及角色散率测定（汞灯）

6.2.1 汞灯黄线衍射角

第一条黄线：$\varphi_1 = 19°35'$，$\varphi_1 = 19°33'$，$\bar{\varphi}_1 = 19.5667° = 0.3415\,\mathrm{rad}$
第二条黄线：$\varphi_2 = 20°2'$，$\varphi_2 = 19°43'$，$\bar{\varphi}_2 = 19.8750° = 0.3469\,\mathrm{rad}$

6.2.2 波长计算

取 $d = 3.428\,\mu\mathrm{m} = 3428\,\mathrm{nm}$，$k = 2$：

$$\lambda_1 = \frac{d\sin\bar{\varphi}_1}{2} = \frac{3428 \times \sin 19.5667°}{2}\,\mathrm{nm} = 574.1\,\mathrm{nm}$$

$$\lambda_2 = \frac{d\sin\bar{\varphi}_2}{2} = \frac{3428 \times \sin 19.8750°}{2}\,\mathrm{nm} = 582.9\,\mathrm{nm}$$

6.2.3 角色散率计算

$$D = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d\cos\varphi}$$

$$D_1 = \frac{2}{3428 \times \cos 19.5667°}\,\mathrm{nm}^{-1} = 0.000620\,\mathrm{rad/nm} = 0.620\,\mathrm{rad}/\mu\mathrm{m}$$

$$D_2 = \frac{2}{3428 \times \cos 19.8750°}\,\mathrm{nm}^{-1} = 0.000621\,\mathrm{rad/nm} = 0.621\,\mathrm{rad}/\mu\mathrm{m}$$

平均值：$\bar{D} = 0.6205\,\mathrm{rad}/\mu\mathrm{m}$

6.2.4 不确定度分析

波长不确定度：

$$\frac{u(\lambda_1)}{\lambda_1} = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + (\cot\bar{\varphi}_1 \cdot u(\bar{\varphi}_1))^2} = 0.00078$$

$$u(\lambda_1) = 0.00078 \times 574.1\,\mathrm{nm} = 0.45\,\mathrm{nm}, \quad U(\lambda_1) = 0.9\,\mathrm{nm}\ (k=2)$$

角色散率不确定度：

$$\frac{u(D_1)}{D_1} = \sqrt{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + (\tan\bar{\varphi}_1 \cdot u(\bar{\varphi}_1))^2} = 0.00066$$

$$u(D_1) = 0.00066 \times 0.620\,\mathrm{rad}/\mu\mathrm{m} = 0.00041\,\mathrm{rad}/\mu\mathrm{m}, \quad U(D_1) = 0.00082\,\mathrm{rad}/\mu\mathrm{m}\ (k=2)$$

6.2.5 最终结果

汞灯黄线波长：$\lambda_1 = (574.1 \pm 0.9)\,\mathrm{nm}$，$\lambda_2 = (582.9 \pm 0.9)\,\mathrm{nm}$（$k = 2$）
角色散率：$D = (0.620 \pm 0.001)\,\mathrm{rad}/\mu\mathrm{m}$（$k = 2$）

6.3 分辨率与光栅刻线数目的关系

6.3.1 实验现象

- 遮挡前：汞灯双黄线清晰可辨
- 遮挡后：双黄线变得模糊，难以分辨

6.3.2 理论分析

6.4 分辨率与光栅刻线数目关系分析

- 遮挡前：光栅有效刻线数 N 大，分辨率 $R = kN$ 高，双黄线清晰分离，可分辨。
- 遮挡后：光栅有效面积减小，N 减少，R 降低，双黄线部分重叠，分辨能力下降，符合光栅分辨率公式 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$。

7 思考题

(1) 光栅分为几种类型？

(a) 核心类型（按工作原理）：反射光栅（光线反射衍射，如闪耀光栅）、透射光栅（光线透射衍射，如平面透射光栅）；

(b) 其他分类（按制造方式）：全息光栅、刻划光栅等。

(2) 光栅对波长的测量范围怎么确定？分辨率怎么确定？

(a) 波长测量范围：由光栅方程 $d\sin\varphi = k\lambda$ 及 $|\sin\varphi| \leq 1$ 确定，需满足 $|k\lambda| \leq d$，最大可测波长 $\lambda_{\max} = \frac{d}{|k|}$（$k$ 为光谱级数）；

(b) 分辨率：由分辨本领公式 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN$ 确定（λ 为谱线波长，$\Delta\lambda$ 为最小可分辨波长差，N 为光栅有效狭缝总数），由光谱级数 k 和有效狭缝数 N 共同决定。

(3) 用式 $d\sin\varphi = k\lambda(k = 0, \pm1, \pm2, \dots)$ 测 d 值应保证什么条件？

(a) $\sin i = 0$, 即入射光栅垂直于光栅表面

(b) 保证入射光为平行光，需将平行光管调焦到无穷远

(c) 要把衍射光汇聚成一个很窄的垂直狭缝像，把望远镜调焦到无穷远

(d) 把载物台调平，望远镜和平行光管均垂直于载物台主轴

(4) 如果光栅平面和转轴平行，但刻线和转轴不平行，那么整个光谱有什么异常？对测量结果有无影响？

(a) 光谱不同衍射级次的狭缝像会出现一边高一边低

(b) 有细微误差，但相对其他系统误差来说可忽略不计

(5) 若平行光管的入射缝很宽，对测量有何影响？为什么？

(a) 如果平行光管的狭缝很宽，则望远镜中的狭缝像（请）会变宽。不利于使狭缝对准望远镜分划板上的十字叉丝但是这一项引起的误差也不大。

(b) 还有一种影响测量的情况，就是无法分辨出双黄线，因为两爆双黄线隔很近，狭缝太宽的话，两者会重叠到一起。

(6) 检索文献，尽可能多地列举测量光波波长的方法。

(a) 光栅衍射法

(b) 杨氏双缝干涉法

(c) 牛顿环干涉法

(d) 迈克尔逊干涉仪法

(e) 棱镜分光法

参考文献

[1] 沈韩. 大学物理实验[M]. 北京: 科学出版社, 2024.

附录: 原始数据

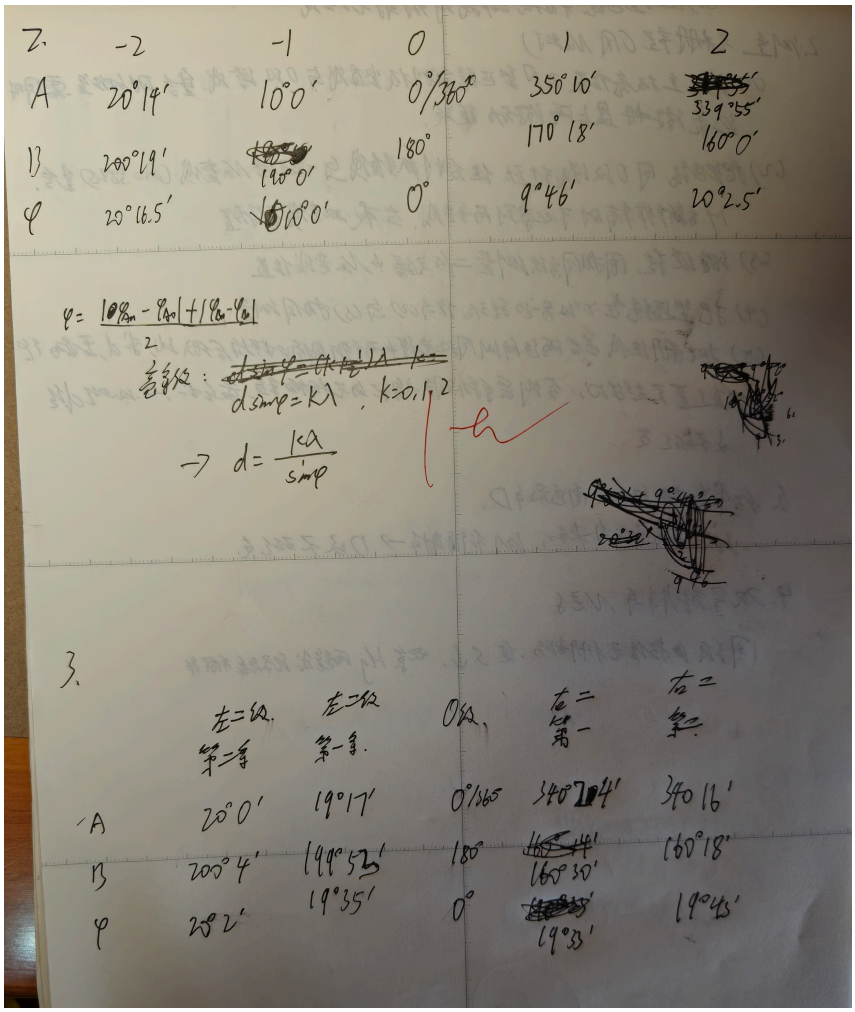

2.
-2
-1
0
1
2
A
20°14′
10°0′
0°/360°
350°10′
339°55′
B
200°19′
180°0′
180°
170°18′
160°0′
φ
20°16.5′
10°0′
0°
9°46′
20°2.5′
φ = |θ左 − θ右| + |θ右 − θ左| / 2
音级：
dsinφ = kλ , k=0,1,2
→ d = kλ / sinφ
3.
左二级
左二级
0级
右二
右二
第二条
第一条
第一
第二
A
20°0′
19°17′
0°/360°
340°14′
340°16′
B
200°4′
199°53′
180°
160°30′
160°18′
φ
20°2′
19°35′
0°
19°33′
19°43′

图 6