

第五章 光学和近代物理实验

光学实验基础知识

光学仪器的主体是光学元件。光学元件大部分都是玻璃制品，表面经过精细抛光，有的还镀膜，使用时一定要十分小心、谨慎，不能粗心大意，否则将损坏光学元件。

光学仪器在使用时必须遵守下列原则：

- (1) 必须详细了解仪器的使用方法和操作要求后才能使用。
- (2) 仪器应轻拿、轻放，避免激烈震动和失手跌落。
- (3) 不准用手触摸仪器的光学表面，如必须用手拿某些光学元件（如透镜、棱镜、平面镜等）时，只能接触非光学表面部分，即磨砂面，如透镜的边缘、棱镜的上、下底面等。
- (4) 光学表面如有轻微的污痕或指印，可用特制的擦镜纸轻轻地揩去，不能用力硬擦，更不准用手帕或其他纸来揩，使用的擦镜纸应保持清洁。
- (5) 光学表面如有灰尘，可用实验室专备的橡皮球将灰尘吹去或用软毛笔轻轻揩去，切不可用其他任何物品揩。
- (6) 除实验规定外，不允许任何溶液接触光学表面，不要对着光学元件表面说话，更不能对着它咳嗽、打喷嚏等。
- (7) 光学仪器的机械结构一般都比较精细，操作时动作要轻，缓慢进行，用力要均匀平衡，不得强行扭动，也不能超出其行程范围。若使用不当，仪器精度会大大降低。
- (8) 光学仪器装配很精密，拆卸后很难复原，因此严禁私自拆卸仪器。
- (9) 仪器用毕，应放回箱内或加罩，防止沾污和受潮。

实验 17 光的等厚干涉现象及其应用

通过透明薄膜上下两表面对入射光的两次反射，将入射光分为两束相干光，从而产生等厚干涉。牛顿环干涉和劈尖干涉是典型的等厚干涉，它们在光学测量中有着重要的应用。

一、用牛顿环测凸透镜曲率半径

[实验目的]

- (1) 了解牛顿环等厚干涉的原理和观察方法。
- (2) 利用干涉方法测量平/凸透镜的曲率半径。
- (3) 掌握读数显微镜的调节和使用。
- (4) 学习用逐差法处理数据。

[实验原理]

通常将同一光源发出的光分成两束光，在空间经过不同的路程后合在一起产生干涉。牛

顿环是典型的等厚干涉现象。

牛顿环实验装置通常是由光学玻璃制成的一个平面和一个曲率半径较大的球面组成，在两个表面之间形成一劈尖状空气薄层。以凸面为例，当单色光垂直入射时，在透镜表面相遇时就会发生干涉现象，空气膜厚度相同的地方形成相同的干涉条纹，这种干涉称作等厚干涉。在干涉条纹是以接触点为中心的一系列明暗相间的同心圆环（如图 5-1 所示），称牛顿环。

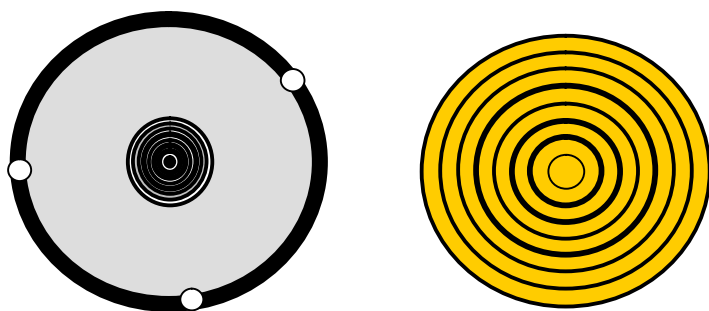


图 5-1 牛顿环干涉图样

（一）牛顿环的形成

如图 5-2 所示，由于透镜表面 B 点处的反射光 1 和玻璃板表面 C 点的反射光 2 在 B 点出发生干涉，在该处产生等厚干涉条纹。按照波动理论，设形成牛顿环处空气薄层厚度为 d ，两束相干光的光程差为：

$$\Delta = 2d + \lambda/2 = k\lambda$$

当适合下列条件时有

$$\Delta = 2d + \lambda/2 = k\lambda \quad (k = 1, 2, 3, \text{明环}) \quad (17-1)$$

$$\Delta = 2d + \lambda/2 = (2k + 1)\lambda/2 \quad (k = 1, 2, \text{暗环}) \quad (17-2)$$

式中 λ 为入射光的波长， $\lambda/2$ 是由于光在光密介质面上反射时产生的半波损失而引起的。公式 (17-2) 表明，当 $k=0$ 时（零级）， $d=0$ ，即平面玻璃和平凸透镜接触处的条纹为暗纹。光程差 Δ 仅与 d 有关，即厚度相同的地方干涉条纹相同。

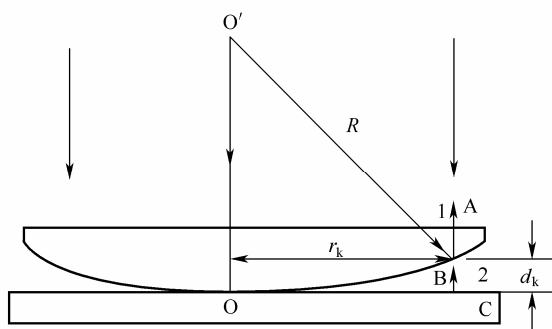


图 5-2 牛顿环

（二）平凸透镜曲率半径的测量

由几何关系，在 B 点可得：

$$r^2 = R^2 - (R^2 - d^2) = 2Rd - d^2$$

因为 $R \gg d$ 所以得

$$d = \frac{r^2}{2R}$$

上式表明 d 与 r^2 成正比，说明离中心越远，光程差增加越快，干涉条纹越来越密。

由公式： $r_k^2 = kR\lambda$ 得

$$R = \frac{r_k^2}{k\lambda} \dots\dots (\text{暗环})$$

可知若测出第 k 级暗环的半径 r_k ，且单色光的波长已知时，就能算出球面的曲率半径 r 。

但在实验中由于机械压力引起的形变以及球面上可能存在的微小尘埃，使得凸面和平面接触处不可能是一个理想的点，而是一个不很规则的圆斑，因此很难准确测出 r_k 的值。

比较简单的方法是测量距中心较远处的牛顿环直径。以暗环为例，当测得较远的第 k 级和第 $k+m$ 级的暗环直径 D_k 和 D_{k+m} 时，由 $r_k^2 = kR\lambda$ 得

$$\begin{aligned} r_{k+m}^2 - r_k^2 &= mR\lambda \\ D_{k+m}^2 - D_k^2 &= 4mR\lambda \\ R &= \frac{D_{k+m}^2 - D_k^2}{4m\lambda} \end{aligned}$$

若已知 λ ，则透镜的曲率半径 R 可用逐差法求得。

也可由作图法求透镜的曲率半径 R ：因 $r_k^2 = kR\lambda$ ，即表明 R_k^2 与 k 为线性关系，作 $D_k^2 - k$ 图，则图的斜率为 $4R\lambda$ ，若已知 λ 则可求出凸透镜的曲率半径 R 。

[实验仪器]

读数显微镜（如图 5-3 所示）、钠光灯、平凸透镜和平面玻璃（或牛顿环装置）。实验简图如图 5-4 所示。



图 5-3 读数显微镜

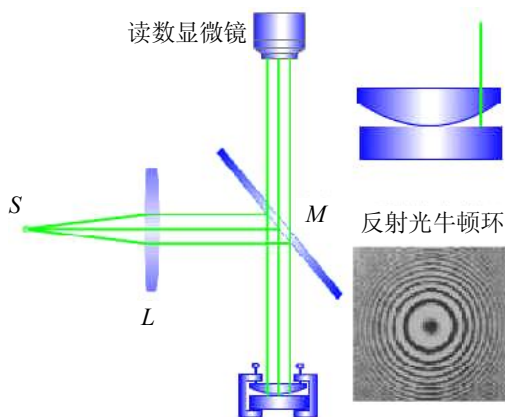


图 5-4 实验简图

[实验内容]

(1) 调节牛顿环仪。调节牛顿环仪的三个螺丝，使牛顿环面上出现清晰细小的同心圆环且位于圆框中心。

(2) 将牛顿环仪置于工作台上，使其正对着显微镜，通过转动调焦螺丝，使显微镜下降，尽量接近但不接触牛顿环仪。

(3) 缓缓旋动目镜，使镜筒内的十字叉丝清晰可见。

(4) 把钠灯放在显微镜正前方约 20cm 处。打开钠灯开关，预热 10min。待发出明亮的黄光后，调节物镜下方的反光镜方向。当在读数显微镜的视场中看到一片明亮的黄光时，就表明有一束平行单色光垂直照射到牛顿环仪上。

(5) 一边通过目镜观察牛顿环仪形成的牛顿环，一边缓缓转动调焦螺丝提升显微镜，使干涉条纹清晰。若看到的牛顿环中心与十字叉丝中心不重合，可轻轻移动牛顿环仪，使二者重合。

(6) 转动读数鼓轮，使十字叉丝向右移动，直到十字叉丝竖线对准第 20 暗环线为止（即外相切），开始记录位置读数，如图 5-5 所示。

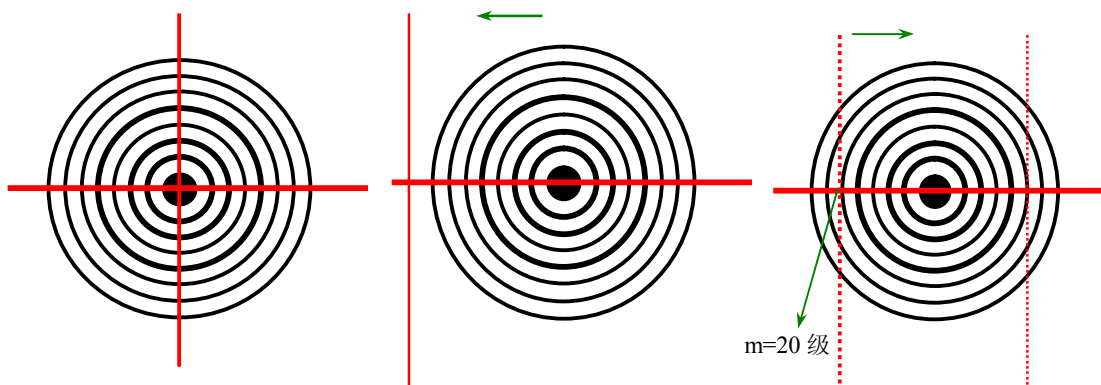


图 5-5 读数方法

(7) 沿相同方向，继续转动读数鼓轮，使十字叉丝竖线依次对准第 19, 18, 17, 16, 15, 14, 13, 12, 11, 10 暗环线，记录各环直径右端相应的位置读数。

(8) 沿相同方向继续转动读数鼓轮，使十字叉丝通过环心后，依次对准第 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 暗环线的内侧（内相切），读记各环直径左端的位置读数。

(9) 计算出 $\bar{R}$ 的不确定度和相对误差 E 。

[数据记录]

钠黄光波长 $\lambda = 589.3\text{nm} = 5.893 \times 10^{-4}\text{mm}$

环的级数	m	20	19	18	17	16
环的位置 mm	$x_1(\text{右})$					
	$x_2(\text{左})$					
环的直径 $D_m = x_2 - x_1 $						
环的级数	n	15	14	13	12	11
环的位置 mm	$x_1(\text{右})$					
	$x_2(\text{左})$					

环的直径 $D_n = x_2 - x_1 $					
D_m^2 (mm ²)					
D_n^2 (mm ²)					
$D_m^2 - D_n^2$ (mm ²)					
$\Delta D_m^2 - D_n^2 $					

[数据处理]

1. 用逐差法处理实验数据

$$\overline{D_m^2 - D_n^2} =$$

$$\Delta |D_m^2 - D_n^2| =$$

$$\bar{R} = \frac{\overline{D_m^2 - D_n^2}}{4(m-n)\lambda} =$$

$$\Delta \bar{R} = \frac{\Delta |D_m^2 - D_n^2|}{4(m-n)\lambda} =$$

$$R = \bar{R} \pm \Delta \bar{R} =$$

$$E = \frac{\Delta \bar{R}}{\bar{R}} = \frac{\Delta |D_m^2 - D_n^2|}{\overline{D_m^2 - D_n^2}} =$$

2. 作图法求 R

以 k 为横轴， $\overline{D_k^2}$ 为纵轴，作 $\overline{D_k^2} - k$ 图线，求图线的斜率。

由公式 $D_k^2 = 4R\lambda * k$ 算出 R 值。

[注意事项]

(1) 由于计算 R 时，只需知道环数差 ($m-n$)，故以哪一环为第一环可以任意选择，但一经选定，在整个测量过程中就不能改变。

(2) 注意读数不要数错，测量时应向一个方向转动，防止空程误差，否则数据全部作废。

(3) 测量过程中防止震动引起干涉条纹的变化。

(4) 实验时要将读数显微镜台下的反射镜翻转过来，不要让光从窗口经反射镜把光反射到载物台上，以免影响对暗环的观测。

[思考题]

(1) 读数显微镜如何正确操作？

(2) 空程差是如何产生的，怎么消除？

提示：移动读数显微镜，使其从左右两个方向对准同一目标的两次读数，似乎应该相同，但实际上由于螺杆和螺套不可能完全密切接触，螺旋转动方向改变时它们的接触状态也将改变，两次读数将不同，由此产生的测量误差称为空程误差。为了避免空程误差，使用读数显微镜时，应沿同一方向移动读数显微镜，使叉丝对准各个目标。

- (3) 为什么不采用 $r_k^2 = kR\lambda$ 作为测量表达式？
 (4) 为什么要采用单色光作为光源？
 (5) 牛顿环的中心是亮斑而非暗斑，对实验结果有影响吗？

二、劈尖干涉

[实验目的]

- (1) 观察劈尖干涉现象。
 (2) 练习用干涉法测微小厚度。

[实验仪器]

移测显微镜、钠光灯、单色光光源、两块光学平玻璃板、待测薄片。

[实验原理]

将两块光学平玻璃板迭在一起，在一端插入一薄片，则在两玻璃板间形成一空气劈尖。当用单色光垂直照射时，在劈尖薄膜上下两表面反射的两束光发生干涉。因为劈尖干涉的同一条纹是由劈尖相同厚度处的反射光相干产生的，其形状决定于劈尖等厚点的轨迹，所以是直条纹。因此，劈尖干涉条纹是一簇与两玻璃板交线平行且间隔相等的平行条纹，如图 5-6 所示。

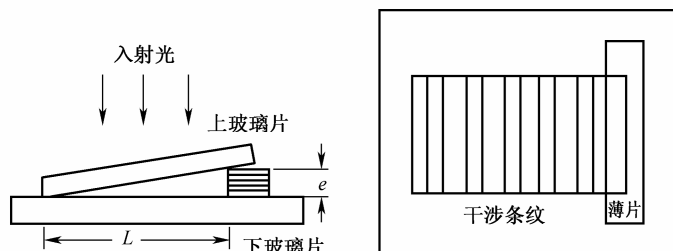


图 5-6 劈尖干涉

设入射光是波长为 λ 的单色光，待测薄片的厚度为 e 。劈尖上下表面反射光的光程差 δ (空气折射率近似为 1)：

$$\delta = 2e + \lambda/2$$

其中 $\lambda/2$ 一项是由于光从光疏媒质到光密媒质的交界面上反射时，发生半波损失所引起的。当光程差为半波长的奇数倍时，发生相消的干涉，产生暗条纹，即当

$$\delta = 2e + \lambda/2 = (2k + 1) \lambda/2 \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

时，为干涉暗条纹。与 k 级暗条纹对应的薄膜厚度为：

$$e = k \cdot \lambda / 2$$

设劈尖的尖端到薄片的距离为 L ， n 为单位长度内的干涉条纹数，则

$$e = n \cdot L \cdot \lambda / 2$$

因此在波长已知的单色光照射下，测量干涉条纹的线密度 n 和劈尖尖端到薄片的距离 L ，就能计算出待测薄片厚度 e 。

当 e 测定后，再把已知单色光源换成未知单色光源，可根据公式 $\lambda = 2e/nL$ ，重新测定 n 值，而 L 值不变，就可计算出未知单色光的波长。

[实验内容]

- (1) 检查两块平玻璃板上有无灰尘、指纹，如有要用擦镜纸擦净。
- (2) 将待测薄片夹在两块平玻璃之间，然后置于显微镜载物台上，正对显微镜下方（将图 5-7 所示转移 90° ）。

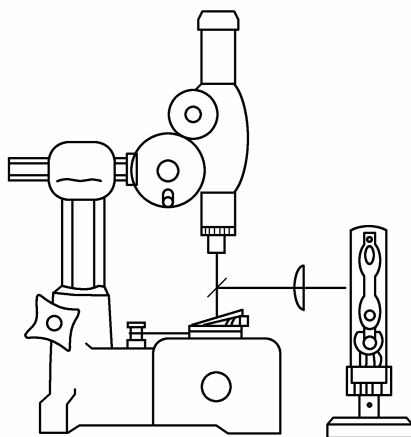


图 5-7 测薄片厚度的实验装置

- (3) 调节光源前的透镜，使光线射向显微镜下方 45° 的玻璃片，使显微镜视场亮度最大，并基本上满足入射光垂直于劈尖的要求。
- (4) 调节显微镜，以便能看到清晰的干涉条纹图像，要把劈尖安排在显微镜移测范围之内，要使夹在玻璃板内的薄片的边与干涉条纹平行。镜筒的移动方向要垂直于条纹。
- (5) 观察干涉条纹的分布特征。观察各级条纹的粗细是否一致。若改变薄片在平玻璃板间的位置，干涉条纹有无变化？怎么变化？并作出解释。
- (6) 测定两块玻璃板的交线“a”和待测薄片的边“b”两个位置，求得 L 值。测量 n 时可在不同的几个地方取 20 个暗条纹的间距，测三次，求得平均结果， λ 为已知， e 就可求出。
- (7) 将钠光光源换成另一未知波长的单色光源。根据已测得的 L 和 e 值，再重新测定 n 值，求出未知单色光的波长，并与标准值相比较，计算相对误差。

[思考题]

- (1) 用白光照射时能否看到劈尖干涉条纹呢？此时的条纹有何特征？
- (2) 试比较牛顿环和劈尖的干涉条纹的异同点。
- (3) 本实验中所要用的两块光学平玻璃可否用普通平玻璃代替？为什么？

实验 18 分光计的调节与使用

分光计是一种能精密测量角度的典型光学仪器，它的调整思想、方法和技巧在光学仪器中有一定的代表性，学会对它的调节，有助于掌握操作更为复杂的光学仪器。

[实验目的]

- (1) 了解分光计的结构和调节方法。
- (2) 测量三棱镜的顶角。

[实验仪器]

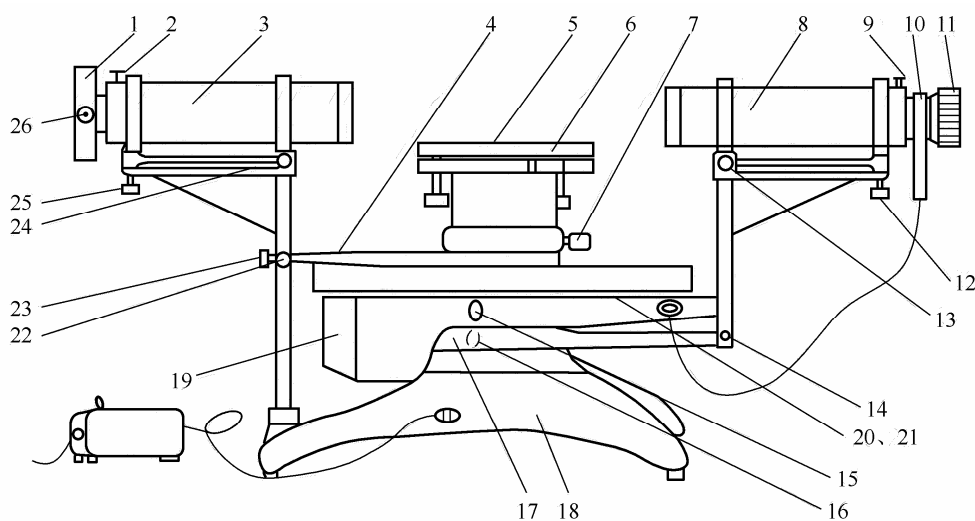
分光计如图 5-8 所示。



图 5-8 分光计

[实验原理]

1. 分光计的结构 (如图 5-9 所示)



1. 狭缝装置; 2. 狭缝装置锁紧螺钉; 3. 平行光管; 4. 制动架 (二); 5. 载物台;
6. 载物台调节螺钉 (3 只); 7. 载物台锁紧螺钉; 8. 望远镜; 9. 目镜锁紧螺钉;
10. 阿贝式自准直目镜; 11. 目镜调节手轮; 12. 望远镜仰角调节螺钉; 13. 望远镜水平调节螺钉;
14. 望远镜微调螺钉; 15. 转座与刻度盘止动螺钉; 16. 望远镜止动螺钉; 17. 制动架 (一);
18. 底座; 19. 转座; 20. 刻度盘; 21. 游标盘; 22. 游标盘微调螺钉; 23. 游标盘止动螺钉;
24. 平行光管水平调节螺钉; 25. 平行光管仰角调节螺钉; 26. 狭缝宽度调节手轮

图 5-9 分光计的结构

分光计具备有 4 个主要部件: 望远镜、平行光管、载物台、读数盘 (刻度盘、游标盘)。

(1) 望远镜 (如图 5-10 所示)。

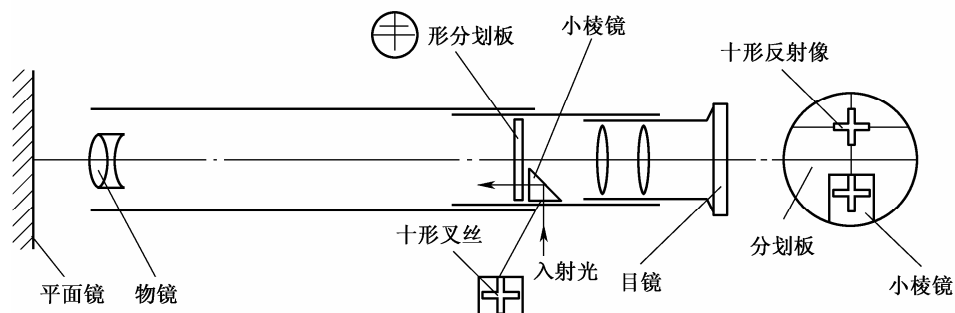


图 5-10 自准望远镜结构

望远镜是用来观察平行光的。分光计采用的是自准直望远镜（阿贝式）。它是由目镜、叉丝分划板和物镜三部分组成，分别装在三个套筒中，这三个套筒一个比一个大，彼此可以互相滑动，以便调节聚焦。如图 5-10 所示，中间的一个套筒装有一块圆形分划板，分划板面刻有“ $\oplus$ ”形叉丝，分划板的下方紧贴着装有一块 45° 全反射小棱镜，在与分划板相贴的小棱镜的直角面上，刻有一个“ $+$ ”形透光的叉丝。在望远镜看到的“ $+$ ”像就是这个叉丝（物）的像。叉丝套筒上正对着小棱镜的另一个直角面处开有小孔并装一小灯，小灯的光进入小孔经全反射小棱镜反射后，沿望远镜光轴方向照亮分划板，以便于调节和观测。

（2）平行光管（如图 5-11 所示）。

平行光管是用来产生平行光的，它由狭缝和会聚透镜组成，其结构如图 5-11 所示。狭缝与透镜之间的距离可以通过伸缩狭缝套筒进行调节，当狭缝调到透镜的焦平面上时，则狭缝发出的光经透镜后就成为平行光。狭缝的宽度可由图中的 2 进行调节。



1. 狭缝；2. 调节缝宽螺钉；3. 凸透镜

图 5-11 平行光管结构图

（3）载物平台。

载物平台是用来放待测物件的（如三棱镜、光栅等）。

（4）读数装置。

望远镜和载物台分别与刻度盘和角游标相连，它们的相对转动角度可从读数窗中读出，读数窗有 A、B 两个，它们相隔 180° ，从 A、B 两窗可分别读得望远镜转过的角度，然后取平均值，这样可消除中心轴可能存在的偏心。

本实验室中分光计角游标的最小分度为 $1'$ （主刻度盘上每小格为 $30'$ ，角游标 30 分格的弧长与刻度盘 29 分格的弧长相等），游标每小格之差，如图 5-12 所示。

例如图 5-12 右图的读数应为： $314^\circ 30' + 11' \approx 314^\circ 41'$

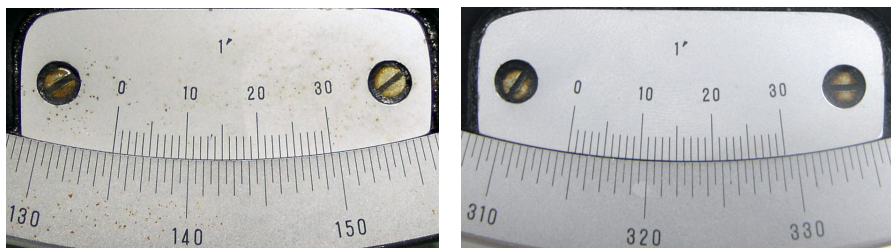


图 5-12 读数游标

图 5-13 中的外圆表示刻度盘，其中心在 O ；内圆表示载物台，其中心在 O' 。两个游标与载物台固联，并在其直径的两端，它们与刻度盘圆弧相接触。通过 O' 的虚线表示两游标零线连线。假定载物台从 φ_1 转到 φ_2 ，实际转过的角度为 θ ，而刻度盘上的读数为 φ_1 、 φ_2 ； φ'_1 、 φ'_2 。计算得到转角 $\theta_1 = \varphi'_1 - \varphi_1$ ， $\theta_2 = \varphi'_2 - \varphi_2$ 。由几何定理 $\alpha_1 = \theta_1/2$ ， $\alpha_2 = \theta_2/2$ ，而 $\theta = \alpha_1 + \alpha_2$ ，故载物台实际转过的角度： $\theta = \frac{1}{2} [|\varphi'_1 - \varphi_1| + |\varphi'_2 - \varphi_2|]$ 。

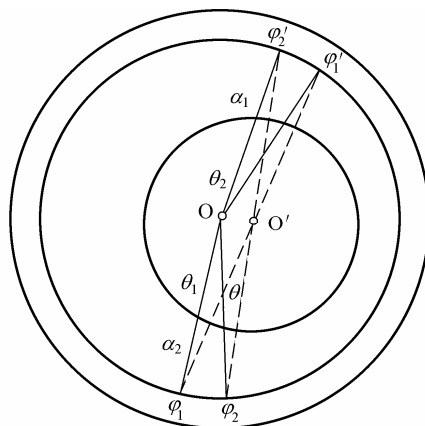


图 5-13 双游标消除偏心差示意图

2. 棱镜顶角的测量

示意图如图 5-14 所示。

(1) 反射法。

$$\varphi = \angle A + \angle 1 + \angle 2$$

$$\angle A = \angle 1 + \angle 2$$

$$\angle A = \frac{1}{2}\varphi$$

(2) 自准法。

$$\angle A = \pi - \varphi$$

[实验内容]

1. 分光计的调节

(1) 分光计的调节要求。

分光计要作精密测量，它必须首先满足下述两个要求：

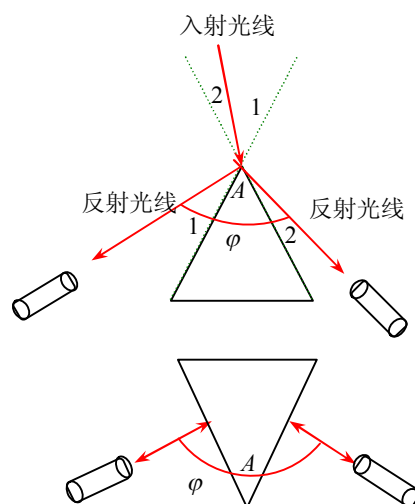


图 5-14 顶角测量示意图

1) 入射光和出射光应当是平行光。

2) 入射光和出射光的方向以及反射面和出射面的法线都与分光计的刻度盘平行。

为达此目的，对分光计的调节要求是：

- 望远镜聚焦于无穷远。
- 望远镜光轴与分光计中心轴垂直。
- 平行光管发射平行光，且其光轴也与分光计中心轴垂直。

(2) 分光计调节顺序。

1) 目测粗调。

为了便于后面的光路细调，需先目测粗调。即将分光计在实验桌上的位置摆正，使平行光管狭缝端正对着桌上的光源灯管；调节有关的倾角螺丝（载物台下三颗螺钉、望远镜与平行光管的倾角螺丝），使望远镜、平行光管、载物台大致水平；载物台调节到适当的高度，且其两层小圆板之间，留有适当的间隙，上层小圆板的三条半径线与下层小圆板的三个调节螺丝的位置对齐。

2) 调望远镜聚焦于无穷远（用“自准法”）。

①调节目镜，使得分划板为目镜焦平面：（使分划板上的叉丝“ $\neq$ ”清晰）。

望远镜里的圆形分划板上，有双叉丝线“ $\neq$ ”，分划板的下方有个“+”形的透光窗孔，仔细转动目镜头，使分划板上的叉丝清晰。

②伸缩镜桶，使得分划板为物镜焦平面：（使“+”在分划板上成像清晰）。

在载物台上放上小平面镜，然后松开望远镜筒上面的“叉丝筒制动螺丝”，伸缩叉丝筒，直至分划板上经平面镜反射回来的“+”像清晰，且无视差。如有视差（所谓视差，就是在叉丝清晰时在不同的位置看，其位置不同。），应反复调节，予以消除。至此，望远镜已聚焦无穷远处了，即能接收和检验平行光了，这种调节方法称为“自准法”。

[自准法]

调节目镜，使得视野中的分划板清晰；以分划板小“+”字发出的光，透过物镜，经物镜前小平面镜反射，再透过物镜，伸缩套筒，改变分划板位置，使得通过目镜看到清晰的小“+”字像，即通过小平面镜反射后的小十字成像于分划板上。上述调节结果，分划板为目镜和物镜的公共焦平面，这种调节方法称为“自准法”。

3) 调节望远镜光轴与分光计中心轴垂直（“各半调节法”）。

这一步仍要借助平行平面镜来调整。平面镜前后两个反射面是互相平行且与其底座的底面垂直的。若望远镜及载物台均已调成与分光计中心转轴垂直，则平面镜放在载物台任意位置上，都应看到如图 5-15 所示图像。将平台转过 180° 观察（如图 5-16 所示），也应如此。

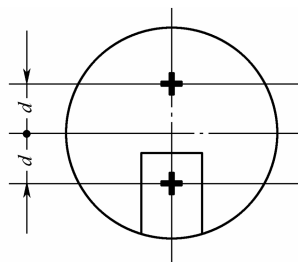


图 5-15 调整图示

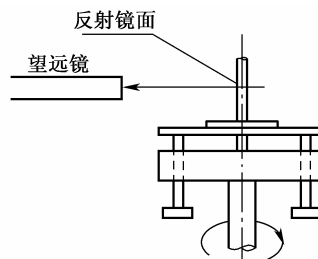


图 5-16 载物台示意图

若没有达到上述调整要求会出现什么现象呢？我们不妨讨论两种特殊情况：

①若反射镜面与分光计中心转轴平行，而与望远镜轴不垂直，则当转动载物台时，无论哪个反射面对准望远镜，在望远镜中看到叉丝的反射像总是偏上或总是偏下（如图 5-17 所示）。

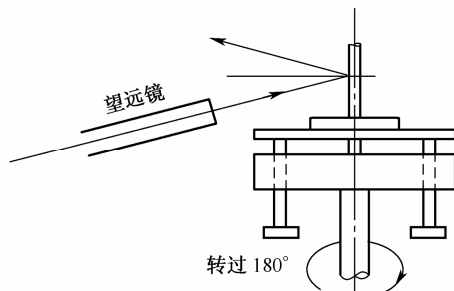


图 5-17 叉丝的反射像（一）

②若望远镜光轴与分光计中心转轴是垂直的，而反射镜面与转轴不平行，则当转动载物台，使一个反射面正对望远镜时若叉丝箱偏下；转过 180° ，使另一面正对望远镜，叉丝像必偏上（如图 5-18 所示）。

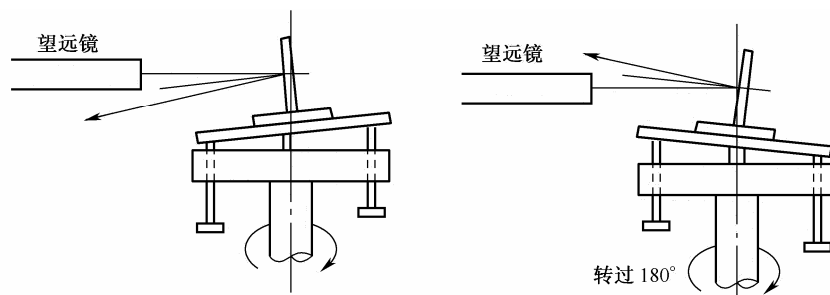


图 5-18 叉丝的反射像（二）

具体调节采用逐步逼近法，即如果“+”像逼近与分划板最上面的一条水平线相差一段距离，则调节“望远镜倾角螺丝”，使此距离减小一半，再调“载物台倾角螺丝”，消除另一半差距，使“+”像与上方的水平线重合（不是中间的那条水平线）。将刻度盘旋转 180° ，使平面镜的另一面对准望远镜，再用此法进行调节，也使“+”像与上方的水平线重合。经过几次反复调节后，在仅转动刻度盘的情况下，使望远镜先后对着平面镜的两面，都能看到“+”像与分划板上部的叉丝线重合，则望远镜的光轴即垂直分光计的中心轴了，如图 5-19 所示。

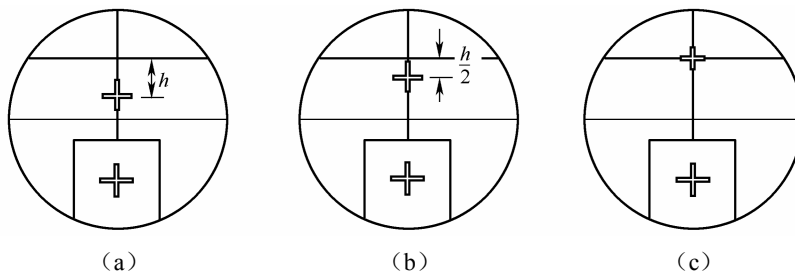


图 5-19 各半调节示意图

具体调节方法如下：

①将双面反射镜放在载物台上，使镜面处于任意两个载物台调平螺丝间连线的中垂面。

②目测粗调。用目测法调节载物台调平螺丝 6 及望远镜、平行光管光轴仰角调节螺丝 25，使载物台平面及望远镜、平行光管光轴与分光计中心轴大致垂直。

（由于望远镜视野很小，观察的范围有限，要从望远镜中观察到由双面反射镜反射的光线，应首先保证该反射光线能进入望远镜。因此，应先在望远镜外找到该反射光线。转动载物台，使望远镜光轴与双面反射镜的法线成一小角度，眼睛在望远镜外侧旁观察双面反射镜，找到由双面反射镜反射的绿十字叉丝像，并调节望远镜光轴仰角调节螺丝使得从双面反射镜的两个镜面反射的绿十字叉丝像的位置应与望远镜处于同一水平状态。）

③从望远镜中观察。转动载物台，使双面反射镜反射的光线进入望远镜内。此时在望远镜内出现清晰的绿十字叉丝像，细微旋转载物台调平螺丝 6，使绿十字叉丝像和分划板上方的十字刻度线完全重合（具体见逐步逼近法）。

④旋转载物台，使双面反射镜转过 180° ，则望远镜中所看到的绿十字叉丝像可能又不在准确位置，重复③所述的各调一半法，使绿十字叉丝像位于望远镜分划板上方的十字刻度线的水平横线上。

⑤重复上述步骤③、④，使经双面反射镜两个面反射的的绿十字叉丝像均位于望远镜分划板上方的十字刻度线的水平横线上。

至此，望远镜的光轴完全与分光计中心轴垂直。此后，望远镜光轴仰角调节螺丝（13）不能再任意调节。

4) 调节平行光管发射平行光，且其光轴垂直中心轴点亮汞灯，使光束射入平行光管，以前面调好的望远镜为准来调节平行光管。

①调节（伸缩）平行光管的狭缝体，使从望远镜中观察的狭缝亮线最清晰时，平行光管发射的光即为平行光了。

②转动狭缝体，使狭缝亮线呈水平状，再调节平行光管下面的倾角螺丝，改变平行光管的俯仰，使狭缝亮线位于望远镜分划板的中央，与叉丝线的水平线重合。这时平行光管的光轴与望远镜的光轴一致了，因而也垂直分光计中心轴了。此调节过程可用如图 5-20 的（a）、（b）两个图表示。分光计完全调好后，望远镜、平行光管、载物台的状态不能再改变（否则整个调节要重新进行），接下去可以进行各种实验测量了。

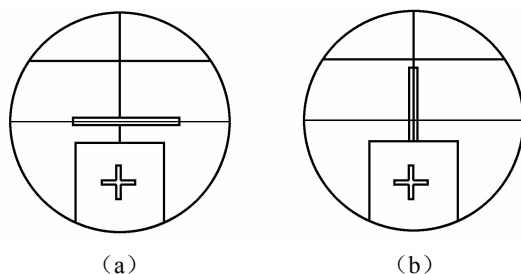


图 5-20 平行光管与分光计中心轴垂直调节示意图

2. 棱镜顶角的测量

转动望远镜，使它在 AC 面的反射方向，如图 5-21 所示，观察到狭缝的像与十字叉丝的

纵丝重合，记下此时左、右两游标对应的读数 $\varphi_{\text{左}}$ 和 $\varphi_{\text{右}}$ 。然后再将望远镜转至 AB 面的反射方向，同样当望远镜的十字叉线的纵丝与狭缝的像重合时，记下两游标的读数 $\varphi'_{\text{左}}$ 和 $\varphi'_{\text{右}}$ （AB、AC 面测量时的左、右游标是相同的）。

则顶角：

$$\angle A = \frac{1}{4} \left[(\overline{\varphi'_{\text{左}}} - \overline{\varphi_{\text{左}}}) + (\overline{\varphi'_{\text{右}}} - \overline{\varphi_{\text{右}}}) \right]$$

重复测量三次，求出顶角的平均值，并与实际值进行比较，求出相对误差。

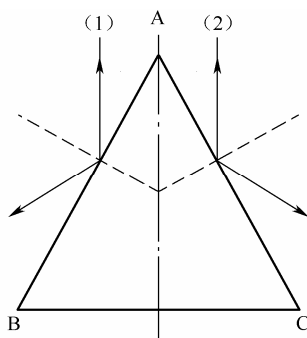


图 5-21 入射平行光

[数据记录 and 数据处理]

次数 \ 角度	一	二	三	平均
$\varphi_{\text{左}}$				
$\varphi_{\text{右}}$				
$\varphi'_{\text{左}}$				
$\varphi'_{\text{右}}$				

$$\overline{\angle A} = \frac{1}{4} \left[(\overline{\varphi'_{\text{左}}} - \overline{\varphi_{\text{左}}}) + (\overline{\varphi'_{\text{右}}} - \overline{\varphi_{\text{右}}}) \right]$$

$$E = \frac{|\overline{\angle A} - 60^\circ|}{60^\circ} \times 100\%$$

$$\Delta \overline{\angle A} = |\overline{\angle A} - 60^\circ|$$

$$\overline{\angle A} = \overline{\angle A} \pm \Delta \overline{\angle A}$$

[思考题]

(1) 分光仪的主要结构。

(2) 分光仪分划板的叉丝竖线清晰应该如何调节？要看清反射的“+”字又如何调节？

提示：调节望远镜的目镜可清晰地看见分划板上的叉丝竖线；调节望远镜的物镜可使“+”字反射像清晰地成像在分划板上。

(3) 如何调节分光仪使望远镜的主轴与载物台的中心轴垂直？

提示：“各半调节法”。

(4) 如何调节平行光管与望远镜共轴？

提示：转动狭缝 90° ，使狭缝亮线呈水平状，调节平行光管下面的倾角螺丝，使亮线与叉丝水平线重合即可。

(5) 顶角如何测量？

提示：采用自准法，转动望远镜对准棱镜一个面，使“+”字与叉丝竖线重合，记下此时刻度盘读数 ϕ_1 ，转动望远镜对准棱镜的另一个面，使“+”字与叉丝竖线重合，记下刻度盘读数 ϕ_2 ，则顶角为 $A = 180^\circ - |\phi_2 - \phi_1|$ 。

实验 19 光电效应测普朗克常数

1887 年 H.赫兹发现光电效应，此后许多物理学家对光电效应作了深入的研究，总结出光电效应的实验规律。1905 年爱因斯坦提出“光量子”假说，圆满地解释了光电效应，并给出光电方程。密立根用了十年的时间对光电效应进行定量的实验研究，证实了爱因斯坦光电方程的正确性，并精确测出了普朗克常数 h 。爱因斯坦和密立根因光电效应等方面的杰出贡献，分别于 1921 年和 1923 年获得诺贝尔物理奖。

利用光电效应已制成光电管、光电倍增管等光电器件，在科学技术中得到广泛应用。

[实验目的]

- (1) 了解光电效应及其规律，理解爱因斯坦光电方程的物理意义。
- (2) 用减速电位法测量电子初动能，求普朗克常数。

[实验仪器]

GD-IV 型微机光电效应实验仪。

[实验原理]

1. 光电效应

金属在光的照射下释放出电子的现象叫做光电效应。根据爱因斯坦的“光量子概念”，每一个光子具有能量 $E = h\nu$ ，当光照射到金属上时，其能量被电子吸收，一部分消耗于电子的逸出功 W ，另一部分转换为电子逸出金属表面后的功能。由能量守恒定律得

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W_s \quad (19-1)$$

此式称为爱因斯坦光电方程。式中 h 为普朗克常数， ν 为入射光的频率， m 为电子质量， v 为电子的最大速度，上式右边第一项为电子最大初动能。用光电方程圆满解释了光电效应的基本实验事实：

电子的初动能与入射光频率呈线性关系，与入射光的强度无关。任何金属都存在一截止频率 ν_0 ， $\nu_0 = W_s/h$ ， ν_0 又称红限，当入射光频率小于 ν_0 时，不论光的强度如何，都不产生光电效应。此外，光电流大小（即电子数目）只决定于光的强度。

2. 验证爱因斯坦光电方程，求普朗克常数

本实验采用“减速电位法”决定电子的最大初动能，并由此求出普朗克常数 h 。实验原理如图 5-22 所示。图中 K 为光电管阴极，A 为阳极。当频率为 ν 的单色光入射到光电管阴极上时，电子从阴极逸出，向阳极运动，形成光电流。当 $U_{AK} = U_A - U_K$ 为正值时， U_{AK} 越大，光电流 I_{AK} 越大，当电压 U_{AK} 达到一定值时，光电流饱和，如图 5-23 中虚线所示。若 U_{AK} 为负（即在光电管上减速电位），光电流逐渐减小，直到 U_{AK} 达到某一负值 U_s 时，光电流为零， U_s 称

为遏止电位或截止电压。这是因为从阴极逸出的具有最大初动能的电子不能穿过反向电场到达阳极，即

$$eU_s = \frac{1}{2}mv^2 \quad (19-2)$$

将式(19-2)式代入式(19-1)式得：

$$h\nu = e|U_s| + W_s$$

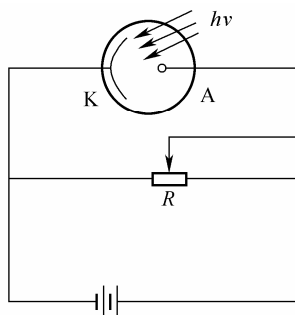


图 5-22 光电效应实验原理图

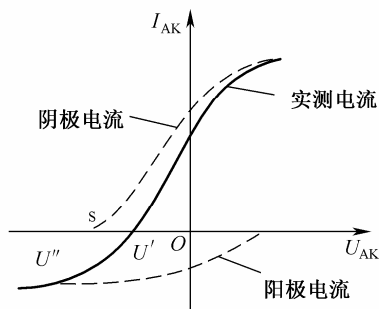


图 5-23 关系图

当用不同频率的单色光照射时，有：

$$h\nu_1 = e|U_{s1}| + W_s$$

$$h\nu_2 = e|U_{s2}| + W_s$$

联立其中任意两个方程，得：

$$h = \frac{e(U_{si} - U_{sj})}{\nu_i - \nu_j} \quad (19-3)$$

由此可见，爱因斯坦光电方程提供了一种测量普朗克常数的方法，如果从实验所得的 $|U_s|-\nu$ 关系是一条直线（如图 5-24 所示），其斜率 $k = h/e$ ， e 为电子电荷，由此可求出普朗克常数。这也就证实了光电方程的正确性。

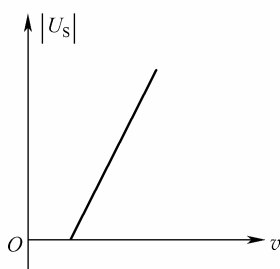


图 5-24 $|U_s|-\nu$ 关系图

3. 光电管的实际 $U-I$ 特性曲线

由于下述原因光电管的实测 $U-I$ 特性曲线如图 5-23 中实线所示，光电流没有一个锐截止点。

(1) 在光电管制造过程中，有些光阴极物质溅射到阳极上，受光照射（包括漫反射光）时，阳极也会发射光电子，使光电管极间出现反向电流（阳极电流）。

(2) 无光照射时，在外加电压下，光电管中仍有微弱电流流过，称为暗电流。这是由于

光电管电极在常温下的热电子发射以及管座和管壳外表面的漏电造成的。

(3) 阳极和阴极材料不同引起的接触电位差。

4. 遏止电位的确定

由于上述原因使遏止电位 U_s 的确定带有很大的任意性。实验时应根据光电管的不同结构与性能, 采用不同方法确定 U_s 。

(1) 阴极是平面电极、阳极做成大环形可加热结构的光电管(如国产 1997 型或 GDh-I 型)其阴极电流上升很快, 反向电流较小, 特性曲线与横轴的交点 U' 可近似当作遏止电压, 这种方法称为“交点法”。

(2) 阴极为球壳形、阳极为半径比阴极小得多的同心小球的光电管(如 GD-4 型), 反向电流容易饱和, 可以把反向电流进入饱和时的拐点(图 19-2 中 U'') 电压近似作为遏止电位, 这种方法叫做“拐点法”。

不过, 不论采用什么方法, 均在不同程度上引进系统误差, 使测量 h 的误差较大。

[实验装置]

本实验采用 GD-IV 型微机光电效应实验仪, 其原理框图如图 5-25 所示。包括四部分:

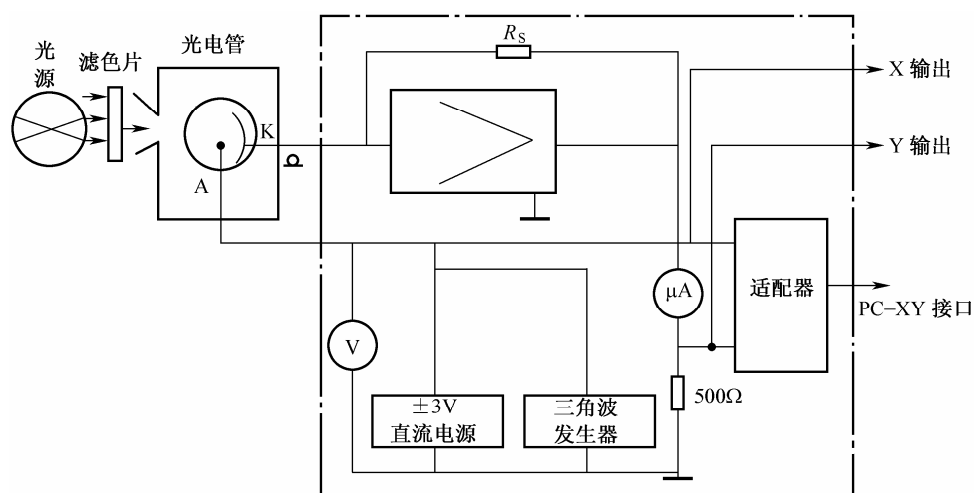


图 5-25 实验仪器原理框图

(1) 光源。用高压汞灯, 灯泡选用 GGQ-50WHg 型, 光谱范围在 302.3~872.0nm 之间。

(2) 光电管。采用 GDh-1 型光电管, 阳极为镍圈, 阴极为银一氧一钾(Ag-O-K), 光谱范围为 340~700nm。它装在带有入射窗口的暗盒内, 高度可调, 入射窗口配有 $\Phi 5\text{mm}$ 孔径光阑。暗盒面板如图 5-26 所示。

(3) 滤色片。用 NG 型滤色片获得单色光, 它是一组(5块)宽带型有色玻璃组合滤色片, 有选通 365.0nm、405.7nm、435.8nm、546.1nm、577.0nm 谱线的能力。

(4) 微电流测量放大器。电流测量范围 $10^{-5}\sim 10^{-13}\text{A}$, 分 6 挡, 十进制变换, 微电流指示用 3 位半数字电流表, 读数精度分 $0.1\mu\text{A}$ 和 $1\mu\text{A}$ 两挡。机内附有光电管工作电源, 分直流和扫描两挡, 直流



用于手动调节电压，扫描用于记录仪或微机自动测量时，自动改变电压。直流电压输出 $0 \sim \pm 3\text{V}$ ，连续可调。扫描电压为三角波，幅度 $0 \sim \pm 3\text{V}$ ，周期 50s 。微电流测量放大器面板如图 5-27 所示。



图 5-27 微电流测量放大器面板示意图

[实验内容]

一、手动测量光电管的 $U-I$ 特性曲线

(1) 将光源、光电管暗盒、微电流放大器等安放在适当的位置，光源与光电管的距离取 $30 \sim 50\text{cm}$ ，注意两者光路共轴。断开光电管阴极 K 与微电流测量放大器后板面上的“电流输入”接线，接通微电流测量放大器电源，预热 $10 \sim 20$ 分钟。进行微电流测量放大器的调零和校准，方法是：“校准，调零，测量”开关置于“调零，校准”挡，置“电流调节”开关于“短路”挡，调节“调零”旋钮，使电流表显示为“0.00”，置“电流调节”形状于“校准”，调节“校准”旋钮，使电流表显示为 100。然后置“调零，校准，测量”开关于测量挡，旋动“电流调节”开关于各挡，电流表指示都应为零（在 10^{-7} 挡因零漂，指示应不大于 4）。否则应反复调整，使之都能满足要求，才可开始测量（在测量过程中若零点漂移，可随时进行调零和校准操作，但要注意断开电流输入电缆）。

(2) 用电缆将光电管阴极 K 与微电流放大器后面板上的“电流输入”相连，用双芯导线将光电管阳极与地连接到后面板的“电压输出”插座上，点亮汞灯。

(3) 测量光电管的暗电流。用遮光罩盖住光电管暗盒窗口，将“调零，校准，测量”开关置于“测量”，测量放大器的电压选择置于“直流”，“电流调节”先置于 10^{-7} ，然后根据显示电流值置于相应挡（每挡最大值为 100，超出 100 时，就将电流挡上调一档）。旋动“电压调节”旋钮，测出 $-3 \sim +3\text{V}$ 间若干电压下相对应的电流值 I_0 ，即为光电管暗电流（每隔 1V 测一次）。

(4) 测不同波长的单色光照射时光电管的 $U-I$ 特性曲线。取下遮光罩，让光源出射孔对准暗盒窗口，调节光阑转盘，使光阑为 5mm ，换上滤色片，滤色片从最短波长起逐次更换，每个滤色片从 -3V 开始逐步改变光电管阳极电压 U ，记录相应的光电流 I ，（每隔 1V 测一次）逐次换上 5 个滤色片，测出不同波长下的 $U-I$ 值，在电流变化明显的地方多测几个点，以便确定出 U_s （每次测量前应将电压至 -3V ，电流调节置于 10^{-7} ）。

(5) 以 U 为横坐标， I 为纵坐标，在同一坐标纸上，作不同波长的单色光照射时的 $U-I$ 特性曲线，确定不同频率 ν_i 对应的截止电压 U_s 。

二、测量不同频率光照射时的 U_s ，求普朗克常数

将“电流调节”置于 10^{-7} 挡，逐次换上 5 个滤色片，测出不同波长下电流为零时的电压 U ，以 ν 为横坐标， U 为纵坐标，作 $U-\nu$ ($C=\lambda\nu$) 图线，再由图线的斜率求出普朗克常数 h 并与公认值比较，估算误差。

[数据记录]

λ (nm) I (mA) U (V)	0	365	405	436	546	577
-3						
-2						
-1						
0						
1						
2						
3						
U_s (V)						

[注意事项]

- (1) 测量时，光电管与光源间的距离应与“调零，校准”时保持一致。
- (2) 汞灯点亮后，直到测量完毕，方可熄灭，中途不能随意开关。

实验 20 全息照相技术

全息照相技术是 20 世纪 60 年代发展起来的一种立体摄影和波前再现的新技术，也是一种记录和再现光波的方法，它属于近代光学范畴。

[实验目的]

- (1) 了解全息照相的基本原理和特点。
- (2) 学习摄制静物全息照相的方法和技术。
- (3) 学习全息照片再现的观察方法。

[实验仪器]

全息实验防震台，He-Ne 激光器，扩束透镜，分束板，反射镜，毛玻璃屏，可调节支架，皮尺，秒表，照片冲洗设备，显影液，定影液。

[实验原理]

全息照相术和普通照相术是把肉眼所看到的景物信息记录在胶片上的两种不同的方法。普通照相术只能记录光波的振幅分布，却无法记录光波相应的信息，故只能得到物体的平面像。全息照相术能记录物体光波的全部信息（振幅和相位），从而得到立体像。

1. 全息照相的记录

怎样才能把物光的振幅和位相两个信息同时记录下来呢？由物理光学可知，利用干涉的方法，以干涉条纹的形式就可记录下物光的全部信息。

采用相干性极好的激光作光源，让其中一束光均匀照亮被摄物的整个表面，并使物体表面漫射的光（称物光）照射到感光板上；同时将由同一激光器发出的光束分出一部分（称参考光），直接均匀地照射到感光板上，使之与物光交叠发生干涉，同时将干涉条纹记录在照相底片（感光片）上，经过显影、定影等处理后，就成了一张有干涉条纹的全息照相的“照片”。干涉图样的形状反映了物光与参考光束间的位相关系，而干涉条纹明暗对比程度（称为反差）反映了光束的强度关系。所以，这样的“照片”把物光波的全部信息都记录下来了。

2. 全息照相的再现

由于全息摄影在感光板上记录的不是被摄物的直接形象，而是复杂的干涉条纹，故在观察时必须采用一定的观察手段，再现观察的光路，如图 5-28 所示。用一束相干光（激光）照射全息“照片”，此时，全息照片相当于一个光栅，使再现光衍射。当我们在全息照片的衍射方向进行观察时，就可以看到与原来物体完全相同的立体三维图像（虚像）。若改变全息照片相对于激光束的方位或改变观察方向，会看到被摄物体的像发生变化，或观察不到被摄物的像。

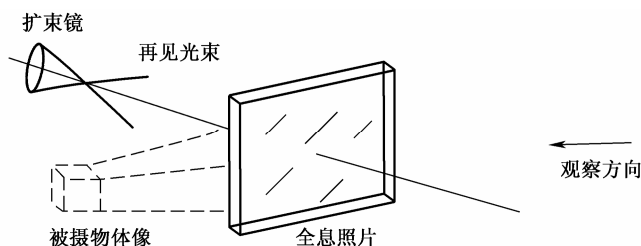


图 5-28 全息照片的再现观察方式

3. 全息照相的特点

- (1) 全息照片具有三维逼真性，且有显著的视差特性。
- (2) 全息照片具有可分割的特性，即照片的局部可以代替全体。不管多么小的碎片，总能再现整个图像。
- (3) 全息照片没有正片和负片之分，两者都能获得相同的再现像。
- (4) 同一张感光板可多次重复曝光记录。一般只要在每次拍摄时稍改变感光板方向，或改变参考光的入射方向，或改变物体在空间的位置，而再现时只要适当转动全息照片即可。
- (5) 全息照片再现像的景深范围很大。像的亮度可调，亮暗的调节可达 10^3 倍，且可方便地放大缩小。

全息照相的缺点是只能用同一种单色波长的光才能再现它的记录形象，所以彩色全息摄影很困难。另外在拍摄过程中，景物必须静止不动，计算表明，移动 10^{-5}cm ，就会破坏波峰与波谷之间的关系，使干涉图像发生移动和模糊，从而破坏全息图。

[仪器介绍]

1. 光源

利用光的干涉进行全息记录，要求光源满足相干条件，故一般都采用相干性极好的激光

作光源（如小型的 He-Ne 激光器，功率约为 1~6mW）。

2. 记录介质

记录全息图应使用性能良好的感光材料，首先要求具有较高的分辨率，一般全息图中干涉条纹间距很小，要采用 $\eta > 1000$ 条/mm 的感光材料，而普通照相感光片仅为 50~1000 条/mm。感光材料分辨率的提高导致感光速度下降，故全息照相的曝光时间要比普通照相长得得多，一般需几秒甚至几十分钟，具体时间由激光光强、拍摄光路、被摄物的大小和反射性能决定。

3. 光路系统

为了维持物光与参考光具有良好的相干性以及获得最好的干涉效果，需要按一定规则布置光路，如图 5-22 所示。安排光路时应考虑：

（1）尽可能减小物光与参考光的光程差，一般平均光程差控制在 1cm 以内。

（2）在全息感光板上，参考光与物光的光强比，一般选取范围为 4:1~10:1，为此需选择反射率合适的分光板，合适的扩束镜及衰减片来满足要求。

（3）入射于感光板上的参考光与物光的夹角 θ ，一般选取 $15^\circ \sim 30^\circ$ 。

4. 全息实验台

在拍摄全息照片中利用一个防震平台系统来保证所需要的光学稳定是绝对必要的，气垫浮动全息台可满足一般实验摄像要求。为了获得较好的防震效果，实验室一般应设在底层及离震源较远处，防震效果可用放在台上的干涉仪来检查。

[实验内容]

1. 拍摄静物的全息照片

拍摄时，应按下列工作程序检查实验准备工作：

参考图 5-29 设计光路，布置光学元件拍摄所给静物的全息照片。

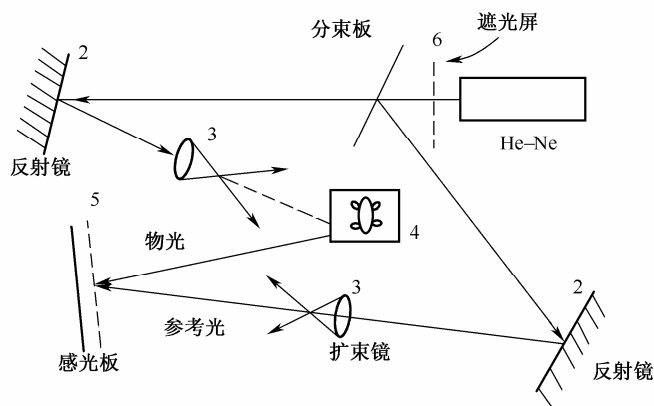


图 5-29 全息静物摄影参考光路图

（1）被摄物体及全息感光板是否被均匀照明。

（2）物光与参考光的光程是否被控制在 1cm 以内。

（3）参考光与物光的光强比是否合适。

（4）各光学元件是否夹持牢固稳定。

（5）有无杂散光干扰。

拍摄具体参数由实验室提供，安置感光干板时要用遮光板遮住激光，特别注意感光干板

的感光乳胶面应向着激光束。曝光时移去遮光板，曝光时切勿走动或高声讲话，待光开关关闭后，取下干板进行冲洗。

2. 冲洗感光板

在清洁的条件下对感光后的干板进行显影、停影和定影。不能用手指或竹夹接触干板的中间位置。对于天津 I 型干板，可在对其不敏感的暗绿灯下操作。

(1) 显影推荐用 D-19 显影液，其配方见附表 2。显影过程中应不断地搅动显影液。在暗绿色灯光下观看干板，曝光部分呈现黑色斑纹时即可停止追影。

(2) 停影。显影后的干板先用蒸馏水漂洗，然后立即放入停影液（其配方是冰醋酸 13.5mL 加蒸馏水至 1000mL）中，停影时间约为 1~2 分钟。

(3) 定影。停影后的干板先用蒸馏水漂洗，然后放到定影液（推荐用 F-5 定影液，其配方见附表 2）中。定影液的温度为 $19^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，定影时间 5 分钟左右。定影时要不断搅动定影液。定影的干板在 $18^{\circ}\text{C}\sim 21^{\circ}\text{C}$ 的水中洗 10~20 分钟，然后夹在夹子上晾干，这就得到了漫反射的全息照片。

(4) 检查拍摄效果。将拍好的全息照片的药膜面对着白光（日光灯或白炽灯）进行观察，同时上下左右微微转动底片。如到某一位置时，能看到彩色的衍射光谱（简称为“彩虹”），就说明干板上已记录了全息图。彩虹越亮，衍射效率越高，再现的像就越清晰。

(5) 漂白处理。漂白液的种类很多，推荐用硫酸铜漂白液，其配方见附表 2。漂白前先将全息照片用清水浸湿，用夹子夹住未曝光的地方，放在漂白液中漂洗。看到黑色银粒变白就及时从漂白液中取出，在流水中清洗（水不要直接冲到药膜上）30 分钟左右，以便洗掉余物使全息照片能够保存，最后晾干。

3. 观察全息照片的再现像

按图 5-21 光路，观察已摄得的静物全息照片。

(1) 观察虚像。根据所给拍摄全息照片参数，将全息照片放入与拍摄时参考光几何参数一致的激光中用眼睛透过全息照片，寻找再现像。

(2) 观察实像。利用未扩束的激光直射全息照片的反面，选取适当的夹角 θ ，利用毛玻璃漫射观察屏来接收再现实像。

[注意事项]

(1) 保持各光学元件清洁，以免影响全息图像的质量，若光学表面被沾污或有灰尘等，应按实验室规定的方法清洁处理，切勿用手、手帕或纸片擦拭。

(2) 拍摄时应防止杂光干扰。

(3) 曝光时切勿触及全息台，人员也不宜随意走动，大声喧哗，以免引起震动，影响全息图像的品质及效率。

(4) 显影、定影、漂白和水洗的条件与程序，应严格按照规定进行，实验结束后应整理实验环境，并将药水倒回原瓶。

(5) 绝对不能用眼睛直视未扩束的激光束，以免造成视网膜永久损伤。

[思考题]

(1) 试总结全息照相与一般照相的区别。

(2) 从拍摄技术和条件等角度对摄得的全息照片进行评价。

实验 21 密立根油滴实验

美国物理学家密立根 (R.A.Milikan) 从 1909~1917 年所做的测量微小油滴上所带电荷的工作, 即所谓油滴实验, 在全世界久负盛名, 堪称实验物理的典范。他精确地测定了电子电荷的值, 直接证实了电荷的不连续性, 所以说, 密立根油滴实验在物理学发展史上具有重要的意义。这个实验的原理清晰易懂, 设备和方法简单、直观而有效, 结果富有说服力, 是一个富有启发性的实验。

[实验目的]

- (1) 用微机密立根油滴仪测量电子电荷。
- (2) 了解 CCD 图像传感器的原理与应用, 学习电视显微测量方法。

[实验仪器]

密立根油滴仪, 摄像机等。

[实验原理]

一个质量为 m 带电量为 q 的油滴处在两块平行极板之间, 在平行极板未加电压时, 油滴受重力作用而加速下降。由于空气阻力的作用, 下降一段距离后, 油滴将作匀速运动, 速度为 v_g 。这时重力与阻力平衡 (空气浮力忽略不计), 如图 5-30 所示。

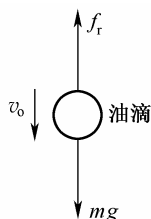


图 5-30 受力分析

根据斯托克斯定律, 粘滞阻力为:

$$f_r = 6\pi a \eta v_g \quad (21-1)$$

式中, η 是空气的粘滞系数, a 是油滴的半径。这时有:

$$6\pi a \eta v_g = mg \quad (21-2)$$

当在平行极板上加电压 U 时, 油滴处在场强为 E 的静电场中, 设电场力 qE 与重力相反, 如图 5-31 所示。

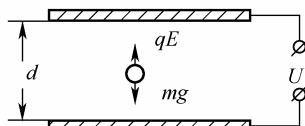


图 5-31 静电场的油滴

使油滴受电场力加速上升, 由于空气阻力作用, 上升一段距离后, 油滴所受的空气阻力、重力与电场力达到平衡 (空气浮力忽略不计), 油滴将匀速上升, 此时速度为 v_e , 则有:

$$6\pi a\eta v_e = qE - mg \quad (21-3)$$

又因为

$$E = \frac{U}{d} \quad (21-4)$$

由上式 (21-2)、(21-3)、(21-4) 可解出:

$$q = mg \frac{d}{U} \left(\frac{v_g + v_e}{v_g} \right) \quad (21-5)$$

为测定油滴所带电荷 q , 除应测出 U 、 d 和速度 v_g 、 v_e 外, 还需知油滴质量 m 。由于空气的悬浮和表面张力作用, 可将油滴看作圆球, 其质量为:

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (21-6)$$

式中, ρ 是油滴的密度。

由式 (21-2) 和式 (21-6) 得油滴的半径:

$$a = \left(\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21-7)$$

考虑到油滴非常小, 空气已不能看成连续媒质, 空气的粘滞系数 η 应修正为:

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (21-8)$$

式中, b 为修正常数, p 为空气压强, a 为未经修正的油滴半径。由于它在修正项中, 不必计算得很精确, 由式 (21-7) 计算就够了。

实验时取油滴匀速上升的距离相等, 设都为 l , 测出油滴匀速下降的时间 t_e , 则

$$v_g = \frac{l}{t_g}, \quad v_e = \frac{l}{t_e} \quad (21-9)$$

将式 (21-6)、(21-7)、(21-8)、(21-9) 代入式 (21-5), 可得:

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{b} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d}{U} \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21-10)$$

令

$$K = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{b} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot d$$

得:

$$q = K \left(\frac{1}{t_e} + \frac{1}{t_g} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{U} \quad (21-11)$$

此式便是动态 (非平衡) 法测油滴的公式。

下面导出静态 (平衡) 法测油滴电荷的公式。

调节平行极板间的电压，使油滴不动， $v_e = 0$ ，即由式（21-10）可求得：

$$q = K \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{U}$$

或者

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{pa} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d}{U} \quad (21-12)$$

上式即为静态法测油滴电荷的公式。

为了求电子电荷 e ，对实验测得的各个电荷 q_i 求最大公约数，就是基本电荷 e 的值，也就是电子的电荷 e 。也可以测量同一油滴所带电荷的改变量 Δq_i （可以用紫外线或放射源照射油滴，使它所带电荷改变），这时 Δq_i 应近似为某一最小单位的整数倍，此最小单位即为基本电荷 e 。

[实验装置]

微机密立根油滴仪由油滴仪和 CCD 成像系统组成，改变了从显微镜中观察油滴的传方式，而用 CCD 摄像机成像，将油滴在监视器屏幕上显示。微机密立根油滴仪构成示意如图 5-32 所示。

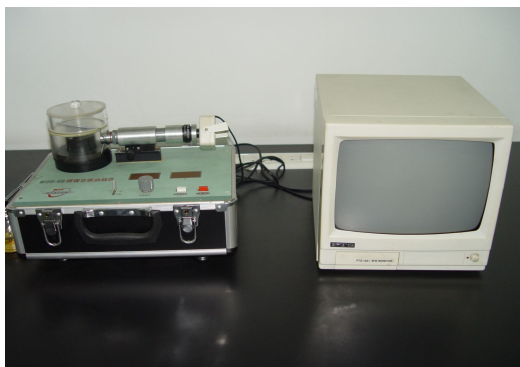


图 5-32 微机密立根油滴仪

一、油滴仪（本身主要包括油滴盒和电源两部分）

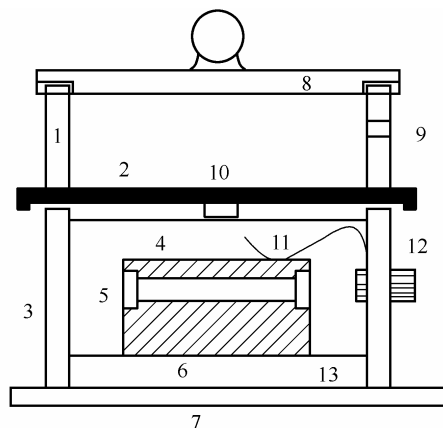
（1）油滴盒，如图 5-33 所示。

中间是两个圆形平行板，间距为 d ，放在有机玻璃防风罩中。上电极板中心有一个直径 0.4mm 的小孔，进入上下电极之间，由聚光电珠或发光二极管照明。防风罩前装有测量显微镜。目镜中有分划板，相当于线视场 0.300cm ，用以测量油滴均匀速度 v_g 或 v_e 。分划板的刻度如图 5-34 所示。

（2）电源部分，提供下列几种电源：

1) 2.2V 油滴照明灯电源或发光二极管电源。

2) 500V 直流平衡电压。大小可连续调节，并可从电压表（指针式或数字式）上直接读出。平衡电压由换向开关换向，以满足正、负电荷以不同极性电压的需要。



1. 油雾室；2. 油雾孔开关；3. 防风罩；4. 上电极；5. 油滴盒；6. 下电极；
7. 座架；8. 上盖板；9. 喷雾口；10. 油雾孔；11. 上电极压簧；12. 上电极插孔；13. 油滴盒底座

图 5-33 油滴盒

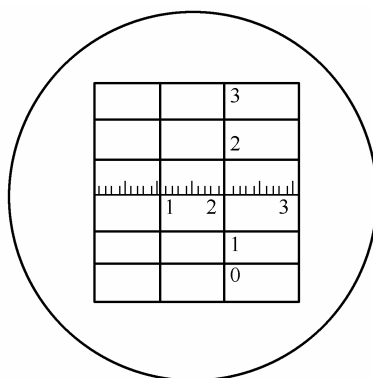


图 5-34 分划板刻度

3) 300V 直流升降电压。该电压大小可连续调节，并可通过拨动开关叠加在平衡电压上，以控制油滴在平行极板间的上下位置。注意在读取平衡电压时，升降电压应拨到零。

4) 12v 直流稳压电源，作为 CCD 摄像机的电源。

二、仪器面板（结构如图 5-35 所示）

(1) 电源控制开关按钮：按下按钮，电源接通，整机工作。

(2) 功能控制开关：有平衡、升降、测量三挡。

1) 当处于中间位置即“平衡”挡时，可用平衡电压调节旋钮 K_3 来调节平衡电压，使被测量油滴处于平衡状态。

2) 打向“升降”挡时，上下电极在平衡电压的基础上自动增加 DC 200~300V 的提升电压。

3) 打向“测量”挡时，极板间电压为 0，被测量油滴处于被测量阶段而匀速下落，并同时计时；油滴下落到预定距离时，迅速拨到平衡挡，同时停止计时。本机可用手动计时和联动计时，也可机外用秒表等腰三角形计时工具计时。



图 5-35 微机密立根油滴仪面板

(3) 平衡电压调节旋钮：可调节“平衡”挡时的极板间的电压，调节电压 DC 0~500V 左右。

(4) 数字电压表：显示被测量油滴下降预定距离间的电压。

(5) 数字秒表：显示被测量油滴下降预定距离的时间。

(6) 视频输出插座：在本机配用 CCD 摄像头时用，输出至监视器，监视器阻抗选择开关拨至 75Ω处。

(7) 照明灯室：内置半永久性照明灯，单灯使用寿命大于三年。

(8) 小水泡：调节仪器底部两只调平螺丝，使水泡处于中间，此时平行板处于水平位置。

(9) 上、下电极：组成一个平行板电容器，加上电压时，板间形成相对均匀电磁场，可使带电油滴处于平衡状态。

(10) 秒表清零键：按一下该键，清除内存，秒表显示 00.0 秒。

(11) 显微镜：显示油滴成像。

(12) CCD 视频输入和 CCD 电源共用座：配备 CCD 成像系统时用。

三、CCD 成像系统

CCD 是电荷耦合器件的英文缩写（即 Charge Coupled Device），它是固体图像传感器的核心器件。由它制成的摄像机，可把光学图像变为视频电信号，由视频电缆接到监视器上显示；或接录像机，或接计算机进行处理。本实验使用灵敏度分辨率甚高的黑白 CCD 摄像机，用高分辨率（800 电视线）的黑白监视器，将显微镜观察到的油滴运动图像，清晰逼真地显示在屏幕上，以便观察和测量。

本实验还用到电子秒表（精度 1/100s）和雾器、钟油（中华牌 701 型）。

[实验内容]

用静态法测量油滴电荷，步骤如下：

(1) 参照图 5-32, 将 CCD 摄像机装上镜头, 镜头调焦距离置于 0.25m 处。调节测量显微镜的目镜放入接口中(应注意将上镜插到底)。把接口放到镜头上, 把 75W 视频电缆的一端接摄像机的视频输出端 (Video out), 另一端接监视器的视频输入端 (Video in)。将 12V 直流稳压电源接到摄像机电源输入端(注意正负极)。把 CCD 摄像机后面板上 AGC 置于 ON, E.E. 电子曝光置于 OFF, g (预失真校正) 置于 0.45。监视器的阻抗匹配置于 75W (参看监视器及摄像机使用说明书)。

(2) 将仪器放平稳: 调整左右两只调平螺栓, 使水准泡指示水平(气泡调节至居中), 这里油滴盒处于水平状态。

(3) 打开监视器、油滴仪及摄像机的电源, 各指示灯应亮, 监视器屏幕上出现光栅。

(4) 将油滴盒和油雾室用布擦拭干净, 用镜头纸把显微镜和导光棒端面弄清洁: 特别注意油滴盒上电极中央的小孔保持畅通, 油雾孔无油膜堵住。为增加反光, 可将油滴盒的胶木圆环上贴上白纸条, 而正对显微镜的地方, 纸条不要太长, 以免背景过亮, 使对比度降低。旋动照明灯的灯座, 使照在胶木圆环白纸条上的光又亮又集中。把油滴盒和油雾的盖子盖上, 油雾孔开启, 检查导光棒是否插入胶木圆环上的进光孔中, 上电极板压簧是否和上电极板接触好。

(5) 利用喷雾器向油雾室喷油。转动显微镜的调焦手轮, 使显微镜聚焦屏幕上出现清晰的油滴图像。适当调节监视器的亮度、对比度旋钮, 使油滴图像最清晰, 且与背景的反差适中。监视器亮度一般不要调得太亮, 否则油滴不清晰, 如图像不稳定, 可调监视器的帧同步与行同步旋钮。

(6) 将功能键拨到“平衡”挡调节平衡电压调节旋钮, 使板极电压为 250V 左右, 观察监视器是否下落。若无油滴下落, 可再喷一次。若已有油滴下落, 应关上油雾孔形状。

(7) 选择一颗合适的油滴(目视油滴的直径在 0.5~1mm 左右为宜), 仔细反复调节平衡电压, 使油滴静止不动。如发现油滴散焦, 可微动调焦手轮, 使之重新聚焦。跟踪油滴, 记录平衡电压值。

(8) 按清零键, 使计时秒表清零。将功能键拨到“测量”挡, 油滴匀速下降, 同时计时, 下落距离为 2mm, 即刻度板 4 格时, 立即将功能键拨到“平衡”挡或“升降”挡, 同时停止计时。记录油滴的运动距离及时间, 每颗油滴反复测量 3 次。

(9) 按上述步骤再测 9 颗油滴。

(10) 按式 (21-12) 分别计算出各颗油滴的电荷, 求它们的最大公约数, 即为基本电荷 e 值。或用作图法求 e 值。设实验得到 m 个油滴的带电量分别为 $q_1, q_2, \dots, q_n$, 由于电荷的量子化特性, 应有 $q_i = n_i e$, 因此以 n 为横坐标, q 为纵坐标作曲线, 其斜率就是 e 。

(11) 将 e 的实验值与公认值比较, 求相对误差。

*选做项目: 用动态法测量油滴电荷, 求出电子电荷 e 值。

动态法是分别测出加电压油滴匀速上升和不加电压匀速下降(运动路相同)的时间后, 将其代入式 (21-11) 求出油滴的电荷, 再计算电子电荷 e 。

[注意事项]

(1) 不要使 CCD 视频输出短路。

(2) 防止 CCD 受震动或跌落。

(3) 摄像机用 12V 直流电源, 正负极性和电压不能搞错。

(4) 防止摄像机受潮和过热。

(5) 监视器应防止电和机械的冲击、跌落；防止三脚架或摄像机打在屏幕上，勿将水或油洒在监视器上。

[数据记录]

天气:

室温: $t =$ °C

No.	V (V)	t_g (s)	q ($\times 10^{-19}C$)	n	E ($\times 10^{-19}C$)	α ($\times 10^{-7}m$)	m ($\times 10^{-15}kg$)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							

实验常数:

油的密度 $\rho = 981 kg \cdot m^{-3}$

重力加速度 $g = 9.8 m \cdot s^{-2}$

空气粘滞系数 $\eta = 1.83 \times 10^{-5} kg \cdot m^{-1} s^{-1}$

油滴下降距离 $l = 2 \times 10^{-3} m$

修正系数 $b = 6.17 \times 10^{-6}$

平行板距离 $d = 5 \times 10^{-3} m$

[思考题]

(1) 对实验结果造成影响的主要因素有哪些?

(2) 当带电量 q 一定时, 油滴越大, 平衡电压越大还是越小?

(3) 有 CCD 成像系统观测油滴比直接从显微镜观测有何优点?