

物理实验指导书

(2021年春季)

哈尔滨工业大学（深圳）

目录

实验一	自组显微镜与望远镜.....	1
实验二	分光计的调节和用衍射光栅测定光的波长.....	9
实验三	光的等厚干涉现象与应用.....	22
实验四	准稳态法测不良导体的比热容和导热系数.....	29
实验五	太阳能电池的基本特性研究.....	35
实验六	DIY 实验——磁耦合谐振式无线电力传输实验研究.....	38
实验七	双光栅检测微弱振动.....	44
实验八	迈克尔孙干涉仪.....	49
实验九	夫兰克-赫兹实验.....	53
实验十	光电效应法测定普朗克常量.....	59

实验一 自组显微镜与望远镜

一、实验预习指导

1. 预习显微镜与望远镜的光路图；
2. 预习显微镜与望远镜放大率的测量方法。

二、实验目的及任务

1. 了解显微镜和望远镜的工作原理及调节过程；
2. 掌握显微镜和望远镜放大率的测量方法。

三、实验原理与操作要点

显微镜和望远镜是最基本、最常用的目视光学仪器，根据不同的使用目的，它们分为不同的种类。在物理实验课中经常使用的有读数显微镜、测量望远镜及自准望远镜等。由于这两种光学仪器应用非常广泛，因此，了解它们的工作原理、掌握其组装及调节过程、学习测量其某些性能指标的方法，对进一步掌握更复杂的光学仪器的使用都是非常有必要的。

1. 自组显微镜

1.1 实验原理

放大镜不能满足人们对细小物体观察分析的要求，用放大镜观察的是放在焦平面以内的物体，如果把更细微的物体先用一组透镜放大成像，再通过放大镜观察，这样通过二级放大，就可以观察到更细微的物体了。根据这样的思路，就形成了放大率更高的显微镜，对被观察物体进行尺寸放大的一组透镜就是显微镜物镜；靠近眼睛，扩大视角的放大镜就是显微镜目镜。

光学显微镜主要由目镜、物镜、载物台和反光镜组成。目镜和物镜都是凸透镜，焦距不同。物镜相当于投影仪的镜头，物体通过物镜成倒立、放大的实像。目镜相当于普通的放大镜，该实像又通过目镜成正立、放大的虚像。最后，经显微镜到人眼的物体就成了倒立放大的虚像。如图 1-1 所示，其中 I 为物镜，II 为目镜：

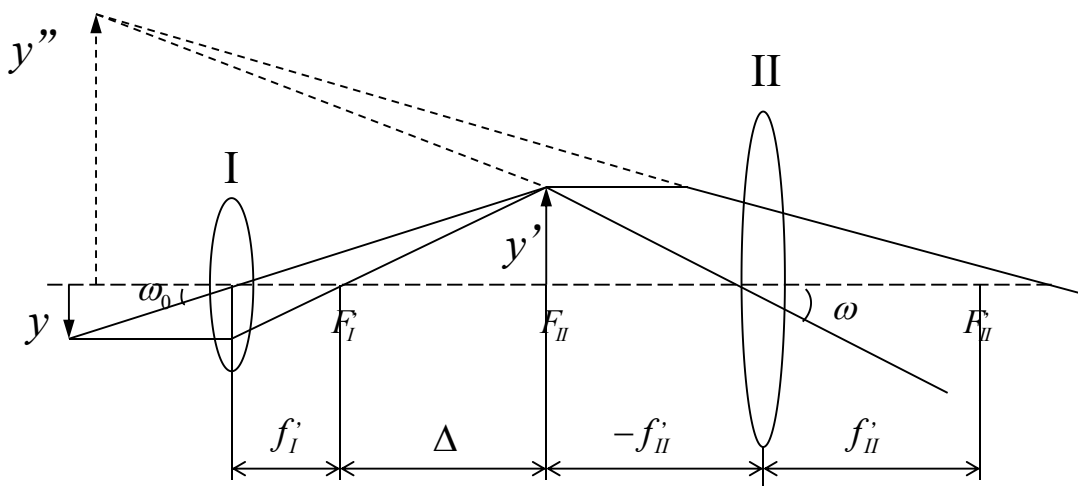


图1-1 显微镜的光路图

显微镜放大率的推导：

通过显微镜观察，人眼直接观察的视角正切值

$$\tan \omega_0 = \frac{y}{250} \quad (1)$$

通过显微镜观察，视角的正切值

$$\tan \omega = \frac{y'}{f_{II}'} \quad (2)$$

假设物镜像方焦点 F_I' 到目镜物方焦点 F_{II} 的距离为 Δ （称为光学筒长），根据牛顿公式物镜的放大率公式有

$$\beta_1 = \frac{y'}{y} = -\frac{\Delta}{f_I'} \quad (3)$$

$$\text{则 } y' = -\frac{\Delta}{f_I'} y \quad (4)$$

带入公式（2）得

$$\tan \omega = -\frac{\Delta}{f_I' f_{II}'} y \quad (5)$$

将公式（1）和公式（5）带入放大率公式

$$\Gamma = \frac{\tan \omega}{\tan \omega_0} = \frac{-250\Delta}{f_I' f_{II}'} \quad (6)$$

根据放大镜视放大公式

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \quad (7)$$

同时对物镜应用牛顿放大率公式可得

$$\Gamma = \frac{-\Delta}{f'_I} \cdot \frac{250}{f'_II} = \beta_I \cdot \Gamma_{II} \quad (8)$$

即显微镜的放大率等于物镜的垂轴放大率与目镜的视放大率的乘积。

根据系统组合焦距的公式，显微镜的组合焦距：

$$f' = -\frac{f'_I f'_II}{\Delta} \quad (9)$$

带入公式（6）得

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \quad (10)$$

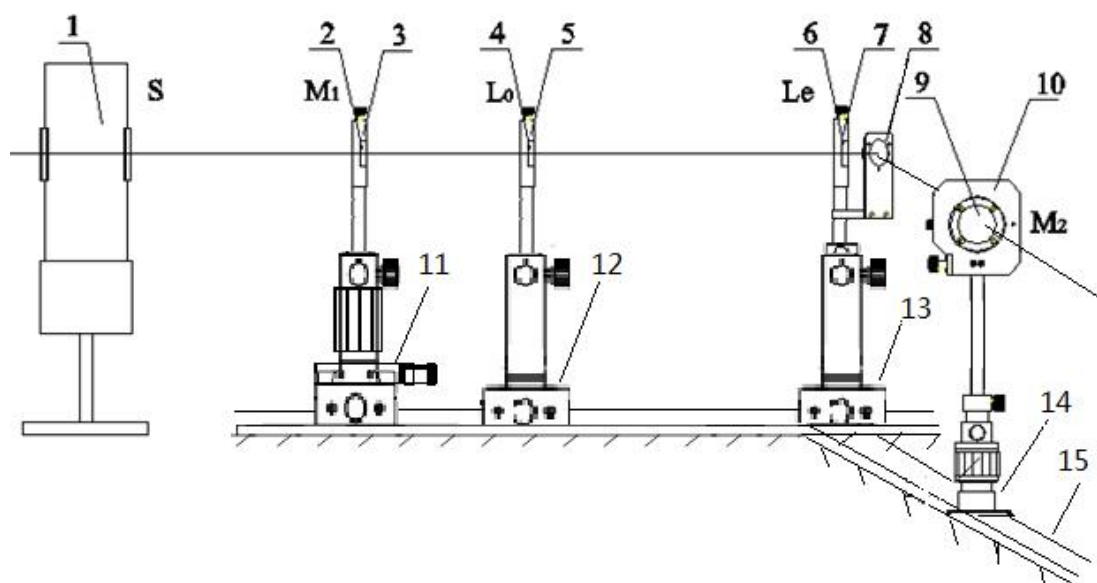


图 1-2 自组显微镜的实验装置图

1	低压钠灯(GY-5C)	9	毫米尺 M2 (T-GSZ-A22)
2	1/10 mm微尺 M1	10	双棱镜架 (SZ-41)
3	二维调节架 (SZ-07)	11	纵向调节滑座 (DGL-2-04A)
4	物镜 L _o (f' _o =45 mm)	12	通用滑座 (DGL-2-01)

5	透镜架 (SZ-08)	13	连接座 (DGL-2-06)
6	透镜架 (SZ-08)	14	横向调节滑座 (DGL-2-03)
7	目镜 L_e ($f'_e=34\text{mm}$)	15	LED白光源 (GY-6C) 和滑座
8	45°玻璃架 (SZ-45)	16	0.6 m+0.3m导轨

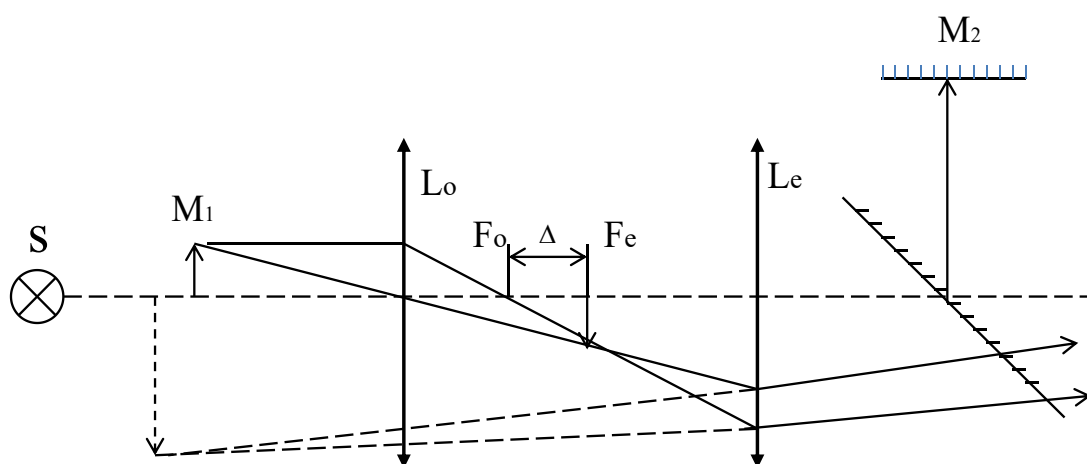


图 1-3 测量显微镜放大率光路图

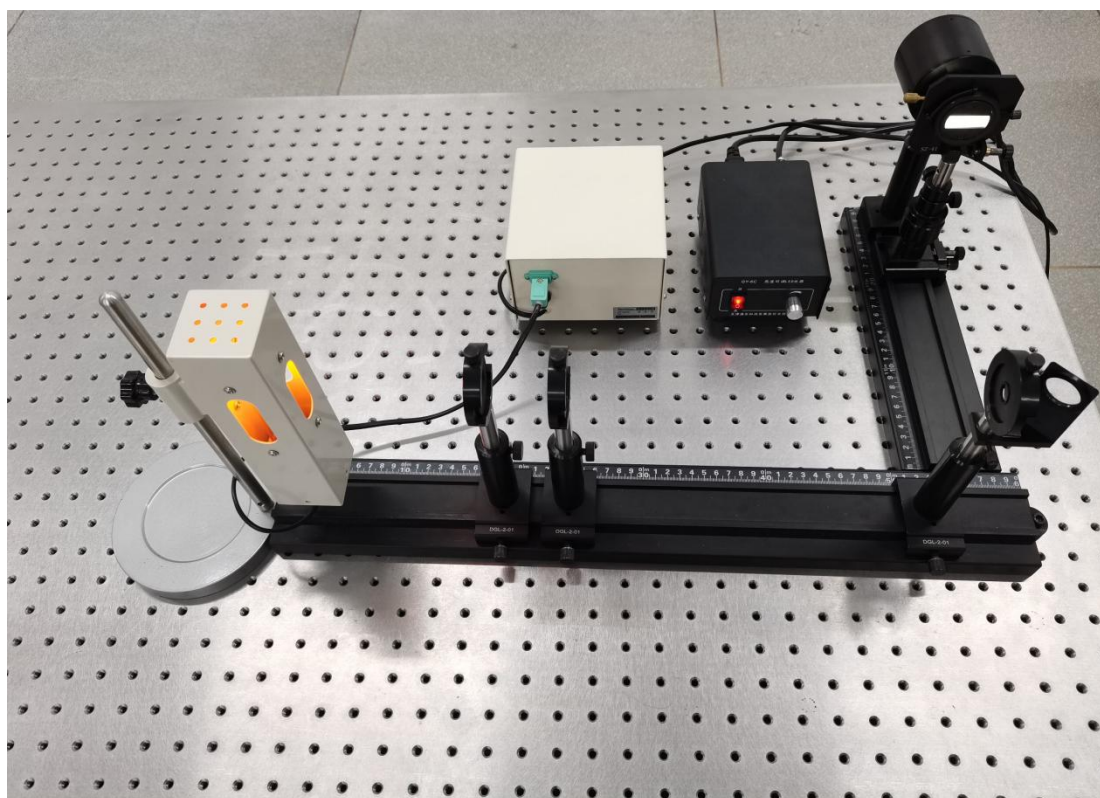


图 1-4 自组显微镜的实验装置实物图

1.2. 操作要点

- 1) 参照图 1-2 和 1-4 布置各器件，调节等高同轴；
- 2) 将透镜 L_o 与 L_e 的距离定为 24 cm，该距离决定了光学筒长 Δ 的大小，进而决定了显微镜的放大率，在实验时可以取其他数值；
- 3) 沿米尺移动靠近光源微尺 M_1 ，用眼睛从目镜 L_e 后面观察，从显微镜系统中得到微尺清晰的放大像；
- 4) 在 L_e 之后置一与光轴成 45° 的玻璃架(SZ-45，安装到目镜的支杆上)，距此玻璃架 25 cm 处，放置一毫米尺 M_2 ，用白光源（图中未画出）从后面照明毫米尺（如果使用连接滑座来安放目镜 L_e 并且连接安放毫米尺的短导轨，则 45° 玻璃与毫米尺不完全共轴，反射角不是严格的 45° ，也可以不把短导轨连接到 T 字连接滑座上，而是摆放到垂直于 45° 玻璃的旁边，这时反射角是严格的 45° ）。
- 5) 仔细调节 45° 玻璃架方向和物镜前的微尺，使在目镜后的眼睛能同时观察到经显微镜放大的微尺像和经 45° 镜反射的没有放大的毫米尺像，并消除两个像之间的视差。如果两个像的亮度相差太大，可以调节白光源的亮度，也可以设法调节钠光灯的亮度，使它们的亮度相似，以便于观察。读出未放大的 M_2 像距离 d （单位 mm）所对应的 M_1 像的格数 a （1/10 分划板 M_1 最小刻度为 0.1mm， M_2 最小刻度为 1mm）。

$$\text{则显微镜的测量放大率为: } M = -\frac{d \times 10}{a}$$

$$\text{则显微镜的计算放大率为: } M' = -\frac{250\Delta}{f_o' f_e'}$$

2. 自组望远镜

2.1 实验原理

望远镜是用来观察无限远目标的仪器，仪器应该出射平行光，成像在无限远，这样望远镜应该是一个将无限远目标成像在无限远的无焦系统。对于无限远目标，通过一定焦距的透镜组，将成像在透镜组的焦平面上，而不是无限远，并不能构成望远镜系统。再加一目镜，使物镜的像方焦平面和目镜的物方焦平面重合，这种组合就实现了无限远处成像到无限远的目的。

比较常见的望远镜是折射式望远镜，折射式望远镜分两种：伽利略式望远镜和开普勒式望远镜。目镜为凸透镜的是开普勒式望远镜，如图 1-5 所示：物镜把远处的物体

在其后焦面附件成一个倒立的实像，它处于目镜的一倍焦距之内，所以目镜再把这个实像成一个放大的虚像供人眼在目镜后观察。

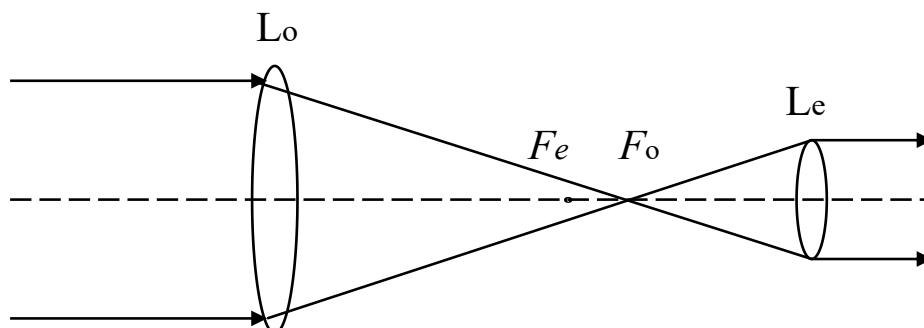


图1-5 开普勒式望远镜示意图

目镜为凹透镜的是伽利略式望远镜，如图1-6所示，成像是正立的虚像。

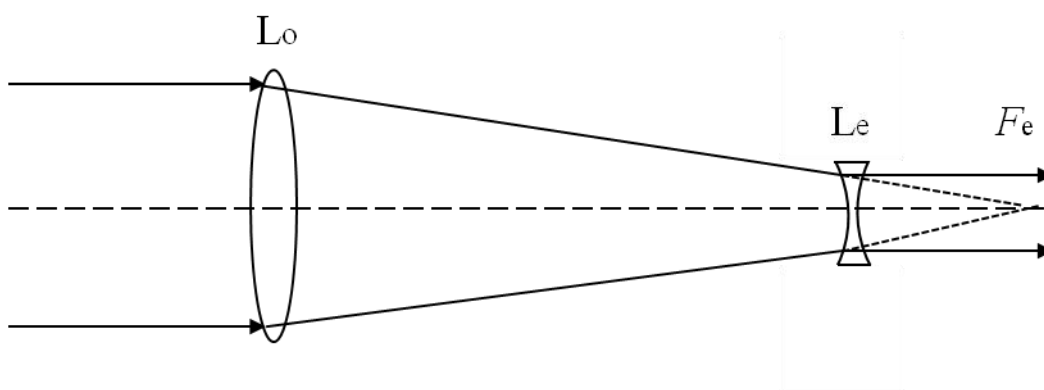


图1-6 伽利略式望远镜示意图

望远镜视角放大率（放大本领）定义为 $\Gamma = \frac{U'}{U}$

U —物对物镜的视角， U' —像对目镜的视角

因望远镜的光学间隔，计算可得： $\Gamma = -\frac{f_o'}{f_e'}$ （开普勒式）； $\Gamma = \frac{f_o'}{|f_e'|}$ （伽利略式）。

测量时，测出未经望远镜放大的标尺上两个红色指标间的“E”字间距 d_1 ，

再通过望远镜测出对应的间距 d_2 ，则望远镜的测量放大率 $\Gamma = -\frac{d_2}{d_1}$

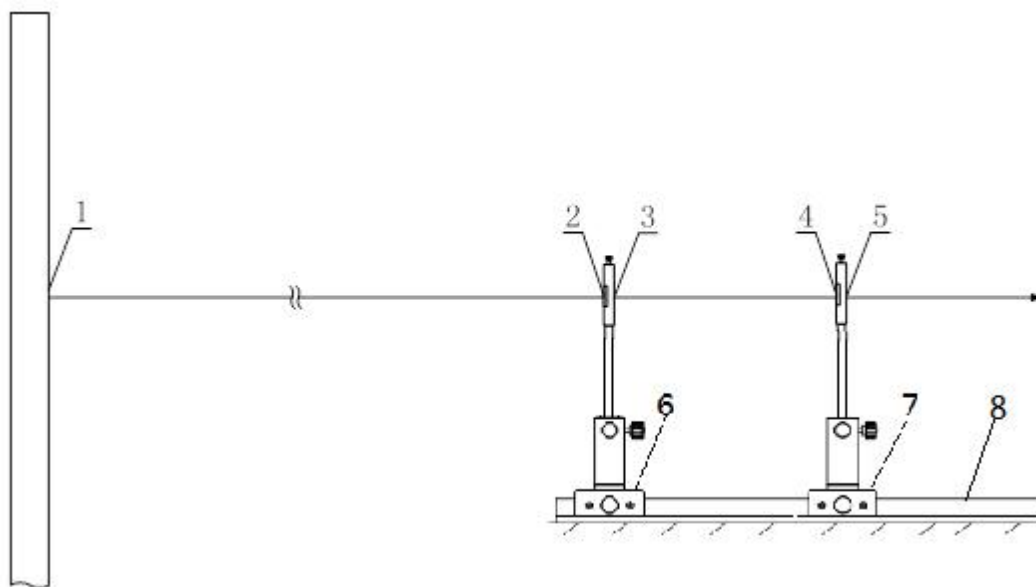


图1-7 开普勒式望远镜实验装置示意图

1. 标尺(SZ-33)	5. 透镜架 (SZ-08)
2. 物镜 L_o ($f'_o=225\text{ mm}$)	6. 通用滑座 (DGL-2-01)
3. 透镜架 (SZ-08)	7. 纵向调节滑座 (DGL-2-04A)
4. 目镜 L_e ($f'_e=45\text{ mm}$)	8. 导轨



图1-8 开普勒式望远镜实验装置实物图

2.2 操作要点

1) 按图 1-7 和 1-8 组成开普勒望远镜, 向远处的标尺调焦, 并把两个红色指针之间的标尺成像到视场中央区域 (建议红色指针之间的距离即 d_1);

2) 用另一只眼睛直接注视标尺, 经适应性练习, 在视觉系统获得被望远镜放大的和直观的标尺的叠加像(通过仔细调节望远镜目镜的高矮和光轴的方向取得), 再测出放大的红色指标内直观标尺的长度 d_2 。

3) 求出望远镜的测量放大率, 并与计算放大率作比较。

四、数据记录

1. 自组显微镜放大率测量

物镜 L_o ($f_o'=45\text{ mm}$) 目镜 L_e ($f_e'=34\text{ mm}$)

序号	物镜 L_o 位置 (mm)	目镜 L_e 位置 (mm)	分划板 M_1 位置 (mm)	标尺 M_2 位置 (mm)	光学筒长 Δ (mm)	M_2 标尺中距离 d (mm)	对应 M_1 格数 a
1							
2							
3							
4							
5							

分别求出自组显微镜测量放大率和计算放大率

2. 自组望远镜放大率测量

物镜 L_o ($f_o'=225\text{ mm}$) 目镜 L_e ($f_e'=45\text{ mm}$)

序号	物镜 L_o 位置 (mm)	目镜 L_e 位置 (mm)	标尺距离物镜的 距离 (mm)	红色指针距离 d_1 (mm)	直观标尺长度 d_2 (mm)
1					
2					
3					
4					
5					

分别求出自组望远镜实际测量放大率和无限远放大率。

3. 选做内容

请利用实验室提供的器材设计出另外一种望远镜放大率的测量方法, 并给出测量结果。

五、思考题

1. 请简述显微镜与望远镜的区别?
2. 请思考自组望远镜实际视放大率测量值与无限远放大率数值出现差异的原因?

实验二 分光计的调节和用衍射光栅测定光的波长

一、实验预习指导

1. 分光计调节的主要步骤与要点；
2. 如何调整望远镜光轴与分光计的中心轴垂直，何为“各半调节法（对半调节法）”？
3. 衍射光栅测定光的波长工作原理是什么？

二、实验目的及任务

1. 掌握分光计的结构和调节过程，学习正确使用分光计；
2. 观察光栅对汞光衍射现象；
3. 用光栅衍射法测量汞光的波长；
4. 观察白光的光栅衍射现象。

三、实验原理

1. 衍射光栅

衍射光栅（Diffraction Grating）是光栅的一种。它通过周期性结构，使入射光的振幅或相位（或两者同时）受到周期性空间调制。衍射光栅包括反射式衍射光栅和透射式衍射光栅，如图 2-1 所示。

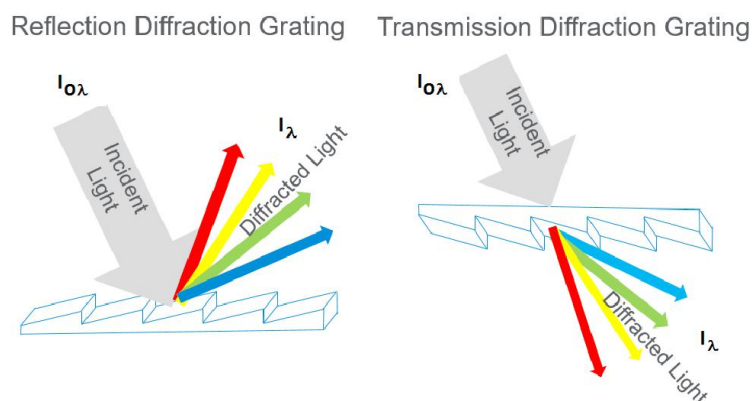


图 2-1 反射式衍射光栅和透射式衍射光栅结构及衍射示意图

衍射光栅在光学上最重要的应用是分光，即将不同波长的复合光分离为单色光。因此衍射光栅常被用于单色仪和光谱仪上。另外，衍射光栅在光纤通讯领域也有重要应用，可用于波分复用（WDM）、光分插复用（OADM）、光交叉连接（OXC）、色散补偿等。

当光垂直入射到衍射光栅面上时，根据单缝衍射和多光束干涉原理可知，透过狭缝的光沿衍射各方向传播，经透镜汇聚后发生多光束干涉，并在其焦平面上形成一系列明条纹，如图 2-2 所示。

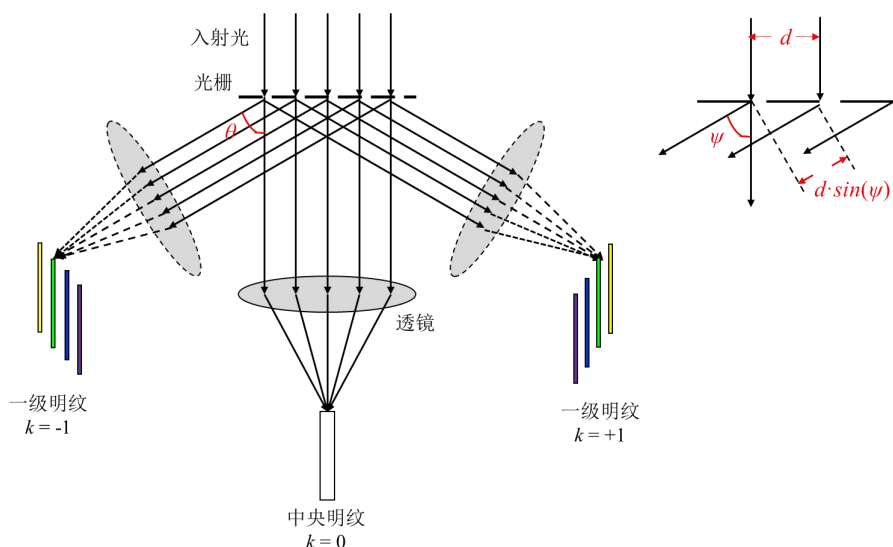


图 2-2 衍射光栅的工作原理

明条纹的角度位置 ψ 由光栅方程决定，即光程差等于波长的整数倍：

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

式 (2-1) 中， λ 为光波长； d 为光栅常数，即相邻狭缝的间距， $d=1/N$ (mm)， N 为每毫米长度光栅面上的狭缝数。因此在已知光栅常数 d 时，只需要测量第 k 级明纹对应的衍射角 ψ_k ，即可由下式计算光波长 λ ：

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin(\psi_k)}{k} \quad (2-2)$$

式 (2-2) 中的角度 ψ_k 使用分光计进行精确测量。

2. 分光计

分光计是一种能精确测量角度的光学仪器，如图 2-3 所示。



图 2-3 分光计实物图

分光计的光路如图 2-4 所示。光源（本实验中使用的是汞灯）发出的光先经过狭缝，然

后经平行光管的准直镜准直，变成平行光，最后被望远镜接收。望远镜包含物镜和目镜，调好的分光计物镜的后焦面和目镜的前焦面重合。该焦面上设置有分划板，分划板上开了一个十字孔。绿光源发出的绿光经过十字孔，在调节分光计时会看到绿色十字像，该绿色十字像的位置可帮助我们调节分光计。

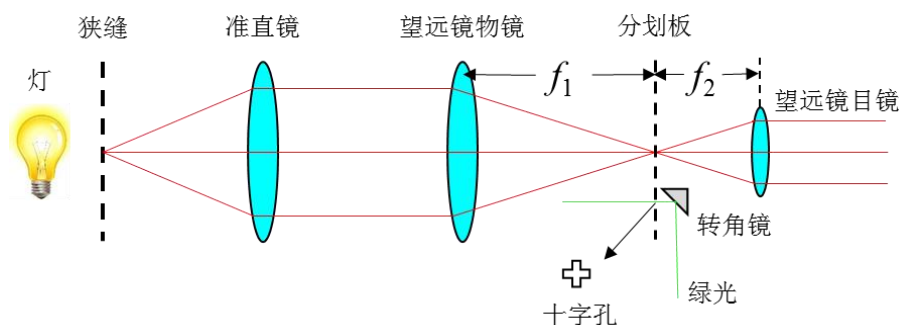


图 2-4 分光计的光路示意图

分光计在使用前需要进行仔细调节，调节的要求有以下几点：

- (1) 望远镜聚焦于无穷远(能接收平行光)；
- (2) 望远镜与载物台均水平(经过粗调和细调)；
- (3) 平行光管能发射出平行光，并与望远镜光轴同轴。

分光计调节好之后，将衍射光栅置于载物台上，仔细调节。然后转动望远镜和游标盘，分别找到待测光的+1级和-1级亮条纹，并记录下相应的读数。两次读数之差即为+1级（或-1级）亮条纹对应的衍射角 θ 的两倍，根据式（2-2）即可计算得到待测光波长。



图 2-5 分光计的读数

分光计的读数原理与游标卡尺类似，以图 2-5 为例。主刻度盘最小分度为 0.5° ($30'$)，小于 0.5° 的读数利用游标读出，游标上有 30 格，最小读数单位为 $1'$ 。图中的读数为 $22.5^\circ + 9' = 22^\circ 39'$ 。

需要注意的是，分光计设置了两个间隔 180° 的游标，目的是消除刻度盘与分光计中心轴线之间的偏心差。测量时，分别计算每个游标两次读数之差，再取平均值，即为 2θ 。

四、操作要点

1. 调节分光计

(1) 调节望远镜目镜

打开绿光灯，转动望远镜目镜调焦旋钮，调整目镜的前后位置，并从目镜观察，直至能看到分划板上清晰的基准线。表明分划板已经位于望远镜目镜的焦面上，望远镜目镜已调好。



图 2-6 望远镜目镜调节方法

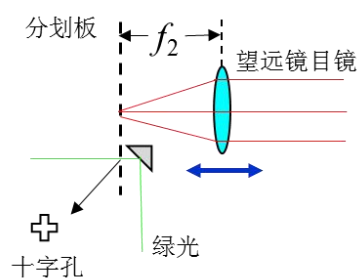


图 2-7 望远镜目镜调节原理

(2) 调节望远镜物镜，使望远镜聚焦于无穷远

将平面镜放置于物镜前方，调整目镜到物镜的距离，使十字像清晰，表明分划板已经位于物镜的焦面上，望远镜已经聚焦于无穷远。

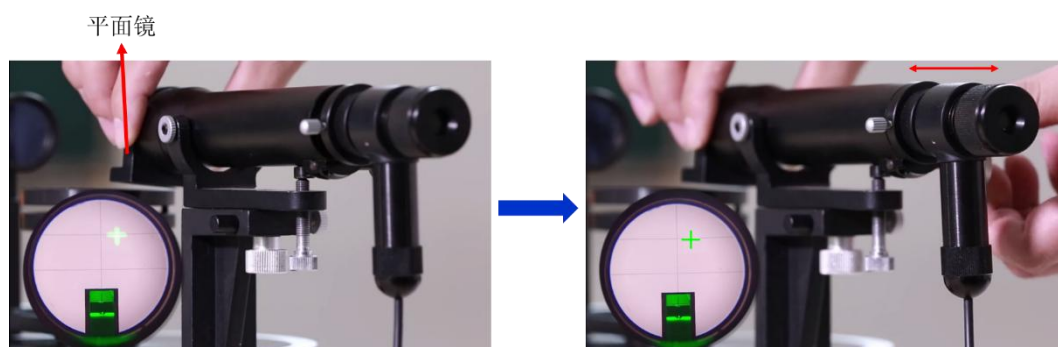


图 2-8 望远镜物镜调节方法

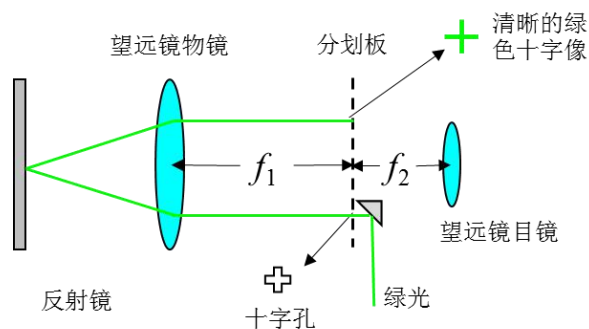


图 2-9 望远镜物镜调节原理

(3) 望远镜和载物台的水平（粗调）

调节望远镜的俯仰调节螺钉和载物台的三颗螺钉，分别如图 2-10、图 2-11 所示。



图 2-10 望远镜俯仰角粗调



图 2-11 载物台粗调

(4) 望远镜和载物台的水平（细调）

A. 放置双面反射镜

将双面反射镜置于载物台上。载物台上三条刻线分别与三颗螺钉 A、B、C 对应，A、B、C 构成等边三角形。放置双面反射镜时，使反射镜的镜面与载物台上其中一条刻线（例如 C）重合，镜面正对望远镜，如图 2-12 所示。



图 2-12 放置双面反射镜

B. “各半调节法”

若望远镜与载物台均水平，则望远镜的光轴与反射镜的镜面垂直，绿色十字像的水平线应与分划板的上基准线对齐，与十字孔位置对称，如图 2-13 所示。此时的光路如图 2-14 所示。



图 2-13 望远镜与载物台均水平时绿十字像的位置

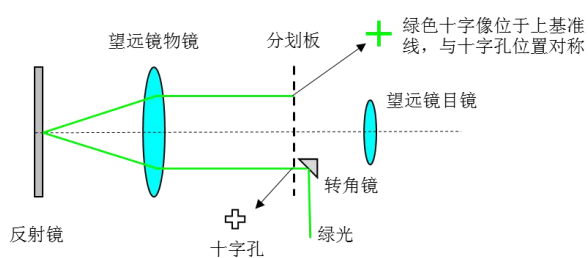


图 2-14 望远镜与载物台均水平时光路图

若绿十字像的水平线与分划板的上基准线未对齐，说明反射镜的镜面与望远镜光轴不垂直，光路如图 2-15 或图 2-16 所示。

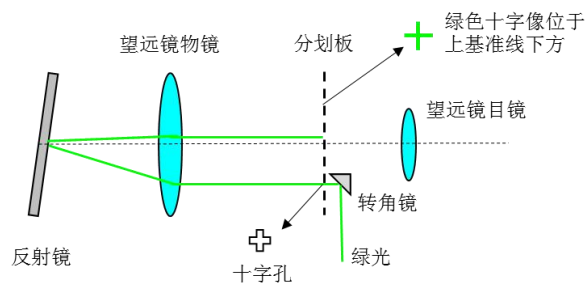


图 2-15 绿十字像水平线位于上基准线下方

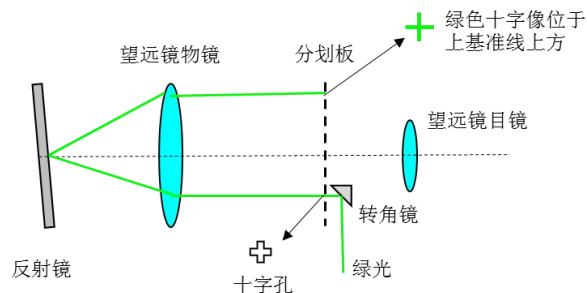


图 2-16 绿十字像水平线位于上基准线上方

以上两种情况表明此时载物台不水平或望远镜不水平，或二者均不水平。由于不知道究竟是哪部分不水平，所以二者都要调节。调节的方法是先调节望远镜俯仰角，使十字像的水平线与上基准线高度差减小一半，然后调整载物台下方靠近望远镜的螺钉（以“A”表示，其他两颗螺钉“B”和“C”不调），直至十字像的水平线与上基准线对齐，如图 2-17 所示。这种调节方法简称为“各半调节法”或“对半调节法”。

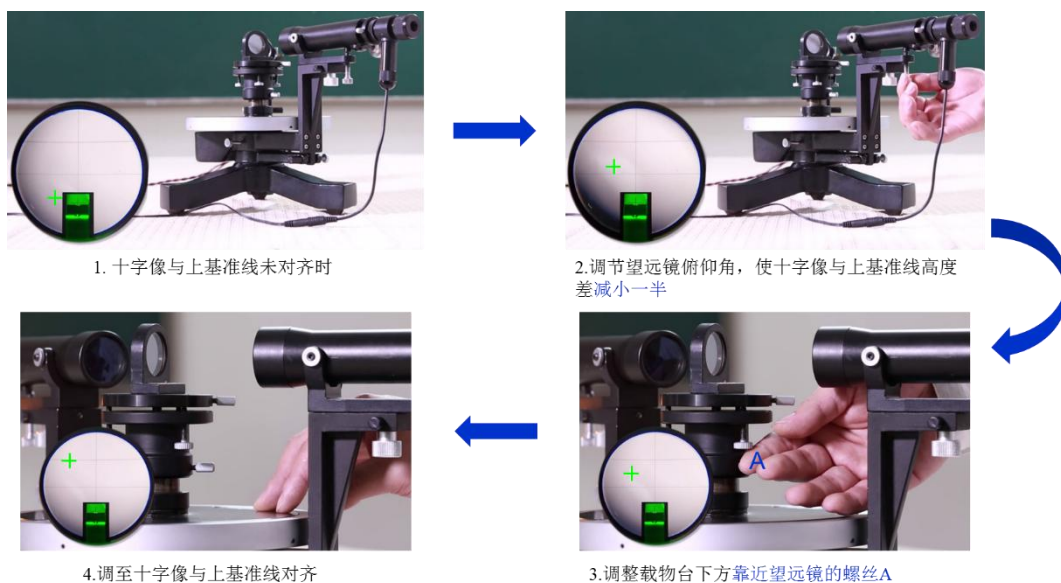


图 2-17 “各半调节法”

C. 翻转调节，逐次逼近

采用“各半调节法”调至十字像水平线与上基准线对齐后，只能说明此时望远镜的光轴与反射镜的镜面是垂直的，并不能保证二者均是水平的。因此需要转动游标盘，将载物台连同双面反射镜转过 180° 。此时从望远镜目镜中观察，若十字像水平线与上基准线仍保持对齐，说明望远镜与载物台均水平；若不再对齐，说明望远镜与载物台都不水平，此时需要继续用“各半调节法”将十字像水平线与上基准线调至对齐，如图 2-18 所示。注意此时载物台的三颗螺钉中，仍然只调节靠近望远镜的螺钉（以“B”表示），其他两颗螺钉不调。如此重复操作，直至两面的反射镜都使得绿十字像的水平线与分划板的上基准线对齐。

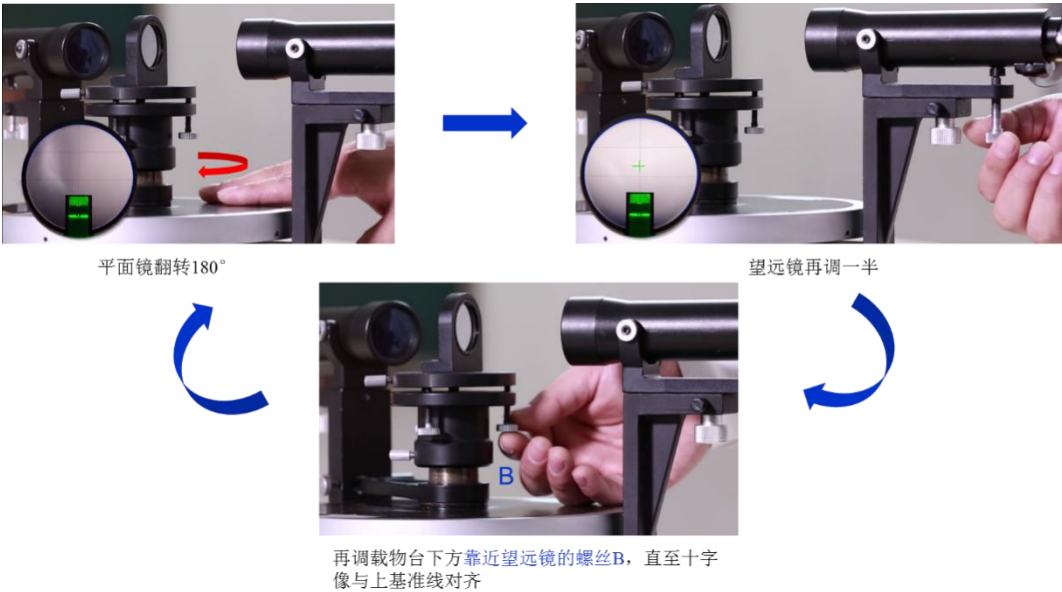


图 2-18 翻转调节，逐次逼近

D. 调整载物台下方第三颗螺钉

重复采用“各半调节法”只调了两颗螺钉“A”和“B”，以上步骤只能保证望远镜是水平的，并不能保证载物台水平，平面镜可能是图 2-19 所示的状态。

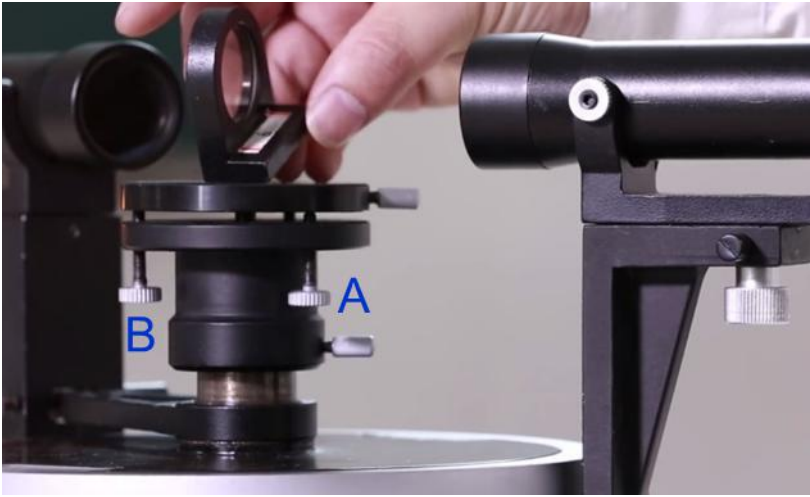


图 2-19 重复采用“各半调节法”后载物台和平面镜可能的状态

因此，此时需要将载物台转过 90° ，再将平面镜转过 90° ，镜面对着望远镜。然后从望远镜目镜中观察，若十字像水平线与上基准线仍保持对齐，说明载物台水平；若不再对齐，说明载物台不水平，需要调整载物台下方靠近望远镜的螺钉“C”，直至十字像的水平线与上基准线对齐，如图 2-20 所示。调好后取下双面反射镜，此时望远镜与载物台均已调节水平。

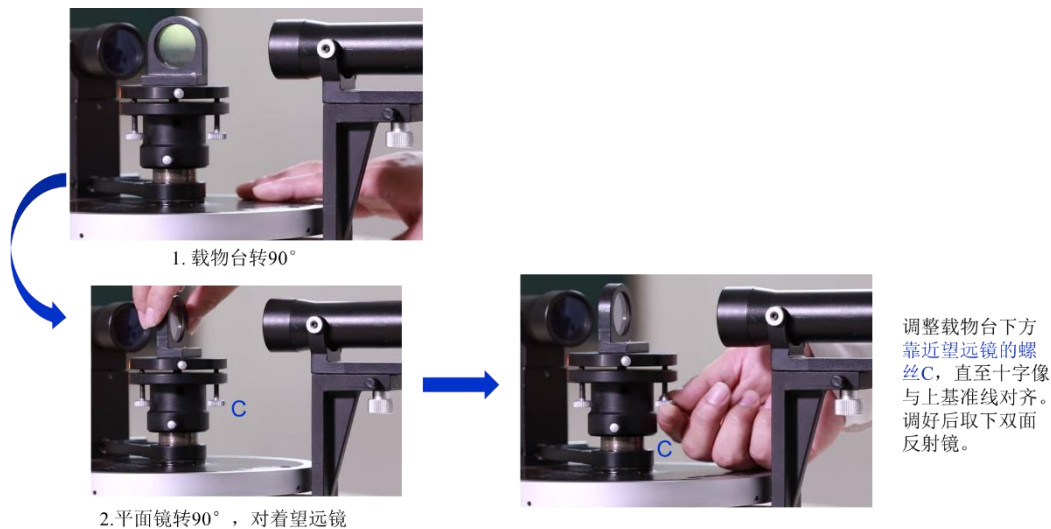


图 2-20 调整载物台下方第三颗螺钉至载物台水平

(5) 平行光管的调节

平行光管的调节如图 2-21 所示。观察狭缝成的像是否清晰时，要先把狭缝调宽，以利于人眼观察，成像清晰后再将狭缝调细。

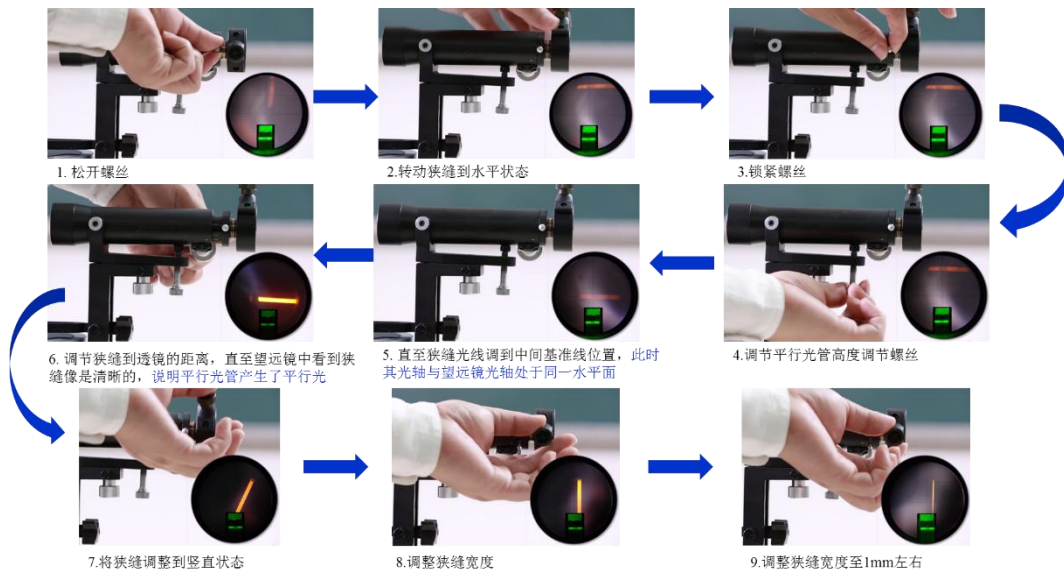


图 2-21 平行光管的调节步骤

(6) 调整平行光管与望远镜光轴同轴

转动望远镜位置，使狭缝像与分划板叉丝的竖线重合，如图 2-22 所示，表明平行光管与望远镜光轴已同轴，然后固定望远镜。

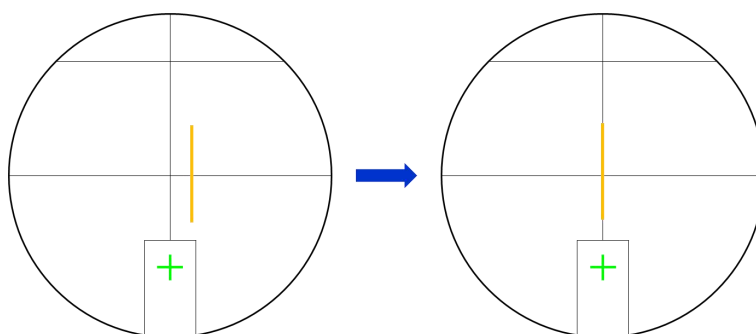


图 2-22 调整平行光管与望远镜光轴同轴

2. 调节光栅

(1) 调节光栅平面的法线垂直于仪器的主轴

目测尽可能做到使光栅平面垂直平分载物台螺钉“A”和“B”的连线，与螺钉“C”共面，如图 2-23 所示。

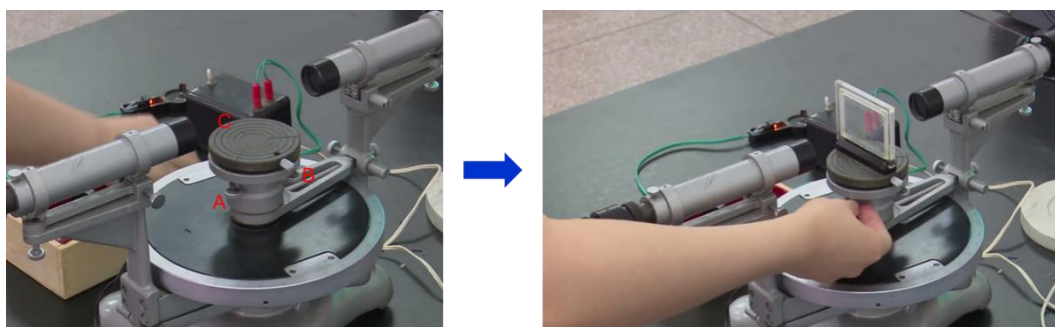


图 2-23 放置光栅及调节螺钉“A”和“B”

用自准法严格地调节载物台下的螺钉“A”和“B”，如图 2-23 所示（注意：望远镜不能再调节），直至由望远镜发出经光栅平面反射回来的绿十字像与分划板的上交叉点重合，如图 2-24 所示。注意：只需对光栅的一面进行上述调节，而不需把光栅转 180° 再进行调节。另外，由于光栅表面反射率远低于平面反射镜，反射回来的绿十字的亮度比较弱，应反复仔细调节。

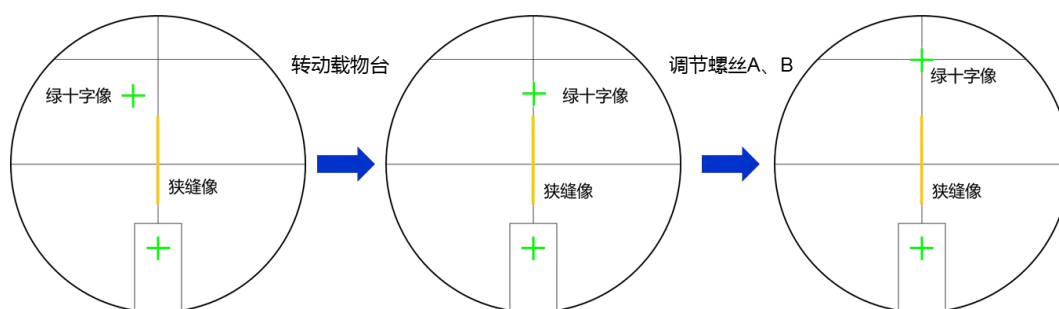


图 2-24 调节光栅平面的法线垂直于仪器的主轴

(2) 调节光栅刻痕与分光计的中心轴平行

左右转动望远镜，从目镜中观察衍射光谱线。若观察到中央亮条纹两侧的谱线不等高，调节螺钉“C”，直至两侧谱线等高，如图 2-25 所示，表明此时光栅刻痕与分光计的中心轴已

经平行。注意：这个过程中不要再调节螺钉“A”、“B”。

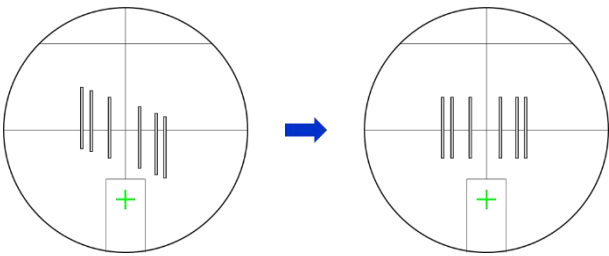


图 2-25 调节光栅刻痕与分光计的中心轴平行

3. 测定汞灯波长及角色散率

转动望远镜，分别找到绿线、黄线 1、黄线 2 在衍射级次 $k = \pm 1$ 、 ± 2 、 ± 3 时的亮纹，调至待测光的谱线（绿线、黄线 1、黄线 2）与分划板叉丝的竖线对齐，记录两游标读数，将测量数据填入记录表格中，其中光栅常数 $d=1/300\text{ mm}$ 。

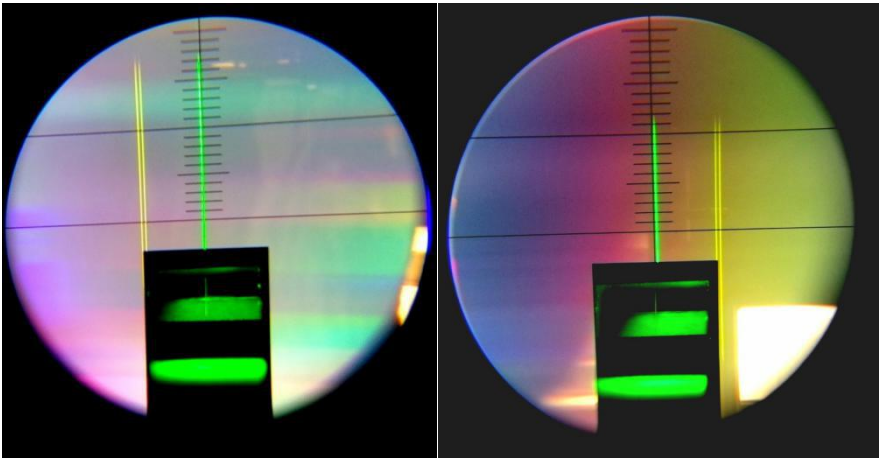


图 2-26 调节绿光的 ± 1 级衍射亮纹与分划板叉丝竖直线对齐

颜色	衍射级次 k	+		-		$\psi_k=[(\theta_1 - \theta'_1)+(\theta_2 - \theta'_2)]/4$	$\lambda_k=d \cdot \sin (\psi_k) / k$ (nm)	波长平均值 (nm)	标准波长 (nm)
		θ_1	θ_2	θ'_1	θ'_2				
绿	1								546.1
	2								
	3								
黄 1	1								577.0
	2								
	3								
黄 2	1								579.1
	2								
	3								

根据测量数据分别计算绿线、黄线 1、黄线 2 的波长值，并将计算得到的平均值与标准

值比较，计算相对误差。

根据测量结果计算衍射光栅对黄光 1 和黄光 2 的角色散率 ($D_k = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \theta}$)。

4. 观察光栅的白光衍射现象，并画出观察到的衍射图像。（选做）

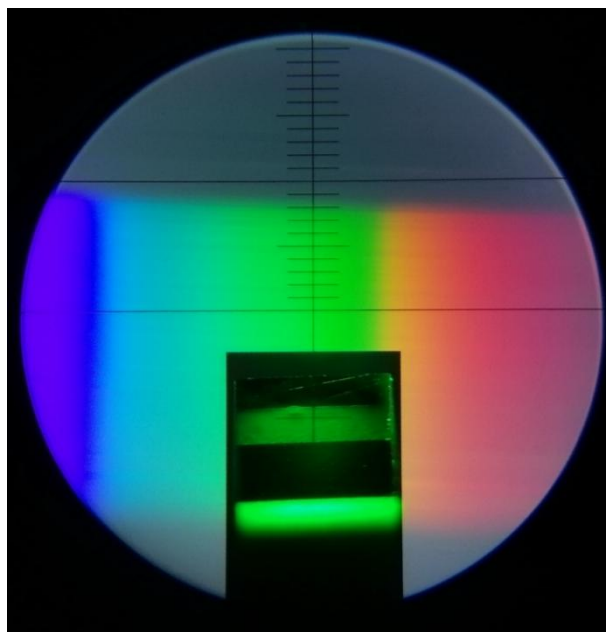


图 2-27 白光的衍射图像

四、注意事项

1. 分光计是较精密的仪器，调节时要严格按照操作规程；
2. 光栅是易损光学元件，注意轻拿轻放，以防打碎，严禁直接触摸光栅表面；
3. 为了延长汞光灯的使用寿命，严禁频繁开闭。

五、报告要求

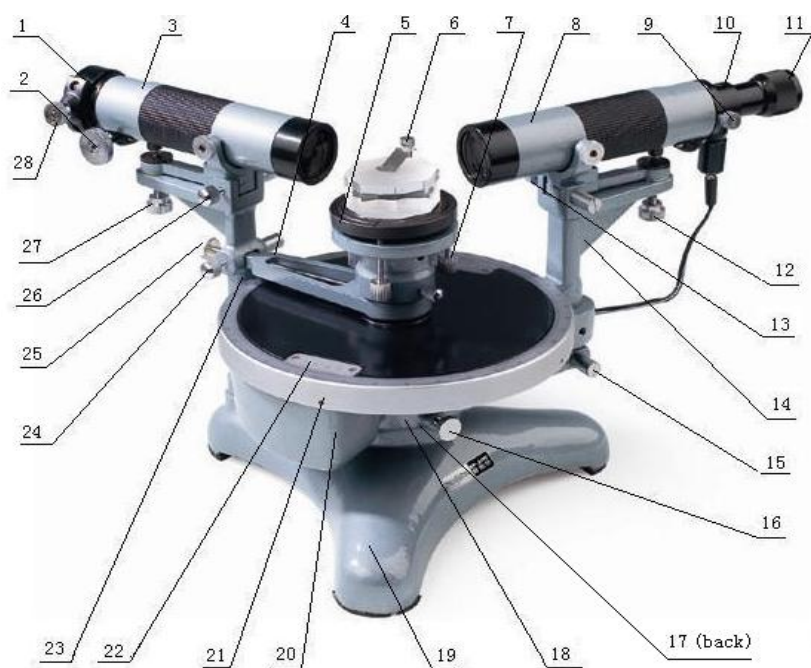
1. 分别计算相应三种颜色的光（绿光、黄光 1、黄光 2）在衍射级次 $k=1, 2, 3$ 时波长的测量值 λ_k ，并计算波长平均值 $\bar{\lambda}$ ，将 $\bar{\lambda}$ 与汞灯波长的标准值相比较，计算测量的相对误差。要求写出完整的计算过程，包括所用公式和代入实验数据后的表达式。
2. 计算衍射光栅对黄光 1 和黄光 2 在衍射级次 $k=1, 2, 3$ 时的角色散率 D_k 。
3. 画出白光光栅衍射光谱示意图并标出光谱的色序排列。（选做）

六、讨论题

教材第 1、3 题。

附录

1. 分光计的结构示意图：



望远镜：

- 9 望远镜调焦手轮
- 10 分划板
- 11 阿贝式自准直目镜
- 12 望远镜光轴高低调节螺钉
- 16 望远镜制动螺钉

平行光管：

- 1 狭缝装置
- 2 平行光管调焦手轮
- 27 平行光管光轴高低调节螺钉
- 28 狭缝宽度调节手轮

载物台：

- 5 载物台
- 7 载物台调平螺钉(三颗)

圆刻度盘：

- 21 度盘
- 22 游标盘
- 17 望远镜与刻度盘制动螺钉
- 25 游标盘制动螺钉

实验三 光的等厚干涉现象与应用

一、实验预习指导

1. 牛顿环装置介绍及牛顿环形成明暗纹半径公式；
2. 利用牛顿环测量凸透镜球面的曲率半径公式；
3. 劈尖干涉 k 级明、暗纹对应的厚度公式，劈尖测量直径的原理。

二、实验目的及任务

1. 观察等厚干涉现象，掌握干涉条纹形成的原理；
2. 利用牛顿环，测量平凸透镜球面的曲率半径；
3. 利用劈尖干涉，测量薄膜（磁带）厚度。

三、实验原理

在物理学中，光的干涉（Interference）是指两列或两列以上的光波在满足频率相同、振动方向相同、相位差恒定三个条件下，在空间中重叠发生叠加，从而在重叠区域内其光强并不是均匀分布，而是形成明暗相间的干涉条纹。在历史上，干涉现象及其相关实验是证明光的波动性的重要依据，但光的干涉性质直到十九世纪初才逐渐被人们发现，主要原因是相干光源不易获得。

为了获得可以观测到可见光干涉的相干光源，人们发明制造了各种产生相干光的光学器件以及干涉仪，例如迈克耳孙干涉仪。二十世纪六十年代之后，激光这一高强度相干光源的发明使光学干涉测量技术得到了前所未有的广泛应用，在各种精密测量中都能见到激光干涉仪的身影。

薄膜干涉（Thin-Film Interference）原理如图 3-1 所示。折射率为 n 、厚度为 d 的薄膜处于折射率为 n_1 的均匀介质中， $n > n_1$ 。波长为 λ 的光束 1 以入射角 α 入射到薄膜界面上，被薄膜的上界面分为两束 2 和 3。其中光束 2 被上界面反射；光束 3 经上界面折射进入薄膜后到达下界面，再经由下界面反射、上界面折射到达均匀介质中。

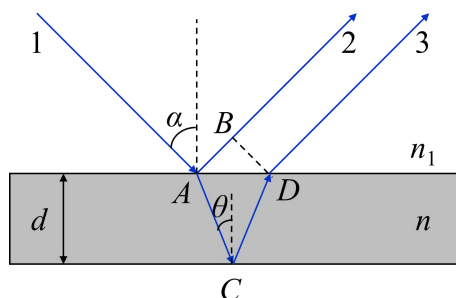


图 3-1 薄膜干涉原理

光束 2 和 3 经过了不同路径，光程差为

$$\Delta = n \cdot (|AC| + |CD|) - n_1 \cdot |AB| + \frac{\lambda}{2} \quad (3-1)$$

式 (3-1) 中加入 $\frac{\lambda}{2}$ 是因为光束 2 在上界面是从光疏介质进入光密介质反射，存在相位突变，即“半波损失” (Half Wave Loss)，如图 3-2 所示，图中的薄膜干涉发生在均匀介质与空气隙之间 (即 $n < n_1$ ，与图 3-1 相反)，所以半波损失发生在下界面。

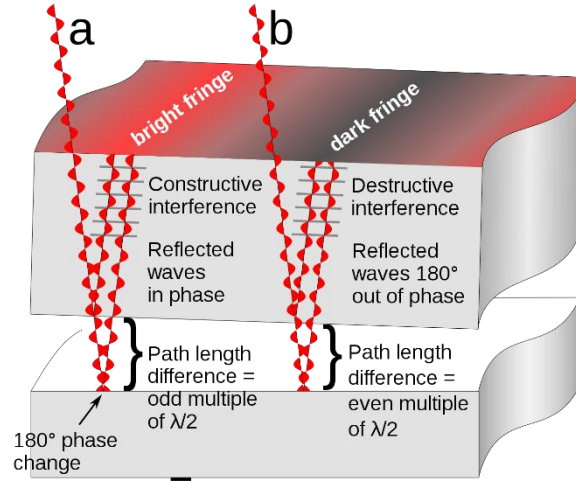


图 3-2 薄膜干涉，半波损失

由简单的几何推导可知：

$$|AB| = |AD| \cdot \sin \alpha \quad (3-2)$$

$$|AC| = |CD| = \frac{d}{\cos \theta} \quad (3-3)$$

$$|AD| = 2|AC| \sin \theta \quad (3-4)$$

由折射定律可知：

$$n \cdot \sin \theta = n_1 \cdot \sin \alpha \quad (3-5)$$

将式 (3-2)、(3-3)、(3-4)、(3-5) 带入式 (3-1) 得到光程差的表达式为：

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} \quad (3-6)$$

如果光是垂直于薄膜入射的，即 $\alpha=0$ ，则光程差的表达式为：

$$\Delta = 2nd + \frac{\lambda}{2} \quad (3-7)$$

如果光程差为半波长的奇数倍，即

$$\Delta = 2nd + \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \frac{\lambda}{2} \quad (m=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3-8)$$

则干涉结果为光强极小，形成暗纹。

如果光程差为半波长的偶数倍，即

$$\Delta = 2nd + \frac{\lambda}{2} = 2m \cdot \frac{\lambda}{2} = m \cdot \lambda \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (3-9)$$

则干涉结果为光强极大，形成亮纹。

由式 (3-8) 和 (3-9) 可知，干涉条纹的级数 m 与薄膜厚度 d 有一一对应关系，同一级干涉条纹所对应的薄膜厚度相等，如图 3-2 所示。因此这种干涉现象被称为“等厚干涉” (Interference of Equal Thickness)。

牛顿环 (Newton's Rings) 是一种等厚干涉现象。将一块平凸透镜凸面朝下放在一块平面透镜上，将单色光直射向凸透镜的平面，如图 3-3 所示。这时可以观察到一个个明暗相间的圆环条纹，如图 3-4 所示。若使用白光，则可以观察到彩虹状的圆环彩色条纹，如图 3-5 所示。第一个对此现象进行分析的人是英国物理学家艾萨克·牛顿，因而命名为牛顿环。

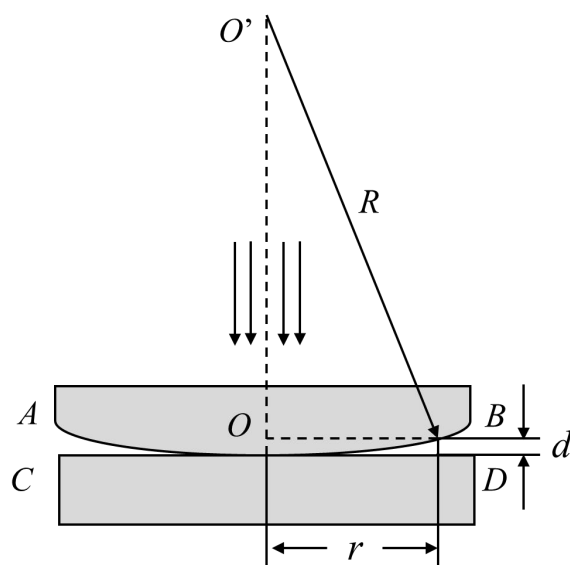


图 3-3 牛顿环原理

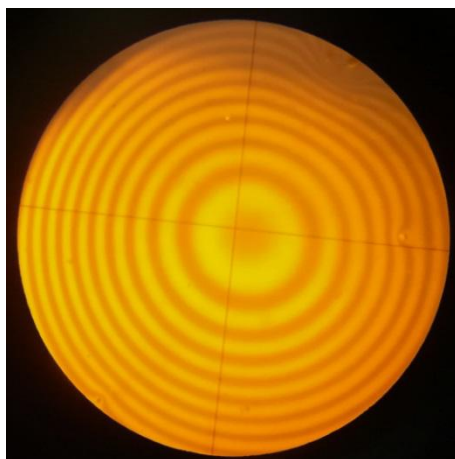


图 3-4 牛顿环干涉图样 (单色光)

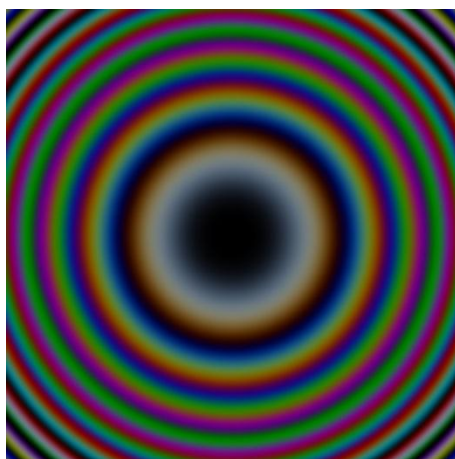


图 3-5 牛顿环干涉图样（白光）

设牛顿环的第 m 级暗环半径为 r_m ，该处对应的空气隙厚度为 d ，凸透镜的凸面曲率半径为 R ，结合图 3-3 可知：

$$R^2 = (R-d)^2 + r_m^2 \quad (3-10)$$

由式（3-10）得到 d 的表达式为

$$d = R - \sqrt{R^2 - r_m^2} \quad (3-11)$$

将式（3-11）带入式（3-8），空气隙折射率取 $n=1$ ，得到第 m 级暗环半径 r_m 的表达式为

$$r_m = \sqrt{m\lambda \left(R - \frac{m\lambda}{4} \right)} \quad (3-12)$$

牛顿环用的是可见光，光波长 λ 为数百纳米，凸透镜凸面曲率半径 $R \gg \lambda$ ，因此 $R - \frac{m\lambda}{4} \approx R$ ，式（3-12）可简化为

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad (3-13)$$

由式（3-13）可知，若已知光的波长 λ ，则只需要测出第 m 级暗环半径 r_m ，即可计算得到凸面曲率半径 R 。同样地，若已知凸面曲率半径 R ，测出 r_m ，也可以计算得到光的波长 λ 。

由于实际的牛顿环中心是一个圆斑，直接测量 r_m 很困难，甚至想要确定其级次 m 也很困难。因此，在实际测量中，我们是直接测量环的直径 D_m ，则有

$$D_m = 2\sqrt{m\lambda R} \quad (3-14)$$

另一方面，由于确定暗环的绝对级次很困难，而且为了减小测量误差，进行多次测量以便于用逐差法处理数据。只需要测出多组相对级次为 m 和 k 的暗环的直径 D_m 和 D_k ，利用式（3-14）可得到凸透镜的凸面曲率半径为

$$R = \frac{D_m^2 - D_k^2}{4(m-k)\lambda} \quad (3-15)$$

值得一提的是，牛顿虽然发现了牛顿环，并且做了精确的定量测定，可以说牛顿环是光的波动性的极好证明。但是牛顿过分偏爱自己的微粒说，他对牛顿环现象的解释是：组成光的微粒在经过界面的时候会进入一种特殊的暂时的状态，在传播的过程中等间隔地复原，并且在复原的时候更加容易地通过下一个界面，而在两次复原之间的时候就会更加容易被反射。

劈尖干涉（Wedge Interference）原理如图 3-6 所示。将两块光滑的平玻璃板叠在一起，在一端插入薄片（例如录音带），则会在两玻璃板之间形成一个空气劈尖。用单色光垂直照射时，将发生等厚干涉，形成一系列明暗相间的干涉条纹。

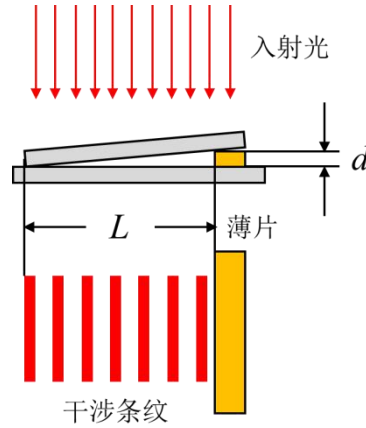


图 3-6 劈尖干涉

设某一条干涉条纹处的劈尖厚度为 d ，光波长为 λ ，空气的折射率取 $n=1$ ，根据式 (3-7) 得到光程差为

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} \quad (3-16)$$

当

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3-17)$$

时，得到第 k 级暗条纹，其相应的厚度为

$$d_k = k \frac{\lambda}{2} \quad (3-18)$$

由式 (3-18) 可以看到， $k=0$ 时， $d_k=0$ ，即两玻璃板接触处为零级暗条纹。若薄片处在第 k 级暗条纹处，则只需要数出二者之间的条纹总数 N ，则可以计算得到薄片的厚度 d 为

$$d = (N-1) \frac{\lambda}{2} \quad (3-18)$$

实际操作时，可以先测得从玻璃边缘到薄片边缘间的总长度 L 以及条纹间距，然后计算出条纹总数 N 。

光的等厚干涉可用于检验工件表面的平整度，如图 3-7 所示。

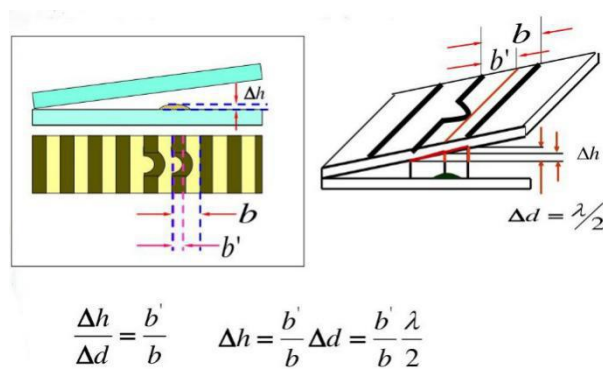


图 3-7 等厚干涉用于检验工件表面的平整度

四、操作要点

1. 打开钠光灯（钠光灯波长为 589.30nm）；
2. 观察牛顿环平透镜与平板玻璃的接触点是否偏离中心，若偏离中心须调节夹具上的三个螺钉，使接触点定在中心（注：不要拧得太紧，用力过大会使牛顿环玻璃破碎）；
3. 显微镜调节：首先调节目镜使十字叉丝清晰，再调节 45 度反射镜，再由下向上缓慢地移动物镜对其调焦，使牛顿环条纹的像清晰且与叉丝无视差，转动测微鼓轮，使十字丝交点接近牛顿环中心；
4. 测量平凸球面的曲率半径：转动测微鼓轮使叉丝超过第 35 环，然后倒回到第 31 环位置开始读数，从左往右（或从右往左）依次记录序数为第 31 至 10 环的位置读数，再越过环心（暗斑），开始从右侧（或左侧）读取第 10 至 31 环的位置读数，记录于下列表格中（注意：为避免测微螺杆间隙所引起的空回误差，测量时必须使显微镜从左到右（或从右到左）作单方向移动）；

环的序数	m	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
环的位置读数 /mm	左											
	右											
环的直径 $D_m = \text{左} - \text{右} $												
D_m^2												

环的序数	n	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
------	-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

环的位置读数 /mm	左											
	右											
环的直径 $D_n = \text{左} - \text{右} $												
D_n^2												
$D_m^2 - D_n^2$												
平均值 $\overline{D_m^2 - D_n^2}$												
误差 $\Delta(D_m^2 - D_n^2)$												

5. 数据处理

用逐差法求 $D_m^2 - D_n^2$ 的平均值；计算曲率半径 R 的平均值及不确定度。

$$\text{注意: } R = \bar{R} \pm U_{\bar{R}} \quad \bar{R} = \frac{\overline{(D_m^2 - D_n^2)}}{4(m-n)\lambda}$$

$$E = \frac{U_{\bar{R}}}{\bar{R}} \times 100\% \quad U_{\bar{R}} = \frac{U_{\overline{D_m^2 - D_n^2}}}{4(m-n)\lambda}$$

$$U_{\overline{D_m^2 - D_n^2}} = \sqrt{S_{\overline{D_m^2 - D_n^2}}^2 + u^2} \approx S_{\overline{D_m^2 - D_n^2}} = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{11} [(D_m^2 - D_n^2)_i - \overline{(D_m^2 - D_n^2)}]^2}$$

6. 测量录音磁带的厚度

将录音带夹在两块平玻璃之间，构成空气劈尖，然后置于显微镜载物台上。用显微镜观察劈尖干涉图像。测量 10 个条纹间距总长度 l ，测 5 次取平均值，并计算单位长度内的

干涉条纹数 h ；测量劈棱到磁带端的总长度 L ，测 5 次取平均值 \bar{L} 。计算磁带厚度

$$d = h \bar{L} \frac{\lambda}{2} \text{ 的平均值。}$$

五、讨论题

1. 理论上牛顿环中心是个暗点，实际上看到的往往是个忽明忽暗的班，其原因是什么？

对透镜曲率半径 R 测量有无影响？

2. 实验中，若平板玻璃上有微小的凸起，则凸起处的干涉条纹会发生如何变化？

实验四 准稳态法测不良导体的比热容和导热系数

一、实验预习指导

1. 比热容和导热系数的定义是什么？
2. 准稳态法如何测量导热系数和比热容？

二、实验目的及任务

1. 了解准稳态法测量导热系数和比热容的原理。
2. 学习热电偶测量温度的原理和使用方法。
3. 利用准稳态法测量不良导体的导热系数和比热容。

三、实验原理

1. 准稳态法测量原理

考虑如图 4-1 所示的一维无限大导热模型：一无限大不良导体平板厚度为 $2R$ ，初始温度为 t_0 ，现在平板两侧同时施加均匀的指向中心面的热流密度 q_c ，则平板各处的温度 $t(x, \tau)$ 将随加热时间 τ 而变化。

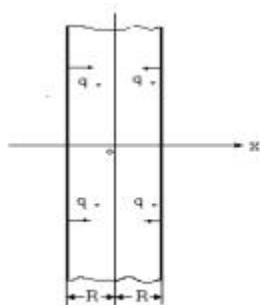


图 4-1 理想中的无限大不良导体平板

以试样中心为坐标原点，上述模型的数学描述可表达如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial t(R, \tau)}{\partial x} = \frac{q_c}{\lambda} & \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0 \\ t(x, 0) = t_0 \end{cases}$$

式中 $a = \lambda / \rho c$ ， λ 为材料的导热系数， ρ 为材料的密度， c 为材料的比热。

可以给出此方程的解为：

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \tau + \frac{1}{2R} x^2 - \frac{R}{6} + \frac{2R}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos \frac{n\pi}{R} x \cdot e^{-\frac{an^2\pi^2}{R^2}\tau} \right) \quad (4-1)$$

考察 $t(x, \tau)$ 的解析式 (4-1) 可以看到, 随加热时间的增加, 样品各处的温度将发生变化, 而且我们注意到式中的级数求和项由于指数衰减的原因, 会随加热时间的增加而逐渐变小, 直至所占份额可以忽略不计。

定量分析表明当 $\frac{a\tau}{R^2} > 0.5$ 以后, 上述级数求和项可以忽略。这时式 (4-1) 变成:

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{a\tau}{R} + \frac{x^2}{2R} - \frac{R}{6} \right] \quad (4-2)$$

这时, 在试件中心处有 $x = 0$, 因而有:

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{a\tau}{R} - \frac{R}{6} \right] \quad (4-3)$$

在试件加热面处有 $x = R$, 因而有:

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left[\frac{a\tau}{R} + \frac{R}{3} \right] \quad (4-4)$$

由式 (4-3) 和 (4-4) 可见, 当加热时间满足条件 $\frac{a\tau}{R^2} > 0.5$ 时, 在试件中心面和加热面处温度和加热时间成线性关系, 温升速率同为 $\frac{aq_c}{\lambda R}$, 此值是一个和材料导热性能和实验条件有关的常数, 此时加热面和中心面间的温度差为:

$$\Delta t = t(R, \tau) - t(0, \tau) = \frac{1}{2} \frac{q_c R}{\lambda} \quad (4-5)$$

由式 (4-5) 可以看出, 此时加热面和中心面间的温度差 Δt 和加热时间 τ 没有直接关系, 保持恒定。系统各处的温度和时间是线性关系, 温升速率也相同, 我们称此种状态为准稳态。

当系统达到准稳态时, 由式 (5) 得到

$$\lambda = \frac{q_c R}{2\Delta t} \quad (4-6)$$

根据式 (4-6), 只要测量出进入准稳态后加热面和中心面间的温度差 Δt , 并由实验条件确定相关参量 q_c 和 R , 则可以得到待测材料的导热系数 λ 。

另外在进入准稳态后, 由比热的定义和能量守恒关系, 可以得到下列关系式:

$$q_c = c\rho R \frac{dt}{d\tau} \quad (4-7)$$

比热为:

$$c = \frac{q_c}{\rho R \frac{dt}{d\tau}} \quad (4-8)$$

式中 $\frac{dt}{d\tau}$ 为准稳态条件下试件中心面的温升速率（进入准稳态后各点的温升速率是相同的）。

由以上分析可以得到结论：只要在上述模型中测量出系统进入准稳态后加热面和中心面间的温度差和中心面的温升速率，即可由式（4-6）和式（4-8）得到待测材料的导热系数和比热。

2. 热电偶温度传感器

热电偶结构简单，具有较高的测量准确度，可测温度范围为-50~1600℃，在温度测量中应用极为广泛。

由 A、B 两种不同的导体两端相互紧密的连接在一起，组成一个闭合回路，如图 4-2（a）所示。当两接点温度不等（ $T > T_0$ ）时，回路中就会产生电动势，从而形成电流，这一现象称为热电效应，回路中产生的电动势称为热电势。

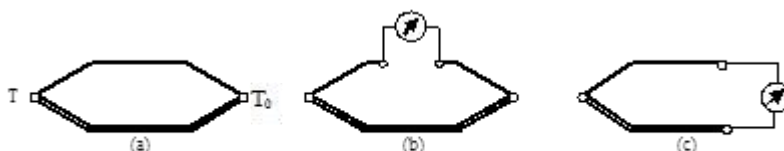


图 4-2 热电偶原理及接线示意图

上述两种不同导体的组合称为热电偶，A、B 两种导体称为热电极。两个接点，一个称为工作端或热端（T），测量时将它置于被测温度场中，另一个称为自由端或冷端（ T_0 ），一般要求测量过程中恒定在某一温度。

理论分析和实践证明热电偶的如下基本定律：

热电偶的热电势仅取决于热电偶的材料和两个接点的温度，而与温度沿热电极的分布以及热电极的尺寸与形状无关（热电极的材质要求均匀）。

在 A、B 材料组成的热电偶回路中接入第三导体 C，只要引入的第三导体两端温度相同，则对回路的总热电势没有影响。在实际测温过程中，需要在回路中接入导线和测量仪表，相

当于接入第三导体，常采用图 4-2（b）或（c）的接法。

热电偶的输出电压与温度并非线性关系。对于常用的热电偶，其热电势与温度的关系由热电偶特性分度表给出。测量时，若冷端温度为 0℃，由测得的电压，通过对应分度表，即可查得所测的温度。若冷端温度不为零度，则通过一定的修正，也可得到温度值。在智能式测量仪表中，将有关参数输入计算程序，则可将测得的热电势直接转换为温度显示。

四、操作要点

1. 安装样品并连接各部分电路

如图 4-3 所示，将样品放进样品测试架中。热电偶的测温端应保证置于样品的中心位置，防止由于边缘效应影响测量精度。中心面横梁的热电偶应该放到样品 2 和样品 3 之间，加热面热电偶应该放到样品 3 和加热膜之间。然后旋动螺杆旋钮，压紧样品，然后连接线路。

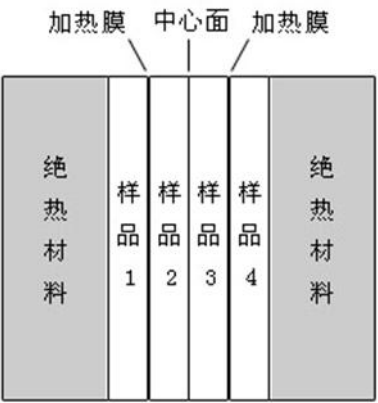


图 4-3 被测样品安装图

2. 设定加热电压

检查各部分接线，确保无误后开机。主机启动后，应该先设定所需要的加热电压，通过旋转光电编码器调节加热电压（参考加热电压：16~19V）。

3. 测定样品的温度差和温升速率

在调整加热电压后，两加热膜即已经开始加热工作了，同时显示屏上实时显示出加热面、中心面的热电势值。设定记录步长（一般选 30s）。点击“记录”按钮，则屏幕显示温差电动势随时间变化的曲线，红色为加热面热电势曲线，蓝色为中心面热电势曲线，绿色为二面热电势的差值曲线，纵轴热电势单位 mV，横轴为时间。同时，在屏幕下方记录有加热面和中心面的温差电动势值。

手工记录加热面和中心面的温差电动势值 S_1 ， S_2 。

根据记录的数据，分析加热面与中心面电动势的差值和中心面（或加热面）每 5 分钟的

电动势升高值，找出最接近准稳态的 20 组数据填入表 4-1。

由于实验条件不能完全满足理想模型，如边缘效应随试样温度升高而加剧等，试样温度不可能保持理想的准稳态。延长测量时间也无益，实验一般最多持续 35 分钟。

如果操作不当，如热电偶没有置于试样中心或试样没有靠紧加热膜等等问题，都观察不到准稳态。如果重做实验，必须用充分冷却的试样。充分冷却的试样，内部和表面都有相同的温度。

表 4-1 导热系数及比热测定 加热电压 $V =$ (V)，加热膜电阻 $r =$ (Ω)，试样厚度 $R =$ (m)

记录点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间 τ (min)										
加热面热电势 S_1 (mV)										
中心面热电势 S_2 (mV)										
两面热电势之差 V_t (mV)										
5 分钟热电势升高 $\Delta V_h = S_{i+10} - S_i$ (mV)										

记录点	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
时间 τ (min)											——
加热面热电势 S_1 (mV)											——
中心面热电势 S_2 (mV)											——
两面热电势之差 V_t (mV)											
5 分钟热电势升高 $\Delta V_h = S_{i+10} - S_i$ (mV)	——	——	——	——	——	——	——	——	——	——	——

当测完一种样品需要更换样品进行下一次实验时，其操作顺序是：关闭主机电源开关→旋螺杆以松开实验样品→取下热电偶传感器→取出实验样品→等待加热薄膜冷却（等待 15 分钟左右）。

五、注意事项

1. 在取样品的时候，必须先将中心面横梁热电偶取出，再取出实验样品。严禁以热电偶弯折的方法取出实验样品，这极易损坏热电偶；
2. 加热电压设定后不能再改变；
3. 当测完一种样品需要更换样品进行下一次实验时，需等待加热膜冷却后再操作。

六、报告要求

1. 在坐标纸上分别画出 $\Delta T-\tau$ 及 $T-\tau$ 曲线，从图上判断何时进入准稳态，并求出 ΔT 及 $dT/d\tau$ ；
2. 计算有机玻璃样品和橡胶样品的导热系数和比热容。

七、讨论题

1. 本实验中我们采取在样品两端加热的方式根据加热面与中心面的温差及端面温升速率求出导热系数和比热。实验中为何使用四块样品？
2. 本实验中判断系统进入准稳态的条件是什么？
3. 本实验中准稳态会无限保持下去吗？是否时间越长实验数据越好？

八、实验仪器参数

实验材料参量分别如下：

1. 样品厚度 $R=0.010\text{m}$
2. 有机玻璃密度 $\rho=1196\text{kg/m}^3$ ，橡胶密度 $\rho=1374\text{kg/m}^3$

3. 热流密度 $q_c = \frac{AV^2}{2Fr} \text{ W/m}^2$

式中 V 为加热器的工作电压， $F = 0.090\text{m} \times 0.090\text{m}$ 为加热面积， A 为考虑边缘效应后的修正系数，对于有机玻璃和橡胶， $A = 0.85$ ， r 为加热面横梁下加热膜的电阻。

4. 铜—康铜热电偶的热电常数为 $S=0.040\text{ mV/K}$ 。即在实验温差范围内，热电势与温差成线性关系，温度每差 1 度，温差热电势为 0.040 mV 。

$$\text{温度差 } \Delta T = \frac{V_t}{S} = \frac{V_t}{0.040} \quad (\text{K}), \quad \text{温升速率 } \frac{dT}{d\tau} = \frac{\Delta V}{5 \times 60 \times 0.040} \quad (\text{K/s}).$$

实验五 太阳能电池的基本特性研究

一、实验预习指导

1. 太阳能电池的基本结构和工作原理是什么？
2. 太阳能电池的开路电压、短路电流、最佳匹配负载和填充因子的物理含义是什么？

二、实验目的及任务

1. 了解太阳能电池的基本结构和工作原理；
2. 掌握太阳能电池基本特性参数测试原理和方法；
3. 掌握图表法处理分析数据。

三、操作要点

1. 硅太阳能电池的暗特性测量

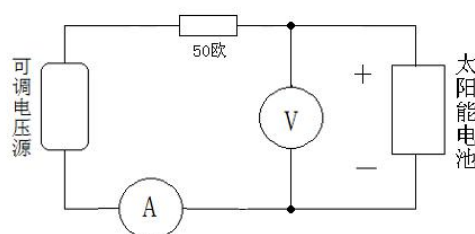


图 5-1 伏安特性测量电路图

将太阳能电池用遮光罩罩住，电阻箱调至 50Ω 插入一块硅太阳能电池，电源端为太阳能电池特性测试仪“电压输出”接口。按图 5-1 连线。

将电压源调到 $0V$ ，然后逐渐增大输出电压，每间隔 $0.3V$ 记一次电流值。记录到表 5-1 中。

将电压调到 $0V$ ，然后将“电压输出”接口的两根连线互换（即加上反向电压），逐渐增大反向电压，每间隔 $1V$ 记一次电流值，记录到表 5-1 中。

更换硅太阳能电池，重复之前步骤，记录到表 5-1 中。

表 5-1 太阳能电池的暗伏安特性测量

电压 (V)	电流(mA)		
	单晶硅	多晶硅	非晶硅
-7			
.....			
-1			
0			
0.3			
.....			
3.0			

2. 开路电压、短路电流与光强关系测量

光源开关已经预热至少 20 分钟。打开遮光罩。将光强探头装在太阳能电池板位置，探头输出线连接到太阳能电池特性测试仪的“光强输入”接口上。测试仪设置为“光强测量”。由近及远移动滑动支架，测量距光源一定距离的光强 I ，将测量到的光强记入表 5-2。按图 5-2A 和 B 依次重新连接线路，输出线分别连接到太阳能电池特性测试仪的“电压输入”和“电流输入”接口上。由近及远移动滑动支架分别测量硅太阳能电池的开路电压和短路电流。

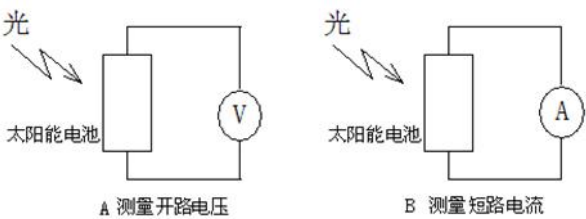


图 5-2 开路电压、短路电流测量图

表 5-2 两种太阳能电池开路电压与短路电流随光强变化关系

距 离(cm)		15	20	25	30	35	40	45	50
光强 I (W/m^2)									
单 晶 硅	开路电压 V_{oc} (V)								
	短路电流 I_{sc} (mA)								
多 晶 硅	开路电压 V_{oc} (V)								
	短路电流 I_{sc} (mA)								
非 晶 硅	开路电压 V_{oc} (V)								
	短路电流 I_{sc} (mA)								

3. 太阳能电池输出特性测试

按图 5-3 接线，以电阻箱作为太阳能电池负载。

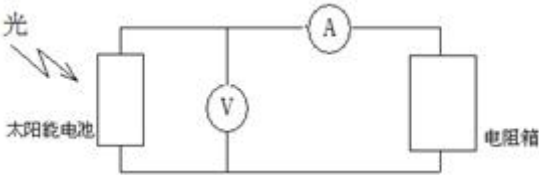


图 5-3 测量太阳能电池输出特性

在一定光照强度下（将滑动支架固定在导轨上某一个位置，如 40cm，记录下光强值），分别将三种太阳能电池板安装到支架上，通过改变电阻箱的电阻值，记录三种太阳能电池的输出电压 V 和电流 I ，并计算输出功率 P_o ，填于表 5-3 中。电压变化从 0V 开始，间隔为 0.2V，一直变化到开路电压为止（如果无法精确达到开路电压，则取电阻达到最大时的值）。

表 5-3 两种太阳能电池输出特性实验

光强 $I =$ W/m^2

单晶硅	输出电压 $V(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	...
	输出电流 $I(mA)$										
	输出功率 $P_o(W)$										
多晶硅	输出电压 $V(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	...
	输出电流 $I(mA)$										
	输出功率 $P_o(W)$										
非晶硅	输出电压 $V(V)$	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	...
	输出电流 $I(mA)$										
	输出功率 $P_o(W)$										

四、注意事项

1. 实验一开始就打开电源预热光源。不可长时间直视光源。
2. 光源工作及关闭后的约 1 小时期间，灯罩表面的温度都很高，请不要触摸，不要用任何物品挡住光源。
3. 在预热光源的时候，需用遮光罩罩住太阳能电池，以降低太阳能电池的温度，减小实验误差。
4. 更换硅太阳能电池时，注意用手遮挡电池，以避免接收光源照射。
5. 测量时按照实际情况变更电流表、电压表、光强表量程，确保读数至少有两位小数。
6. 线路如果连错，立刻关闭电源重新连线。
7. 变更测量用仪表时，需要确保连接之前仪表的所有线已经拔下。

五、报告要求

1. 画出单晶硅、多晶硅、非晶硅暗伏安特性曲线。
2. 根据表 5-2 数据，画出三种太阳能电池的开路电压随光强变化的关系曲线以及短路电流随光强变化的关系曲线。
3. 根据表 5-3 数据作三种太阳能电池的输出伏安特性曲线及功率曲线。计算最大功率 P_{max} 和最佳匹配负载电阻。
4. 根据表 5-3 数据计算三种太阳能电池的填充因子和转换效率。转换效率为：

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{P_{\max}}{SI}$$

其中 S 为太阳能电池面积（按 50mm*50mm 计算）， I 为光强。

5. 分析可能的误差来源。

六、讨论题

1. 太阳能电池的工作原理是什么？
2. 如何根据伏安特性曲线计算太阳能电池的最大输出功率和相应的最佳匹配电阻？

实验六 DIY 实验——磁耦合谐振式无线电力传输实验研究

一、实验预习指导

1. 磁耦合谐振的物理原理是什么？
2. LC 谐振电路的固有频率以及线圈的电感参量如何计算？
3. 本实验采用的磁耦合谐振式无线电力传输系统包括振荡电路，开关电路，发射电路和接收电路，画出系统图，弄清楚开关电路的原理，振荡电路采用什么形式的信号？发射电路和接收电路分别采用哪种 LC 谐振电路？

二、实验原理

1. 磁耦合谐振原理

磁耦合是指两个线圈通过磁场产生相互作用，线圈间的耦合是通过电磁感应来实现的。线圈 1 为一次侧线圈，2 为二次侧线圈。如果 1 和 2 通过磁场耦合时一次侧电路和二次侧电路的谐振频率相同，则 1 和 2 发生磁耦合谐振，电能通过磁场传输媒介到达二次侧线圈，驱动 2 所连接的负载。

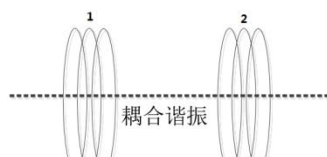


图 6-1 耦合谐振系统原理图

当振荡电路的振荡频率和发射电路的固有频率相一致时，发射电路会在空间产生最大的交变磁场，而当接收电路的固有频率也和发射电路的振荡频率一致时，电磁感应也会在接收电路中产生最大的电能吸收，这时电力传输效率最高，我们把这种交变磁场产生的耦合叫做**谐振式磁耦合**。

LC 谐振电路固有频率的计算公式为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

2. LC 串联谐振特性

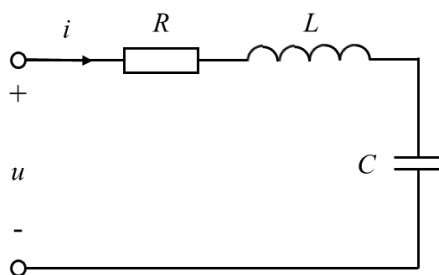


图 6-2 LC 串联电路

串联谐振线路阻抗为

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = R\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2} = R\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}$$

其中，品质因数 $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ，固有频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。当激励频率 ω 与

固有频率 ω_0 相同时，电容和电感的交流阻抗大小相等，相位相反，回路总阻抗最小，等于 R ，表现为纯电阻性，电阻电压等于电源电压。这时如果线路的 $Q \gg 1$ ，则电感和电容两端电压远大于电源电压，所以串联谐振也叫作**电压谐振**，常用于信号电压的放大。

3. LC 并联谐振特性

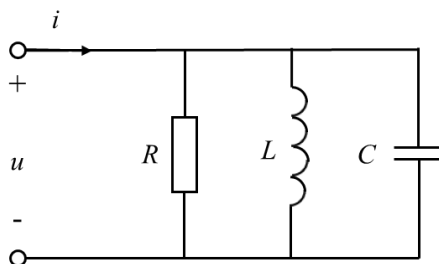


图 6-3 LC 并联电路

并联谐振线路阻抗为

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$$

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1 + R^2\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$

当 $\omega = \omega_0$ 时，电路发生谐振，此时电感和电容上的电流大小相等，等于电阻上电流的 Q

倍，相位相反，电阻电流与电源电流相等。若 $Q \gg 1$ ，则电感和电容上的电流远大于电源电流，因此并联谐振也称为**电流谐振**。

三、实验装置

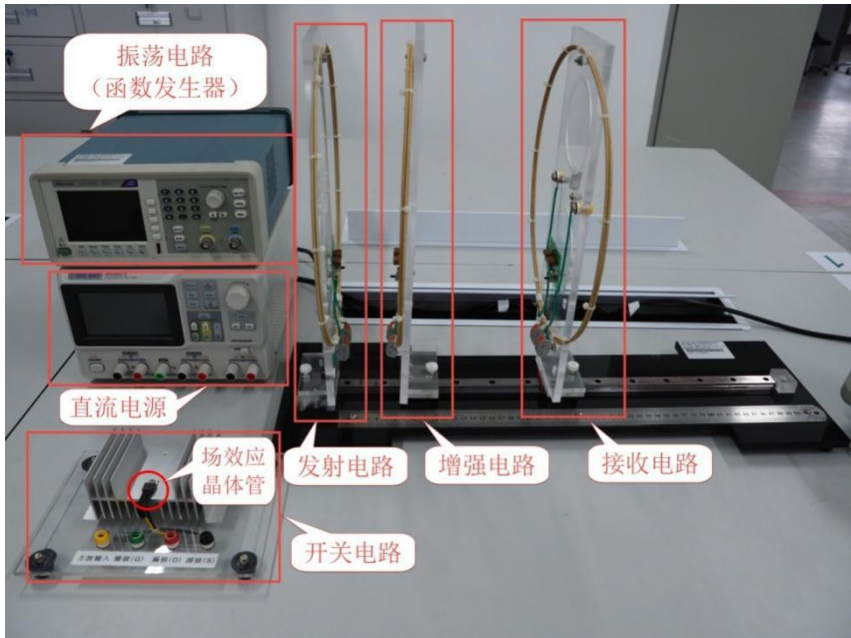


图 6-4 实验装置图

1. 开关电路

开关电路的作用是控制主电路的通断，进而实现发射电路的间歇充放电，让线圈产生交变磁场。本实验采用型号为 IRF840 的 N 沟道增强型场效应晶体管来实现电路开关。管脚 G(1) 称为栅极，是控制极，S(2) 称为源极，D(3) 称为漏极。在栅极上加电压，可以控制源极与漏极连通，不加电压，可控制源极与漏极断开。

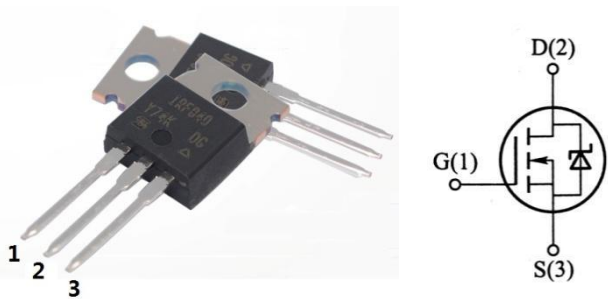


图 6-5 IRF840 场效应晶体管

2. 振荡电路

采用函数信号发生器输出**方波信号**控制开关电路工作，信号线的红色线连接控制极栅极（G），黑色线接地（与源极共地），方波高电平设置 8V，低电平设置 0V，当信号为高电平时，源极 S 与漏极 D 连通，低电平时断开，实现间歇充放电，让发射电路产生交变磁场。

3. 发射电路与接收电路

本实验装置的发射电路采用 LC 并联电路（谐振时，流过电源的电流较小），接收电路为 LC 串联电路（谐振时，流过小灯泡负载的电流较大），发射电路、接收电路与增强电路的固有频率一致（其中线圈电感值 $L=3.4\mu\text{H}$ ，电容值 $C=1.5\text{nF}$ 。注意：仪器通过实验台上一个接口电路板上的“选择开关”，可以选择并联两个电容进入电路，电容值为 3nF）。

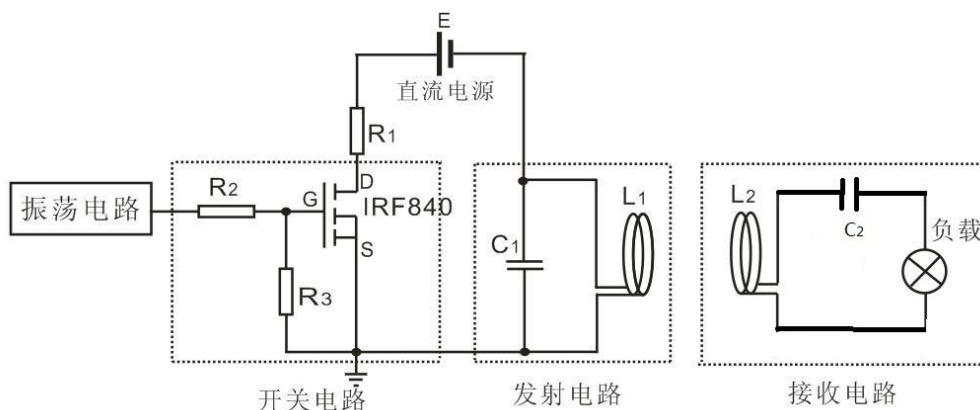
当振荡电路（函数信号发生器）调节到共振频率附近时，发射电路的线圈中会产生幅值最大的交变电流，在空间中激发出最大的交变磁场，接收电路通过磁耦合共振效应接收电能，驱动负载（小灯泡）工作。

四、实验内容

1. 确定 LC 谐振电路的固有频率。

根据实验提供的发射电路和接收电路的电感和电容，计算其固有频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

2. 按照下图完成实验系统的连接。



3. 选取振荡信号，确定谐振频率 f_0 。

- (1) 利用信号发生器输出频率可调的**方波**振荡信号，信号高电平设置 8 V，低电平 0V，设置好后打开通道开关。
- (2) 直流电源电压设置 12V、电流 1 A，设置好后打开对应通道开关。

- (3) 调节信号发生器的振荡频率在 LC 谐振电路的固有频率 f 附近，通过接收电路上的负载小灯泡的亮度定性观察磁耦合谐振电能传输现象，当小灯泡最亮，其两端电压信号（通过示波器观察）为标准正弦信号且峰峰值最大时，记录此时振荡频率 f_0 ，即为实验仪器的谐振频率。

4. 研究振荡器工作频率对电力传输效率的影响

固定接收线圈与发射线圈的距离，如 25 厘米，找到增强电路使传输效果最好的位置固定下来。改变振荡频率，利用示波器测量接收电路负载的电压信号峰峰值，完成表格 1 并绘制幅度-频率曲线。

表 1 接收信号幅度与振荡电路频率关系

频率(kHz)	$f_0-160\text{kHz}$	$f_0-80\text{kHz}$	$f_0-40\text{kHz}$	$f_0-20\text{kHz}$	f_0	$f_0+20\text{kHz}$	$f_0+40\text{kHz}$	$f_0+80\text{kHz}$	$f_0+160\text{kHz}$
峰峰值(V _{pp})									

5. 研究无线电力传输的距离对传输效果影响

调节信号发生器输出频率的大小使电路工作在谐振频率 f_0 之下，改变接收线圈与发射线圈的距离，利用示波器测量接收电路的信号幅度，完成表格 2 并绘制灯泡电压-距离曲线。

表 2 接收信号幅度与距离关系

距离(cm)	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37
峰峰值(V _{pp})										

6. 利用实验室提供的铜线自制 2 个电感线圈（可以和实验室提供的形状、匝数不同），选择合适的电容（提供 1.5nF 和 1.02nF 两种规格），测量绕制电感线圈的电感值，焊接电容后，将此谐振器作为发射线圈，另焊接一个接收线圈，将发射线圈接入振荡电路，测量谐振频率值，与计算值进行比较。观察小灯泡的亮度变化，对产生的实验现象给出解释。

密集绕制的线圈，如果绕制规则，则线圈电感大小可以用如下公式进行计算：

$$L = N^2 R \mu_0 \left[\ln \left(\frac{8R}{a} \right) - 1.75 \right]$$

式中， N ——线圈匝数，

μ_0 ——真空磁导率，

R ——线圈半径，

a ——铜线半径。

五、注意事项

实验时在偏离谐振频率的情况下，电源电压要调低一些，一般不要超过 15 伏，以防电流过大损坏仪器，另外不要让系统长时间工作在远离谐振频率的区域，离开实验设备时，请关闭振荡电路的通道开关。

六、报告要求

1. 用坐标纸绘制上面的两条曲线，总结传输规律。
2. 对自制的 RLC 谐振电路的传输效果做分析和总结。

七、讨论题

1. 为什么当振荡频率和 LC 电路的频率一样时，发射线圈能在周围产生大的交变磁场？
2. 你认为提高磁耦合谐振式无线电力传输系统能量传输效率的方式有哪些？

实验七 双光栅检测微弱振动

一、实验预习内容

1. 运动的光栅产生多普勒频移原理和公式；
2. 已频移的光束和未频移的光束平行叠加形成的光拍公式，其拍频是多少？
3. 双光栅如何测量微振动的振幅？

二、实验目的及任务

1. 测量音叉微振动的振幅；
2. 测量外力驱动音叉的谐振曲线。

三、实验原理

1. 位相光栅的多普勒频移

多普勒效应：当波源和观察者之间有相对运动时，观察者观测到的波的频率会发生变化，该现象叫做多普勒效应。当波源和观察者之间距离减小时，观察者接收到波的频率升高；当波源和观察者之间距离增大时，观察者接收到波的频率降低。

当激光平面波垂直入射到位相光栅（衍射光栅）上时，由于光栅的作用而发生衍射，在远场（无限远处或透镜的焦平面上）形成衍射图样，衍射角由光栅方程表示：

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (7-1)$$

其中 d 为狭缝间距，即光栅常数； θ 为衍射角， λ 为光波波长。

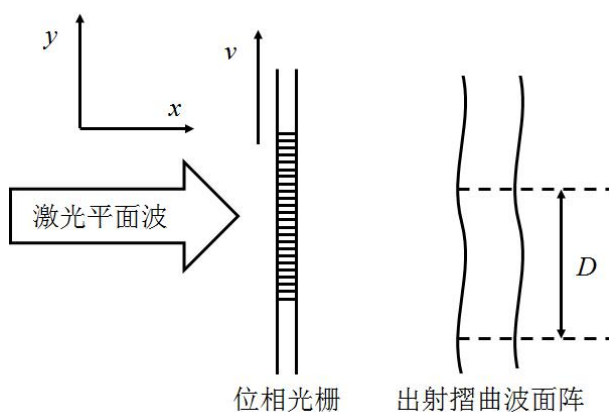


图 7-1 出射的褶曲波阵面

如果光栅在 y 方向以速度 v 移动着，则出射的衍射波的波阵面也以速度 v 在 y 方向移动。在不同时刻，对应于同一级的衍射光线，它的波阵面上的一点，在 y 方向有 vt 的位移量，即衍射图样在 y 方向有 vt 的位移量，这个位移量相当于光波产生了 $\Delta\delta$ 的光程差，相应的相位的变化量为：

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\delta = \frac{2\pi}{\lambda} vt \sin \theta \quad (7-2)$$

由光栅方程得：

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} vt \sin\theta = \frac{2\pi}{\lambda} vt \frac{n\lambda}{d} = 2n\pi \frac{v}{d} t = n\omega_d t \quad (7-3)$$

式中, $\omega_d = 2\pi \frac{v}{d}$ 。

光波写成如下形式:

$$E = E_0 e^{i[\omega_0 t + \Delta\phi(t)]} = E_0 e^{i(\omega_0 + n\omega_d)t} \quad (7-4)$$

则移动的位相光栅的 n 级衍射光波, 相对于静止的位相光栅有一个 $\omega_a = \omega_0 + n\omega_d$ 的多普勒频率。

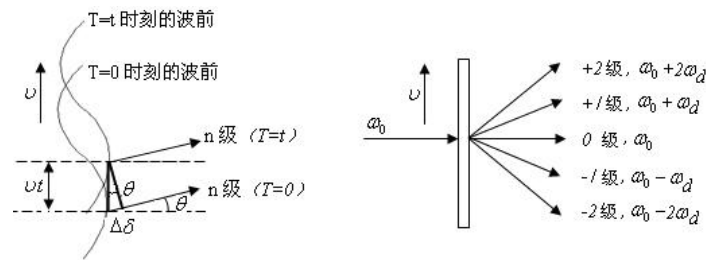


图7-2 衍射光线在光栅运动方向上的位移量和移动光栅的多普勒频率

2. 光拍的获得与检测

光的频率非常高, 为了从光频 ω_0 中检测出多普勒频移量, 必须采用“拍”的方法。即把已频移的和未频移的光束互相平行迭加, 形成光拍。实验中形成光拍的方法是采用两片完全相同的光栅平行, 一片 B 静止, 另一片 A 相对移动 (固定在音叉上随音叉振动而上下运动)。激光通过双光栅后各自形成衍射光波在光栅后相互叠加, 在远场为两种以上平行光束的迭加。移动的光栅 A 起频移作用, 而静止光栅 B 起衍射作用, 故通过双光栅后出射的衍射光包含了两种以上不同频率而又平行的光束。由于双光栅紧贴, 激光束具有一定宽度, 故该光束能平行迭加, 这样就直接而又简单地形成了光拍。

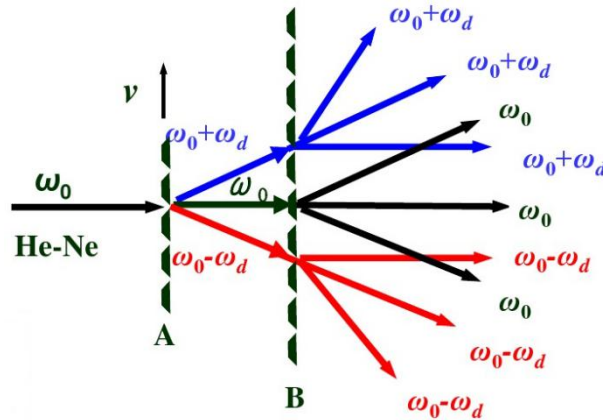


图 7-3 k 级衍射光波的多普勒频移

当此光拍讯号进入光电检测器, 由于检测器的平方律检波性质, 其输出光电流可由下述关系求得:

光束1:

$$E_1 = E_{10} \cos(\omega_0 t + \phi_1) \quad (7-5)$$

光束2:

$$E_2 = E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d)t + \phi_2] \quad (\text{取 } n=1) \quad (7-6)$$

光电流:

$$I = \xi(E_1 + E_2)^2 = \xi \left\{ \begin{aligned} &E_{10}^2 \cos^2(\omega_0 t + \phi_1) + E_{20}^2 \cos^2[(\omega_0 + \omega_d)t + \phi_2] + \\ &E_{10}E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0)t + (\phi_2 - \phi_1)] \\ &+ E_{10}E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_0 + \omega_d)t + (\phi_2 + \phi_1)] \end{aligned} \right\} \quad (7-7)$$

式中, ξ 为光电转换常数。

因光波频率 ω_0 甚高, 不能为光电检测器反应, 所以光电检测器只能检测出第三项拍频讯号, 即:

$$i_s = \xi \{ E_{10}E_{20} \cos[\omega_d t + (\phi_2 - \phi_1)] \} \quad (7-8)$$

光电检测器能测到的光拍讯号的频率为拍频

$$F_{\text{拍}} = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{v_A}{d} = v_A n_\theta \quad (7-9)$$

其中 $n_\theta = \frac{1}{d}$ 为光栅密度, 本实验中 $n_\theta=100$ 条/mm。

3. 微弱振动位移量的检测

$F_{\text{拍}}$ 与光频率 ω_0 无关, 且当光栅密度 n_θ 为常数时, 只正比于光栅移动速度 v_A , 如果把光栅A粘在音叉上, 则 v_A 是周期性变化的。所以光拍信号频率 $F_{\text{拍}}$ 也是随时间而变化的, 微弱振动的位移振幅为:

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{F_{\text{拍}}(t)}{n_\theta} dt = \frac{1}{2n_\theta} \int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt \quad (7-10)$$

式中 T 为音叉振动周期, $\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$ 可直接在示波器的荧光屏上计算波形数而得到, 因为

$\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$ 表示 $T/2$ 内的波的个数。

4. 波形数计算说明:

波形数=整数波形数+分数波形数。整数波形数可在示波器上直接读取, 而分数波形数等于非完整波形的首数加尾数, 即分数波形数=波的首和尾部分中满 $1/2$ 或 $1/4$ 或 $3/4$ 个波形相对应的分数 ($1/2$ 波形对应 0.5 , $1/4$ 波形对应 0.25 , $3/4$ 波形对应 0.75) + $\frac{\arcsin a}{360^\circ}$ (或

$\frac{90^\circ - \arcsin a}{360^\circ}$) + $\frac{\arcsin b}{360^\circ}$ (或 $\frac{90^\circ - \arcsin b}{360^\circ}$), 式中 a 、 b 为波群的首、尾幅度和该处完

整波形的振幅之比, 即 h/H 。

例如在 $T/2$ 内，整数波形数为 4，尾数分数部分已满 $1/4$ 波形， $b=h/H=0.5$ 。所以波形数

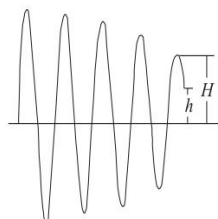
$$=4+0.25+\frac{90^\circ-\arcsin 0.5}{360^\circ}\approx 4.25+0.17=4.42。$$


图 7-4 波数计算

四、操作要点

1. 仪器连接

- (1) 将示波器 CH1 通道连接至测试仪面板上的“波形输出”；将 CH2 通道连接至“输出 I”；
- (2) 音叉驱动器接“主输出”，光电传感器接“信号输入”。

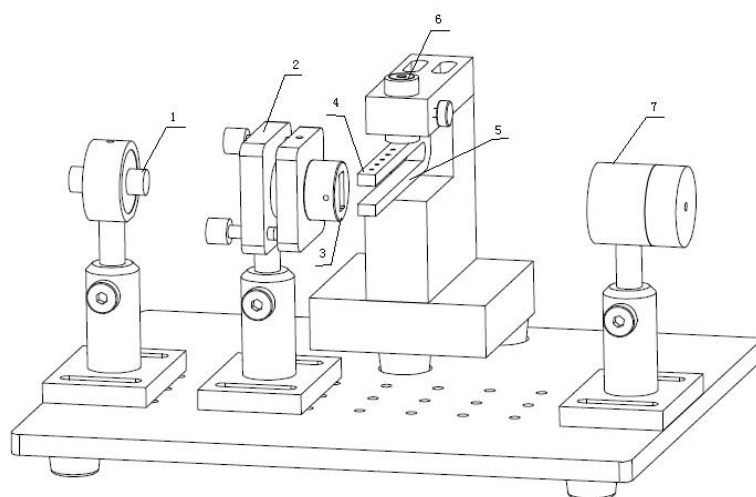


图 7-5 实验平台

- | | | | | |
|----------|----------|-------|-------|------|
| 1-半导体激光器 | 2-静光栅调节架 | 3-静光栅 | 4-动光栅 | 5-音叉 |
| 6-音叉驱动器 | 7-光电传感器 | | | |

2. 双光栅衍射光路调整

(1) 将实验平台上的“激光器”接“半导体激光电源”，将激光器、静光栅、动光栅摆在一条直线上；

(2) 打开半导体激光电源，让激光穿越静、动光栅后形成一竖排衍射光斑，使中间最亮光斑进入光电传感器里面；

(3) 调节静光栅和动光栅的相对位置，使光栅尽可能平行。

3. 测量微振动振幅

(1) 调整音叉和音叉驱动器的间距，一般 0.15 mm 为宜；

(2) 信号源取正弦波输出，频率在 500 Hz 附近；若音叉谐振较强烈，可调小驱动信号幅度，使振动减弱至合适的强度；

(3) 调节驱动信号频率的大小，寻找使音叉谐振的频率（即半个周期内光拍波数达到极大值，15 个波数左右或更大），记录音叉谐振频率 f_0 ；

(4) 准确测量半个周期内光拍的波数（首数+完整波的个数+尾数，首数和尾数的计算方式为记录正弦信号的值，通过换算得到波的个数，精确到小数点后 2 位），计算音叉谐振幅度。

频率 (Hz)	
半个周期的波数	
音叉振动幅度 (mm)	

4. 测量外力驱动音叉时的谐振曲线

(1) 在音叉谐振附近，调节驱动信号频率，频率取 $f_n = (f_0 \pm 0.1n)$ Hz, f_0 是谐振频率, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$, 选 9 个点;

(2) 分别测出每个频率 f_n 对应拍频波的波数，计算出相应的振幅。

频率 (Hz)		
半个周期的波数		
音叉振动幅度 (mm)		

5. 选做内容

保持驱动信号输出幅度不变，将软管放入音叉上的小孔从而改变音叉的有效质量，调节驱动信号频率，研究谐振曲线的变化趋势。

频率 (Hz)		
半个周期的波数		
音叉振动幅度 (mm)		

五、报告要求

1. 计算音叉共振时微振动的振幅;
2. 计算偏离共振频率下音叉的振幅，用坐标纸画出频率与振幅的关系曲线;
3. 做出音叉不同有效质量时的谐振曲线，定性讨论其变化趋势。（选做内容）

六、讨论题

1. 测量音叉谐振曲线时，为什么要固定驱动信号功率?
2. 静光栅和动光栅的前后位置是否可以互换，为什么?

实验八 迈克尔孙干涉仪

一、实验预习指导

1. 迈克尔孙干涉仪的原理及各部分功能是什么？
2. 定域干涉和非定域干涉的异同及产生明暗条纹的条件是什么？
3. 测定 He-Ne 激光波长的原理是什么？
4. 空气折射率的测定方法是什么？

二、实验目的及任务

1. 了解迈克尔孙干涉仪的结构、原理及调节方法；
2. 观察光的非定域和定域干涉现象，包括等倾和等厚干涉；
3. 逐差法测定 He-Ne 激光波长；
4. 作图法计算空气的折射率。

三、实验原理

1. 迈克尔孙干涉仪

迈克尔孙干涉仪是用分振幅的方法，获得双干涉的仪器，其结构如图 8-1 所示。

M_1 为固定反射镜（定镜）， M_2 为动反射镜（动镜），两镜为互相垂直的平面反射镜。 G_1 为分光板（分束器）。 G_2 为补偿板，可使两光束在玻璃中经过的光程完全相同。转动粗动手轮和微动手轮可使平面镜 M_1 沿导轨方向前后移动，移动的距离可从标尺和微动手轮读出。

2. 干涉条纹的产生

光源 S 发出的光束射到分光板 G_1 上， G_1 的后面镀有半透膜，光束在半透膜上反射和透射，被分成光强接近相等、并相互垂直的两束光。这两束光分别射向两平面镜 M_1 和 M_2 ，经它们反射后又汇聚于分光板 G_1 ，再射到光屏 E 处，从而得到清晰的干涉条纹。

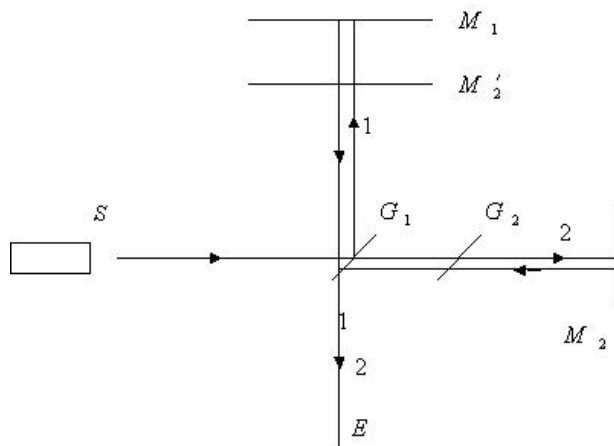


图 8-1 干涉原理图

四、操作要点

1. 熟悉迈克尔孙干涉仪并调节 He-Ne 激光器

- (1) 熟悉 SGM-1 型迈克尔孙干涉仪各部分结构及功能；

(2) 熟悉“动镜”移动系统, 注意镜面实际移动距离是千分尺读数的 $1/20$, 旋转旋钮使其处于行程的中间位置;

(3) 调整 He-Ne 激光器的高度和方向, 使它发出的激光束能够通过扩束器小孔。

2. 观察单色点光源形成的非定域干涉现象

(1) 将扩束器移出光路, 放上观察屏, 则能看到定镜和动镜的两列反射光点。仔细调节动镜或定镜背后的螺丝, 使两列光点对应重合。

(2) 将扩束器旋入光路, 屏上出现圆环状条纹, 缓慢调节动镜背后的螺丝, 使条纹中心处于屏的中央。如果条纹太密或太疏, 应调节定镜千分尺旋钮, 使条纹清晰, 疏密合适 (如图 8-2b);

(3) 移动动镜, 观察条纹的变化。注意条纹“生出”还是“缩进”、变疏还是变密、直径变大还是变小。记录观察到的现象。

3. 测定 He-Ne 激光波长

转动动镜千分尺旋钮, 则条纹出现吞吐, 记录初始位置 (0 环) 和每变化 50 环时的位置读数, 直到 250 个条纹的变化, 格式见表 1。

4. 空气折射率的测定

(1) 将长度 $l = 80 \text{ mm}$ 的气室置于干涉仪定镜侧光路, 调节干涉仪, 使干涉条纹清晰;

(2) 分别向气室里充气 50、100、150、200、250 mm Hg;

(3) 稍微松开阀门, 以较低的速率放气至压力表指针回到起始位置, 数出干涉条纹变化数 N (精确到 0.5)。

5. 采用钠黄灯观察定域干涉现象 (定域等倾干涉、定域等厚干涉)

(1) 定域等倾干涉: 扩束器移出光路, 将毛玻璃插入到钠黄灯和分光板之间, 用眼睛直接观察干涉条纹。细调动镜螺丝直到视线平移时条纹无吞吐, 仅随视线移动方向平动。再转动动镜千分尺旋钮, 观察条纹变化情况, 记录观察到的现象。

(2) 定域等厚干涉:

a. 利用点光源调出非定域圆形干涉条纹;

b. 调节定镜微调螺丝使条纹不断缩进变粗, 直到视场内条纹极少时, 再稍微改变动镜角度, 屏幕上出现平行直条纹 (如图 8-2);

c. 调节动镜的角度或位置, 观察条纹变化, 用眼睛即可直接观察到定域等厚干涉条纹。

6. 采用白光灯观察干涉现象。 (选做)

参考定域等厚干涉的调节步骤。

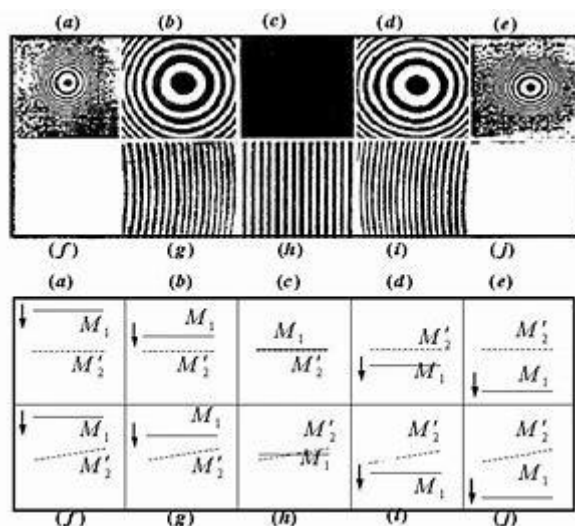


图 8-2 迈克尔孙干涉条纹花样和对应两反射镜位置图

五、注意事项

1. 禁止直视未经扩束或散射的 He-Ne 激光束，以免伤害视网膜；
2. 操作动作必须轻缓，并保护好各光学表面，禁止手触光学零件的透光面和反射面。

六、报告要求

1. 利用逐差法计算氦-氖激光波长

表 8-1 测定 He-Ne 激光波长数据

圆环变化数目	0	50	100	150	200	250
M_2 位置读数 (mm)						

2. 作出条纹变化数 Δn 相对于气压变化 Δp 的曲线，用图解法计算斜率，求出空气的折射率。（每个压强记录三组数据。）

表 8-2 测定空气折射率数据

气室内压强 (mm Hg)	0	100	150	200	250
干涉条纹变化 1					
干涉条纹变化 2					
干涉条纹变化 3					

3. 记录等倾和等厚现象、特点并分析。

七、讨论题

1. 归纳非定域干涉和定域干涉的特点。
2. 迈克尔孙干涉仪所产生的干涉条纹疏密程度是由什么因素决定的？变化规律怎样？
3. 说明仪器要设计补偿片的原因。

附录：主要技术参数

分束器和补偿板平面度： $\leq \frac{1}{20} \lambda$

微动测量分度值：相当于 0.0005 mm

移动镜行程：1.25 mm

气压表量程：0-40 kPa

钠钨双灯功率：钠灯 10W；溴钨灯 15W，6V/3V

He-Ne 激光器功率：0.7 mW -1 mW

气室长度：80 mm

波长测量准确度：当条纹计数 100 时，相对误差 <2%

实验九 夫兰克-赫兹实验

一、实验预习指导

1. 了解波尔的原子能级理论；
2. 了解夫兰克-赫兹实验原理。

二、实验目的及任务

1. 手动测绘夫兰克-赫兹管的 I_A-U_{G2K} 曲线；
2. 自动测绘夫兰克-赫兹管的 I_A-U_{G2K} 曲线；
3. 测定氩原子的第一激发电位。

三、实验原理

玻尔提出的原子理论指出：

1) 原子只能较长地停留在一些稳定状态（简称为定态）。原子在这些状态时，不发射或吸收能量：各定态有一定的能量，其数值是彼此分隔的。原子的能量不论通过什么方式发生改变，它只能从一个定态跃迁到另一个定态。

2) 原子从一个定态跃迁到另一个定态而发射或吸收辐射时，辐射频率是一定的。如果用 E_m 和 E_n 分别代表有关两定态的能量的话，辐射的频率 ν 决定于如下关系：

$$h\nu = E_m - E_n \quad (9-1)$$

式中，普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

为了使原子从低能级向高能级跃迁，可以通过具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换的办法来实现。

设初速度为零的电子在电位差为 U_0 的加速电场作用下，获得能量 eU_0 。当具有这种能量的电子与稀薄气体的原子发生碰撞时，就会发生能量交换。如以 E_1 代表氩原子的基态能量、 E_2 代表氩原子的第一激发态能量，那么当氩原子吸收从电子传递来的能量恰好为

$$eU_0 = E_2 - E_1 \quad (9-2)$$

时，氩原子就会从基态跃迁到第一激发态。而且相应的电位差称为氩的第一激发电位。测定出这个电位差 U_0 ，就可以根据（9-2）式求出氩原子的基态和第一激发态之间的能量差（其他元素气体原子的第一激发电位亦可依此法求得）。

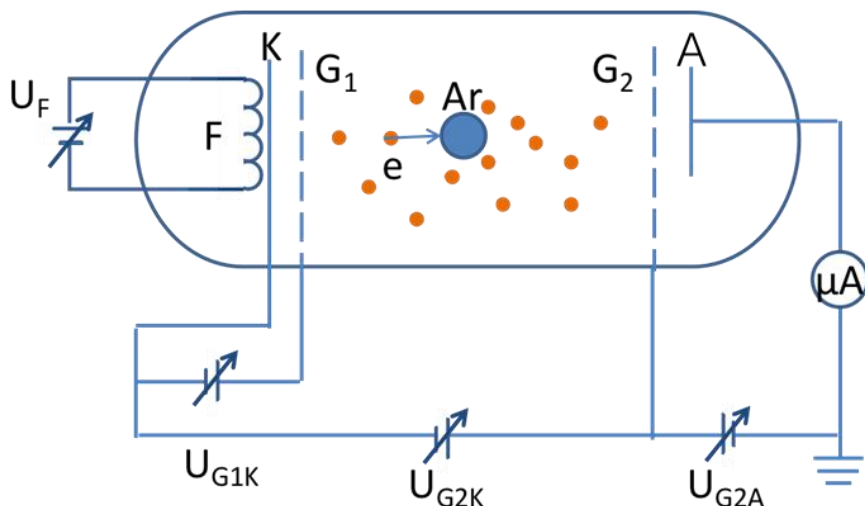


图 9-1 夫兰克-赫兹实验原理图

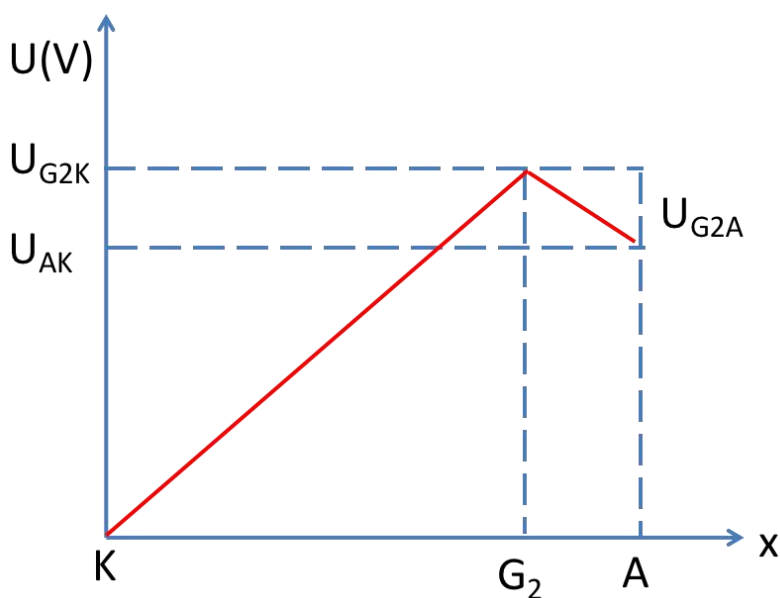


图 9-2 夫兰克-赫兹管内空间电位分布

夫兰克-赫兹实验的原理图如图 9-1 所示。在充氩的夫兰克-赫兹管中，电子由热阴极 K 发出，并在第二栅极 G_2 的加速电压 U_{G2K} 作用下被加速。在板极 A 和第二栅极 G_2 之间加有反向拒斥电压 U_{G2A} 。管内空间电位分布如图 9-2 所示。当电子通过 KG_2 空间进入 G_2A 空间时，如果有较大的能量 ($\geq eU_{G2A}$)，就能冲过反向拒斥电场而到达板极形成板极电流，为微电流计 μA 检出。如果电子在 KG_2 空间与氩原子碰撞，把自己一部分能量传给氩原子而使后者激发的话，电子本身所剩余的能量就很小，以致通过第二栅极后已不足于克服拒斥电场而被折回到第二栅极，这时，通过微电流计 μA 的电流将显著减小。

实验时，使 U_{G2K} 电压逐渐增加并仔细观察电流计的电流指示，如果原子能级确实存在，而且基态和第一激发态之间有确定的能量差的话，就能观察到如图 9-3 所示的 $I_A \sim U_{G2K}$ 曲线。

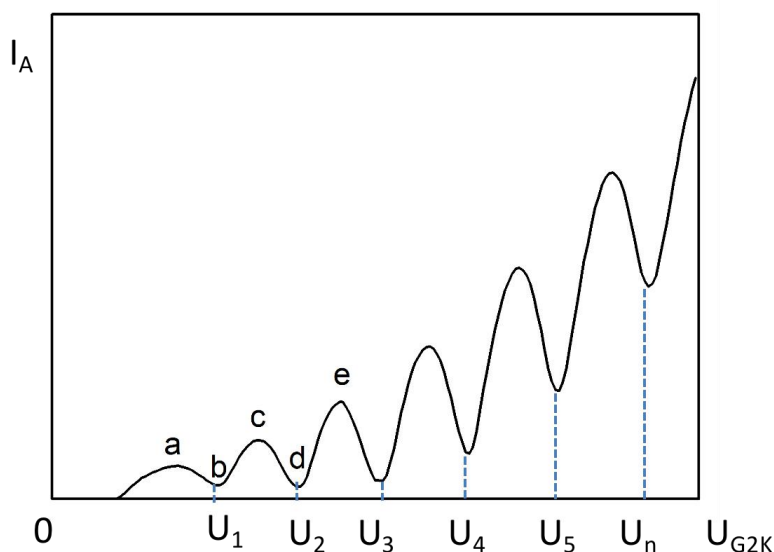


图 9-3 夫兰克-赫兹曲线 ($I_A \sim U_{G2K}$)

图 9-3 所示的曲线反映了氩原子在 KG_2 空间与电子进行能量交换的情况。当 KG_2 空间电压逐渐增加时，电子在 KG_2 空间被加速而取得越来越大的能量。但起始阶段，由于电压较低，电子的能量较少，即使在运动过程中它与原子相碰撞也只有微小的能量交换（为弹性碰撞）。穿过第二栅极的电子所形成的板极电流 I_A 将随第二栅极电压 U_{G2K} 的增加而增大（如图 9-3 的 oa 段）。当 KG_2 间的电压达到氩原子的第一激发电位 U_0 时，电子在第二栅极附近与氩原子相碰撞，将自己从加速电场中获得的能量 $\Delta E = E_2 - E_1$ 交给后者，并且使后者从基态激发到第一激发态。而电子本身由于把能量 $\Delta E = E_2 - E_1$ 给了氩原子，即使穿过了第二栅极也不能克服反向拒斥电场而被折回第二栅极（被筛选掉）。所以板极电流将显著减小（图 9-3 所示 ab 段）。随着第二栅极电压的增加，电子的能量也随之增加，在与氩原子相碰撞后还留下足够的能量，可以克服反向拒斥电场而达到板极 A，这时电流又开始上升（ bc 段）。直到 KG_2 间电压是二倍氩原子的第一激发电位时，电子在 KG_2 间又会因二次碰撞而失去能量，因而又会造成第二次板极电流的下降（ cd 段），同理，凡在

$$U_{G2K} = n U_0 \quad (n=1, 2, 3 \dots\dots) \quad (9-3)$$

的地方板极电流 I_A 都会相应下跌，形成规则起伏变化的 $I_A \sim U_{G2K}$ 曲线。而各次板极电流 I_A 下降相对应的阴、栅极电压差 $U_{n+1} - U_n$ 应该是氩原子的第一激发电位 U_0 。本实验就是要通过实际测量来证实原子能级的存在，并测出氩原子的第一激发电位（公认值为 $U_0 = 11.7V$ ）。

原子处于激发态是不稳定的。在实验中被慢电子轰击到第一激发态的原子要跳回基态，进行这种反跃迁时，就应该有 eU_0 电子伏特的能量发射出来。反跃迁时，原子是以放出光量子的形式向外辐射能量。这种光辐射的波长为：

$$eU_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (9-4)$$

$$\lambda = \frac{hc}{eU_0} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{11.7 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.05 \times 10^2 (nm) \quad (9-5)$$

四、操作要点

1. 准备工作

(1) 按照示意图将夫兰克-赫兹管测试架与测试仪前面板上的四组电压输出（第二栅压 V_{G2K} ，拒斥电压 V_{G2A} ，第一栅压 V_{G1K} ，灯丝电压）分别对应连接；将电流输入接口与测试架上的微电流输出口相连。**注意：仔细检查，避免接错损坏夫兰克-赫兹管；**

(2) 将夫兰克-赫兹实验仪前面板上“信号输出”接口与示波器 CH1 通道相连，“同步输出”与示波器触发端接口相连；

(3) 开启电源，默认工作方式“手动”模式；

(4) 将电压设置依次切换为“灯丝电压”、第一栅压“ V_{G1K} ”、拒斥电压“ V_{G2A} ”第二栅压“ V_{G2K} ”，调节相应“电压调节”，使与出厂参考值一致（详见夫兰克赫兹管测试架标示）。**注意：灯丝电压不要超过出厂参考值 0.5V，否则会加快灯管老化，连续工作不要超过 2 小时；**

(5) 将电压设置切换选择为第二栅压“ V_{G2K} ”设定，调节“电压调节”使输出为零。

(6) 预热仪器 10-15 分钟，待上述电压都稳定后，即可开始实验。

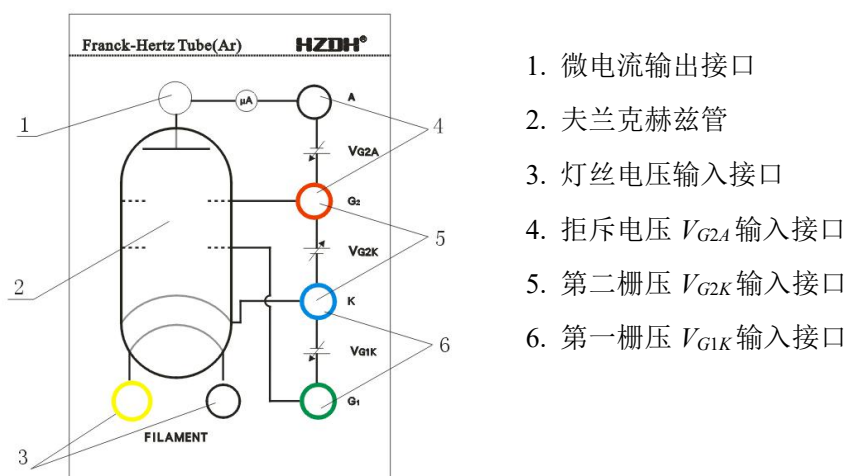


图 9-4 夫兰克-赫兹管测试架示意图

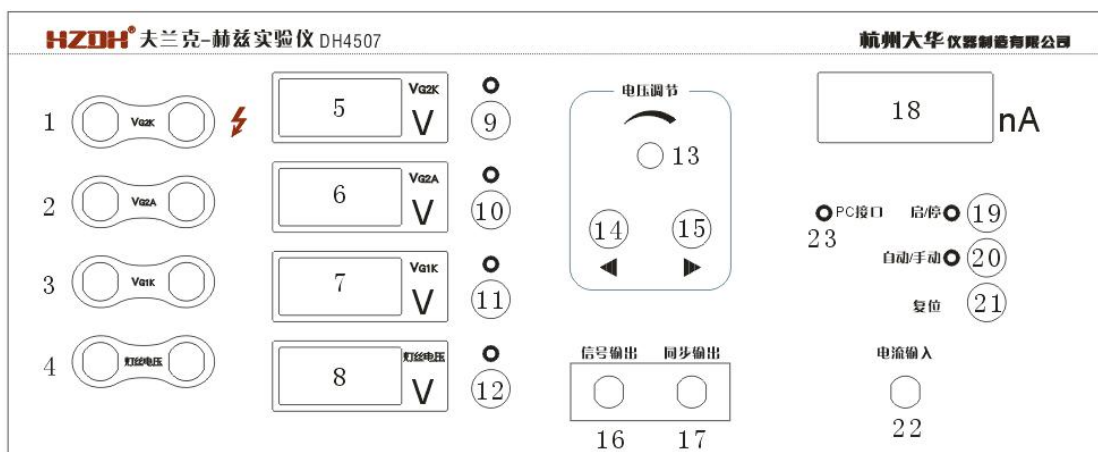


图 9-5 测试仪示意图

1. V_{G2K} 电压输出； 2. V_{G2A} 电压输出； 3. V_{G1K} 电压输出； 4. 灯丝电压输出；
5. V_{G2K} 电压显示窗； 6. V_{G2A} 电压显示窗； 7. V_{G1K} 电压显示窗； 8. 灯丝电压显示窗；
- 9-12. 四路电压设置切换按钮，仅被选中的电压可以通过电压调节进行设置；
13. 调节电压值大小；14.15.移位键，改变电压调节步进值大小；

组合功能：在手动模式 V_{G2K} 设定时，按住 14 键不放，顺时针旋转 13 设定 V_{G2K} 最小步进值，可以设定为 0.1V，0.2V 和 0.5V 步进，默认为 0.1V；

16. 波形信号输出，与示波器 CH1 或 CH2 相连； 17.同步输出，与示波器触发通道相连；
18. 微电流显示窗； 19.启停键：自动模式下控制采集的开始或暂停，开启时指示灯亮；
20. 自动/手动模式选择，按下自动后，功能指示灯亮；自动模式下按 19 键可以开启自动测量，仪器按照固定的最小电压步进(0.2V)输出 V_{G2K} ，并采集微电流信号，同时把采集的数据信号输出到示波器上；手动模式下需手动调节 V_{G2K} 开展实验，信号输出接口将同步输出采集的数据波形，增加或减小 V_{G2K} ，波形输出将同步变化，实时动态显示，便于寻找极点；
21. 复位功能，当系统出现意外死机后，按此键复位系统；
22. 微电流输入接口； 23. PC 接口指示。

2. 手动测量

(1) 开机默认为“手动”工作状态；

(2) 将电压设置切换选择为第二栅压“ V_{G2K} ”设定，调节“电压调节”，使第二栅压 0V 到 90V 按最小步进电压值依次增加，一边调节，一边观察示波器上显示的波形曲线和实验仪面板上的电流示值，依次记录 V_{G2K} 和 I_A 数据。**注意：**实验前，可以通过“电压调节”组合键设置 V_{G2K} 最小电压步进值为 0.1V，0.2V 或 0.5V；实验过程中请不要再改变最小步进值， V_{G2K} 从小到大单向调节，不可在过程中反复。

(3) 将拒斥电压“ V_{G2A} ”增加或减小 0.5V，重复步骤 (2)，作出另外一条 I_A-U_{G2K} 曲线，然后比较上述曲线；

(4) 求出各峰值所对应的电压值，用逐差法求出氩原子第一激发电位，并与公认值相比较，求出相对误差。

3. 自动测量

(1) 按下测试仪“自动/手动”模式按钮，选择“自动”模式，指示灯亮；

(2) 将电压设置切换选择为第二栅压“ V_{G2K} ”设定；

(3) 按下测试仪“启/停”按钮，指示灯亮，自动测试开始，测试仪将按默认的最小步进值（0.2V）输出 V_{G2K} 并实时采集微电流值，将采集的数据值动态输出到示波器上；通过调整示波器的电压幅度、扫描时间和触发设置，使其能在屏幕上实时显示波形，仅作现象观察。

五、报告要求

1. 手动测量的数据

(1) 利用计算机软件绘制 I_A-U_{G2K} 曲线；

(2) 对曲线进行拟合，利用各峰值或波谷所对应的电压值，分别用逐差法和最小二乘法计算氩原子的第一激发电位。

2. 分析实验结果。

六、思考题

1. 在 I_A-U_{G2K} 曲线中，为什么随着 U_{G2K} 的增大，波谷电流逐渐增大？

2. 请分析拒斥电压改变对 I_A-U_{G2K} 曲线的影响。

实验十 光电效应法测定普朗克常量

一、实验预习指导

1. 了解光电效应的实验原理与方法；
2. 理解爱因斯坦光量子理论如何解释光电效应实验现象。

二、实验目的及任务

1. 加深对光电效应及光的量子性的理解。
2. 学习验证爱因斯坦光电效应方程的实验方法，并测定普朗克常数 h 。
3. 利用最小二乘法与作图法处理实验数据，并比较这两种方法的优缺点。

三、实验原理

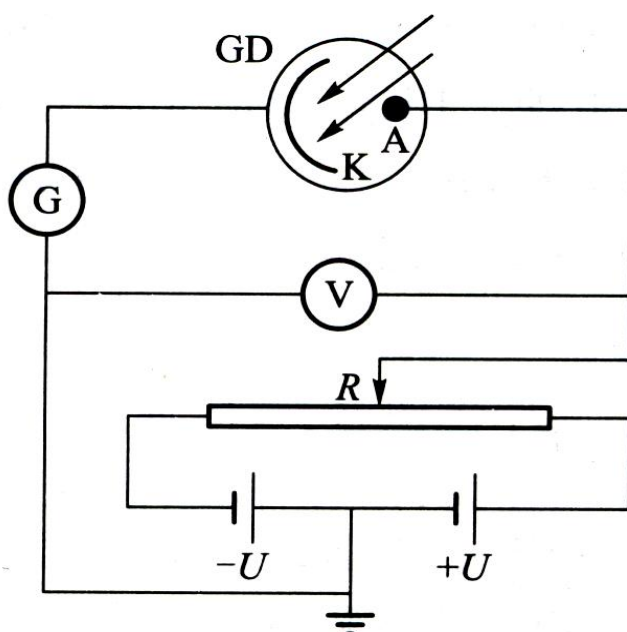


图 10-1 光电效应实验原理图

光电效应的实验原理如图 10-1 所示。入射光照射到光电管阴极 K 上，产生的光电子在电场的作用下向阳极 A 迁移构成光电流，改变外加电压 U_{AK} ，测量出光电流 I 的大小，即可得出光电管的伏安特性曲线。

光电效应的基本实验规律如下：

- 1) 对一定的频率光，存在一电压 U_0 ，当 $U_{AK} \leq U_0$ 时，电流为零，这个相对于阴极的负值的阳极电压 U_0 ，被称为截止电压。
- 2) 当 $U_{AK} \geq U_0$ 后， I 迅速增加，然后趋于饱和，饱和光电流 I_M 的大小与入射光的强度 P 成正比。
- 3) 对于不同频率的光，其截止电压的值不同。

4) 作截止电压 U_0 与频率 ν 的关系图如图 10-2 所示。 U_0 与 ν 成正比关系。当入射光频率低于某极限值 ν_0 (ν_0 随不同金属而异) 时, 不论光的强度如何, 照射时间多长, 都没有光电流产生。

5) 光电效应是瞬时效应。即使入射光的强度非常微弱, 只要频率大于 ν_0 , 在开始照射后立即有光电子产生, 所经过的时间至多为 10^{-9} 秒的数量级。

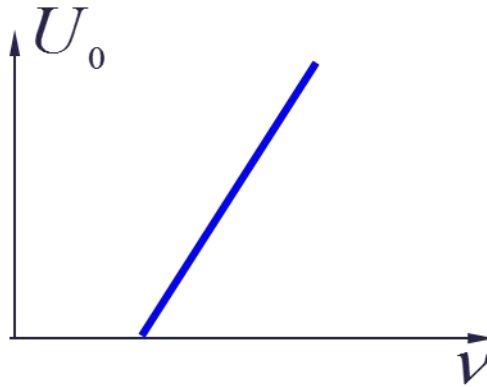


图 10-2 截止电压 U_0 与频率 ν 的关系图

按照爱因斯坦的光量子理论, 光能并不像电磁波理论所想象的那样, 分布在波阵面上, 而是集中在被称之为光子的微粒上, 但这种微粒仍然保持着频率 (或波长) 的概念, 频率为 ν 的光子具有能量 $E=h\nu$, h 为普朗克常数。当光子照射到金属表面上时, 一次为金属中的电子全部吸收, 而无需积累能量的时间。电子把这能量的一部分用来克服金属表面对它的吸引力, 余下的就变为电子离开金属表面后的动能, 按照能量守恒原理, 爱因斯坦提出了著名的光电效应方程:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_0^2 + A \quad (10-1)$$

式中, A 为金属的逸出功, $\frac{1}{2}mv_0^2$ 为光电子获得的初始动能。

由该式可见, 入射到金属表面的光频率越高, 逸出的电子动能越大, 所以即使阳极电位比阴极电位低时也会有电子落入阳极形成光电流, 直至阳极电位低于截止电压, 光电流才为零, 此时有关系:

$$eU_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (10-2)$$

阳极电位高于截止电压后, 随着阳极电位的升高, 阳极对阴极发射的电子的收集作用越强, 光电流随之上升; 当阳极电压高到一定程度, 已把阴极发射的光电子几乎全收集到阳极, 再增加 U_{AK} 时 I 不再变化, 光电流出现饱和, 饱和光电流 I_M 的大小与入射光的强度 P 成正比。

光子的能量 $h\nu_0 < A$ 时，电子不能脱离金属，因而没有光电流产生。产生光电效应的最低频率（截止频率）是 $\nu_0 = A/h$ 。

将（10-2）式代入（10-1）式可得：

$$eU_0 = h(\nu - \nu_0) \quad (10-3)$$

此式表明截止电压 U_0 是频率 ν 的线性函数，直线斜率 $k = h/e$ ，只要用实验方法得出不同的频率对应的截止电压，求出直线斜率，就可算出普朗克常数 h 。

爱因斯坦的光量子理论成功地解释了光电效应规律。

四、操作要点

1. 用专用连接线将光电管暗箱电压输入端与实验仪电压输出端（后面板上）连接起来（红接红，黑接黑），然后打开实验仪的电源，预热 20 分钟。

2. 预热后，通过“方式”功能键选择“手动”模式，“内容”功能键选择“普朗克常数”模式。再将“电流量程”选择开关置于 10^{-12} A 档。

3. 电流调零：将实验仪微电流输入高频电缆连接线断开，调零好后再重新接上。

4. 选择直径为 2 mm 的光阑孔，将光波长 λ 为 365.0 nm 的滤色片转到光电管暗箱光输入口上。从低到高调节电压（-2 V 至 +2 V），用“补偿法”测量该波长对应的截止电压 U_c （只需记录绝对值），并将数据记于下表中。

补偿法步骤：

- 开灯，调节工作电压使实测电流为 0。
- 遮灯，记录对应实测电流。
- 开灯，调节工作电压使实测电流等于相应的暗/本底电流，记录工作电压。

然后依次在光波长 λ 分别为 404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm 的滤色片，重复以上的测量步骤。

（光阑孔直径 = 2 mm）

光波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
光频率 $\nu (\times 10^{14} \text{Hz})$	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_c (V)					

5. 依次选择直径分别为 4mm 和 8mm 的光阑孔，重复以上的测量步骤，将数据记于以下的表格。

（光阑孔直径 = 4 mm）

光波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
光频率 $\nu (\times 10^{14} \text{Hz})$	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196

截止电压 U_c (V)					
----------------	--	--	--	--	--

(光阑孔直径 = 8 mm)

光波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
光频率 ν ($\times 10^{14}$ Hz)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_c (V)					

6. 请用最小二乘法与作图法处理实验数据, 找出截止电压 U_0 与光频率 ν 两者线性关系中的直线斜率 k , 并利用 $h = ek$ 等式 ($e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$) 求出普朗克常数 h 的实验值, 及其跟普朗克常数标准值 $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 的相对误差。

7. 请分析实验误差的来源, 以及比较以上两种数据处理方法的优缺点。

五、注意事项

1. 汞灯关闭后, 不要立即开启电源。必须待灯丝冷却后再开启, 否则会影响汞灯寿命。
2. 光电管应保持清洁, 避免用手摸, 而且应放置在遮光罩内, 不用时禁止用光照射。
3. 滤光片要保持清洁, 禁止用手摸光学面。
4. 光电管不使用时, 要断掉施加在光电管阳极与阴极间的电压, 保护光电管, 防止意外的光线照射。

六、报告要求

1. 在三个不同直径的光阑孔分别测量对应各个光频率 ν 的截止电压 U_0 , 找出这两个参数的线性关系。
2. 用最小二乘法与作图法求出普朗克常数 h 的实验值, 及其跟普朗克常数标准值 $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 的相对误差。
3. 分析实验误差的来源, 以及比较以上每种数据处理方法的优缺点。

七、讨论题

1. 请解释什么是逸出功 A , 以及怎样可以从截止电压 U_0 与光频率 ν 两者的线性关系中求出逸出功 W 。
2. 请讨论一下, 不同金属材料的逸出功 A 会否相同, 并加以解释。
3. 请讨论一下, 不同金属材料的 U_0 - ν 线性关系会否相同, 并加以解释。
4. 请解释什么是暗电流、本底电流、和阳极反向电流, 以及它们各自出现的原因, 并讨论它们各自会怎样影响“零电流法”对截止电压 U_0 的测量结果。