

普朗克常数（光电效应）实验仪

一、概 述

当光照在物体上时，光的能量仅部分以热的形式被物体吸收，而另一部分则转化为物体中某些电子的能量，使电子逸出物体表面，这种现象称为光电效应。逸出的电子称为光电子，在光电效应中，光显示出它的粒子性质，所以这种现象对认识光的本性，具有极其重要的意义。

1905 年爱因斯坦发展了辐射能量 E 以 $h\nu$ (ν 是光的频率) 为不连续的最小单位的量子化思想，成功地解释了光电效应实验中遇到的问题。1916 年密立根用光电效应法测量了普朗克常数 h ，确定了光量子能量方程式的成立。今天，光电效应已经广泛地应用于现代科学技术的各个领域，利用光电效应制成的光电器件已成为光电自动控制、电报、以及微弱光信号检测等技术中不可缺少的器件。

二、主要技术参数

1、微电流测量仪

微电流测量范围: $10^{-8} \sim 10^{-13} \text{A}$ ，分 6 档，三位半数显，零漂：开机预热 20 分钟后，30 分钟内不大于满度读数的 $\pm 0.2\%$ (10^{-13}A 档)。

2、光电管工作电源

光电管工作电源采用高精度 D/A 转换器,实现电压数字化设定，提供光电管工作电压范围: $-4\text{V} \sim +30\text{V}$;在 $-4.00\text{V} \sim -2.00\text{V}$ 范围内电压显示分辨率为 10mV ；在 $-1.999\text{V} \sim 9.999\text{V}$ 范围内电压分辨率为 1mV ；在 $10.00\text{V} \sim 30.00\text{V}$ 范围内电压显示分辨率为 10mV ；显示的分辨率自动切换。工作电压精度 $\leq 0.5\%$ ；稳定度 $\leq 0.05\%$ 。

3、光电管

光谱响应范围: $340 \sim 700\text{nm}$ ；

最小阴极灵敏度: $\geq 1\mu\text{A} / \text{Lm}$ ；

阳极：镍圈；

暗电流: $I \leq 2 \times 10^{-12} \text{A} (-2\text{V} \leq U_{\text{AK}} \leq 0\text{V})$ 。

4、滤光片

中心波长: 365.0 404.7 435.8 546.1 577.0nm 共五组。

5、汞灯

光谱范围为 320.3nm~872.0nm 共有五组强谱线。

6、嵌入式系统设计，采用 7 英寸液晶屏；

能够手动和自动完成普朗克常数和伏安特性测量实验，并能在显示屏上直接输出 5 条曲线，无需示波器；

菜单式设计，数据和曲线查询方便；

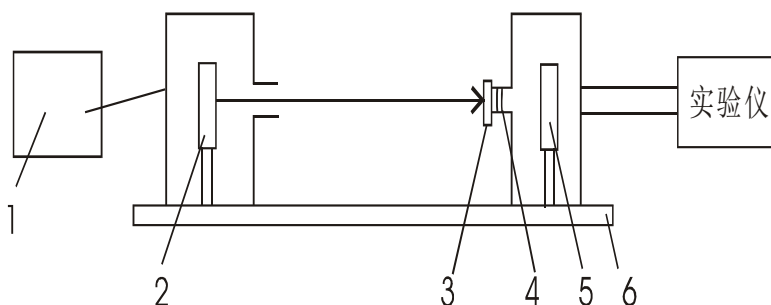
7、测量误差 $\leq 3\%$

8、微机型配置 USB 接口和专用软件。

三、仪器的结构及组成



图 1 普朗克常数实验仪



- 1、汞灯电源（镇流器） 2、高压汞灯 3、滤光片 4、光阑（2mm，4mm，8mm）
5、光电管 6、基准平台

图 2 仪器实验原理结构示意图

四、实验装置说明

1、光源

用高压汞灯做光源，配以专用镇流器为高压汞灯提供稳定电源，光谱范围为 320.3nm~872.0nm，可用谱线为 365.0nm、404.7nm、435.8nm、546.1nm、577.0nm，共五条强谱线。

2、滤光片

滤光片的主要指标是半宽度和透过率。透过某种谱线的滤光片不允许其附近的谱线透过(我们精心设计制作了一组高性能的滤光片，保证了在测量某一谱线时无其他谱线干扰，避免了谱线相互干扰带来的测量误差)。高压汞灯发出的可见光中，强度较大的谱线有 5 条，仪器配以相应的 5 种滤光片。

3、光电管暗盒

采用测 h 专用光电管，由于采用了特殊结构，使光不能直接照射到阳极，由阴极反射照到阳极的光也很少，加上采用新型的阴、阳极材料及制造工艺，使得阳极反向电流大大降低，暗电流也很低($\leq 2 \times 10^{-12} \text{A}$)

4、微电流测量仪

在微电流测量中采用了高精度集成电路构成电流放大器，对测量回路而言，放大器近似于理想电流表，对测量回路无影响，使测量仪具有高灵敏度(电流测量范围 $10^{-8} \sim 10^{-13} \text{A}$)高稳定性(零漂小于满刻度的 0.2%)，从而使测量精度、准确度大大提高。

5、光电管工作电源

普朗克常数实验仪提供了数字设定式光电管工作电源(-4V~+30V)，连续任意可设，显示的分辨率自动切换。工作电压精度 $\leq 0.5\%$ ；稳定度 $\leq 0.05\%$ 。

6、测试仪面板主要功能说明

电流调零：开路时对电流表进行调零，每档量程切换后均需重新调零；

电流量程：微电流测量量程选择；

方式：用于切换实验模式，自动、手动和联机（微机通信联机）；

内容：用于选择普朗克常数实验或伏安特性测量实验；

▲ ▼ ◀ ▶：用于手动测量模式下设置工作电压大小；

状态：自动测量模式下，选择不同的状态（测量-显示测量动态过程；查询-测量完后查看数据；显示-显示测量的曲线）；

波长：自动测量模式下，测量开始前选择对应的滤光片波长或测量结束后显示选择波长的数据或曲线；

光阑：自动测量模式下，测量开始前选择对应的光阑孔径或测量结束后

显示选择光阑的数据或曲线；

开始：自动模式下，用于启动或停止测量。



图 3 手动测量模式



图 4 自动测量模式

五、实验目的

- 1、了解光的量子性，光电效应的规律，加深对光的量子性的理解
- 2、验证爱因斯坦方程，并测定普朗克常数 h
- 3、学习作图法处理数据

六、实验原理

光电效应实验原理如图 3 所示，其中 S 为真空光电管，K 为阴极，A 为阳

极，当无光照射阴极时，由于阳极与阴极是断路的，所以检流计 G 中无电流流过，当用一波长比较短的单色光照射到阴极 K 上时，形成光电流，光电流随加速电位差 U 变化的伏安特性曲线如图 4 所示。

1、光电流与入射光强度的关系

光电流随加速电位差 U 的增加而增加，加速电位差增加到一定量值后，光电流达到饱和值 I_H ，饱和电流与光强成正比，而与入射光的频率无关。当 $U=U_A-U_K$ 变成负值时，光电流迅速减小。实验指出，有一个遏止电位差 U_a 存在，当电位差达到这个值时，光电流为零。

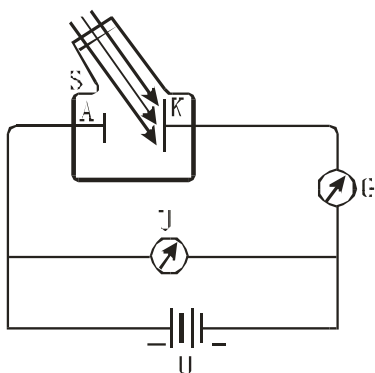


图 3 光电效应实验原理图

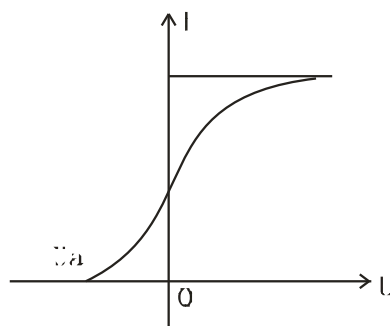


图 4 光电管的伏安特性曲线

2、光电子的初动能与入射光频率之间的关系

光电子从阴极逸出时，具有初动能，在减速电压下，光电子逆着电场力方向由 K 极向 A 极运动，当 $U=U_a$ 时，光电子不再能达到 A 极，光电流为零，所以电子的初动能等于它克服电场力所作的功，即

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_a \quad (1)$$

根据爱因斯坦关于光的本性的假设，光是一粒一粒运动着的粒子流，这些光粒子称为光子，每一光子的能量为 $E=h\nu$ ，其中 h 为普朗克常量， ν 为光波的频率，所以不同频率的光波对应光子的能量不同，光电子吸收了光子的能量 $h\nu$ 之后，一部分消耗于克服电子的逸出功 A ，另一部分转换为电子动能，由能量守恒定律可知

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

式(2)称为爱因斯坦光电效应方程。

由此可见，光电子的初动能与入射光频率 ν 呈线性关系，而与入射光的强度无关。

3、光电效应有光电阈存在

实验指出，当光的频率 $\nu < \nu_0$ 时，不论用多强的光照射到物质上都不会产生光电效应，根据式(2)， $\nu_0 = \frac{A}{h}$ ， ν_0 称为红限。

爱因斯坦光电效应方程同时提供了测普朗克常数的一种方法：由式(1)和(2)可得： $h\nu = e|U_0| + A$ ，当用不同频率 ($\nu_1, \nu_2, \nu_3 \cdots \nu_n$) 的单色光分别做光源时，就有：

$$h\nu_1 = e|U_1| + A$$

$$h\nu_2 = e|U_2| + A$$

.....

$$h\nu_n = e|U_n| + A$$

任意联立其中两个方程就可得到

$$h = \frac{e(U_i - U_j)}{\nu_i - \nu_j} \quad (3)$$

由此若测定了两个不同频率的单色光所对应的遏止电位差即可算出普朗克常数 h ，也可由 ν - U 直线的斜率求出 h 。

因此，用光电效应方法测量普朗克常数的关键在于获得单色光，测量光电管的伏安特性曲线和确定遏止电位差值。

实验中，单色光可由汞灯光源经过滤光片选择谱线产生，汞灯是一种气体放电光源，点燃稳定后，在可见光区域内有几条波长相差较远的强谱线，如表 1 所示，与滤光片联合作用后可产生需要的单色光。

表 1 可见光区汞灯强谱线

波长/nm	频率/ 10^{14}Hz	颜色
579.0	5.179	黄
577.0	5.196	黄

546.1	5.492	绿
435.8	6.882	蓝
404.7	7.410	紫
365.0	8.216	近紫外

为了获得准确的遏止电位差值，本实验用的光电管应该具备下列条件：

- ①对所有可见光谱都比较灵敏。
- ②阳极包围阴极，这样当阳极为负电位时，大部分光电子仍能射到阳极。
- ③阳极没有光电效应，不会产生反向电流。
- ④暗电流很小。

但是实际使用的真空型光电管并不完全满足以上条件，由于存在阳极光电效应所引起的反向电流和暗电流(即无光照射时的电流)，所以测得的电流值，实际上包括上述两种电流和由阴极光电效应所产生的正向电流三个部分，所以伏安曲线并不与 U 轴相切，由于暗电流是由阴极的热电子发射及光电管管壳漏电等原因产生，与阴极正向光电流相比，其值很小，且基本上随电位差 U 呈线性变化，因此可忽略其对遏止电位差的影响。阳极反向光电流虽然在实验中较显著，但它服从一定规律，据此，确定遏止电位差值，可采用以下两种方法：

(1)交点法

光电管阳极用逸出功较大的材料制作，制作过程中尽量防止阴极材料蒸发，实验前对光电管阳极通电，减少其上溅射的阴极材料，实验中避免入射光直接照射到阳极上，这样可使它的反向电流大大减少，其伏安特性曲线与图 5 十分接近，因此曲线与 U 轴交点的电位差值近似等于遏止电位差 U_a ，此即交点法。

(2)拐点法

光电管阳极反向光电流虽然较大，但在结构设计上，若使反向光电流能较快地饱和，则伏安特性曲线在反向电流进入饱和段后有着明显的拐点，如图 5 所示，此拐点的电位差即为遏止电位差。

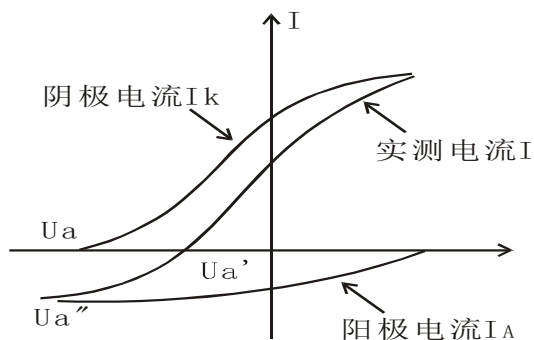


图5 存在反向电流的光电管伏安特性曲线

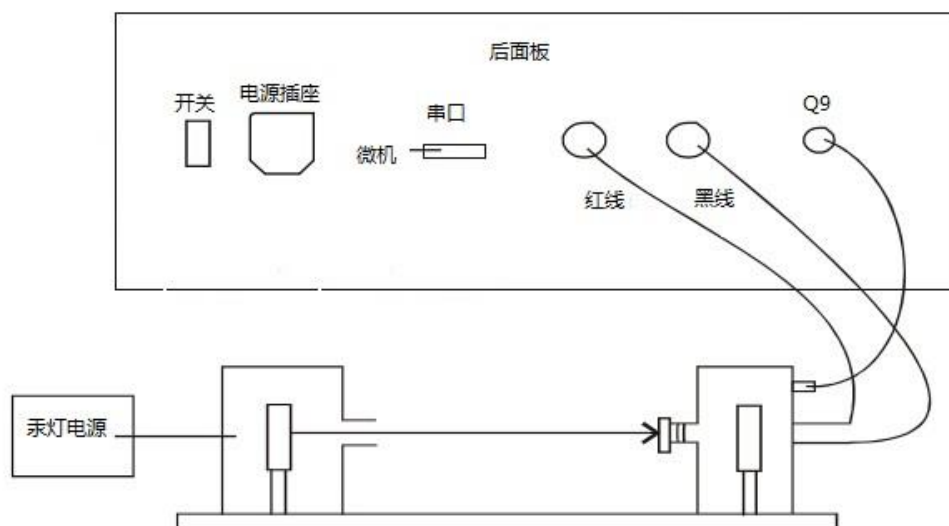


图 6 普朗克实验仪接线示意图

七、实验内容及步骤

(1) 测量前的准备：





把汞灯及光电管的暗箱遮光盖盖上，打开汞灯电源。将汞灯暗箱光输出口对准光电管暗箱光输入口，调整光电管与汞灯距离约为 40cm 并保持不变(出厂已调好)。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—红，黑—黑）。打开实验仪的电源，预热 20~30 分钟。仪器在充分预热后，再进行测量前的校准调零。

电流调零：在电流调零时，必须首先断开光电管暗箱微电流输出端与实验

仪微电流输入端(后面板上)的高频匹配电缆的连接。电流量程有 $10^{-8}\text{A} \sim 10^{-13}\text{A}$ 六个档位, 选择某个档位进行测量时, 就将“电流量程”选择开关置于所选档位, 旋转“电流调零”旋钮使电流指示为“000.0”。如果测量电流超过量程需要换档时, 必须重新进行电流调零。电流正向超量程时, 电流表头会在最高位显示“1.”; 反向超量程时, 电流表头会在最高位显示“-1.”。一般 $10^{-8}\text{A} \sim 10^{-11}\text{A}$ 档可以一起调零, 在用到 10^{-12}A 档或 10^{-13}A 档进行普朗克常数的测定和伏安特性高精度测量时, 需要分别调零; 从 10^{-12}A 档或 10^{-13}A 档切换到 $10^{-8}\text{A} \sim 10^{-11}\text{A}$ 档时也需要再次调零。

电流调零完毕后, 再用高频匹配电缆将光电管暗箱微电流输出端与实验仪微电流输入端(后面板上)连接起来。

(2) 手动测绘光电管的伏安特性曲线:

先通过“方式”功能键选择“手动”模式, “内容”功能键选择“伏安特性”模式。通过     电压设置按键在 $-4\text{V} \sim +30\text{V}$ 之间可任意设定光电管的工作电压。

将“电流量程”选择开关置于 $10^{-8}\text{A} \sim 10^{-11}\text{A}$ 档中某一档(根据光电流的大小而定); 也可以将电流量程档从 10^{-8}A 依次拧到 10^{-11}A 每个开关档位依次测量。在选定电流量程档后, 光阑直径从 2mm 到 8mm 依次选择一个或某一个光阑。在选定光阑直径后, 再将 $365.0\text{nm} \sim 577.0\text{nm}$ 的滤色片依次转到在光电管暗箱光输入口上。建议采用 10^{-10}A 或 10^{-11}A 档, 在整个光电管的伏安特性测量中不会超量程, 不需要换档。

a、将“电流量程”选择开关置于 10^{-10}A 档, 开路调零, 10^{-10}A 档调零好后, 10^{-11}A 档以及 10^{-8}A 档和 10^{-9}A 档基本不用调零, 可以换档进行测量; 光阑直径选择为 4mm ; 滤色片选择为 365.0nm 。

b、按电压设置按键: 从低到高调节电压 ($-4\text{V} \sim +30\text{V}$), 记录电流从零到非零点所对应的电压值作为第一组数据, 再改变电压值(电压值的变化量自定), 将电压值 U_{AK} 与对应得电流值, 记录数据到表 2 中。**只做(光阑直径选择为 4mm)这一组即可。**在坐标轴上, 作出波长及光强的伏安特性曲线。

c、再换上 405.0nm~577.0nm 的滤色片，重复 a、b 测量步骤（选作）。

d、在 U_{AK} 为 30V 时，将“电流量程”选择开关置于 $10^{-10}A$ 档（根据光电流的大小而定）。记录滤色片分别在 365.0nm~577.0nm 五个不同波长时，光阑分别为 2mm、4mm、8mm 时对应的电流值于表 3 中。由于照到光电管上的光强与光阑面积成正比，用表 3 数据验证光电管的饱和光电流与入射光强成正比（画图）。

表 2 $I-U_{AK}$ 关系

波长 365.0nm 光阑 4mm

电压 U_{AK} (V)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
电流 I(A)												

波长 404.7nm 光阑 4mm

电压 U_{AK} (V)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
电流 I(A)												

波长 435.8nm 光阑 4mm

电压 U_{AK} (V)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
电流 I(A)												

波长 546.1nm 光阑 4mm

电压 U_{AK} (V)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
电流 I(A)												

波长 577.0nm 光阑 4mm

电压 U_{AK} (V)	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
电流 I(A)												
电压 U_{AK} (V)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
电流 I(A)												

表3 I_M-P 关系 $U_{AK}= \quad V$

波长	光阑	数组		
	电流	1	2	3
365.0nm	光阑孔 Φ	2mm	4mm	8mm
	$I(\times 10^{-10}A)$			
404.7nm	光阑孔 Φ	2mm	4mm	8mm
	$I(\times 10^{-10}A)$			
435.8nm	光阑孔 Φ	2mm	4mm	8mm
	$I(\times 10^{-10}A)$			
546.1nm	光阑孔 Φ	2mm	4mm	8mm
	$I(\times 10^{-10}A)$			
577.0nm	光阑孔 Φ	2mm	4mm	8mm
	$I(\times 10^{-10}A)$			

(3) 手动测量普朗克常数 h :

理论上,测出各频率的光照射下阴极电流为零时对应的 U_{AK} ,其绝对值即该频率的截止电压,然而实际上由于光电管的阳极反向电流,暗电流,本底电流及极间接触电位差的影响,实测电流并非阴极电流,实测电流为零时对应的 U_{AK} 也并非截止电压。

光电管制作过程中阳极往往被污染,沾上少许阴极材料,入射光照射阳极或入射光从阴极反射到阳极之后都会造成阳极光电子发射, U_{AK} 为负值时,阳极发射的电子向阴极迁移构成了阳极反向电流。

暗电流和本底电流是热激发产生的光电流与杂散光照射光电管产生的光电流,可以在光电管制作或测量过程中采取适当措施以减少或消除它们的影响。

极间接触电位差与入射光频率无关,只影响 U_0 的准确性,不影响 U_0-v 直线斜率,对测定 h 无影响。

此外，由于截止电压是光电流为零时对应的电压，若电流放大器灵敏度不够，或稳定性不好，都会给测量带来较大误差。本实验仪器的电流放大器灵敏度高，稳定性好。

本实验仪器采用了新型结构的光电管。由于其特殊结构使光不能直接照射到阳极，由阴极反射照到阳极的光也很少，加上采用新型的阴，阳极材料及制造工艺，使得阳极反向电流大大降低，暗电流也很少。

由于本仪器的特点，在测量各谱线的截止电压 U_0 时，可不用难于操作的“拐点法”，而用“零电流法”或“补偿法”。

零电流法是直接将各谱线照射下测得的电流为零时对应的电压 U_{AK} 的绝对值作为截止电压 U_0 。此法的前提是阳极反向电流，暗电流和本底电流都很小，用零电流法测得的截止电压与真实值相差很小。且各谱线的截止电压都相差 U ，对 U_0-v 曲线的斜率无大的影响，因此对 h 的测量不会产生大的影响。

补偿法是调节电压 U_{AK} 使电流为零后，保持 U_{AK} 不变，遮挡汞灯光源，此时测得的电流 I_1 为电压接近截止电压时的暗电流和本底电流。重新让汞灯照射光电管，调节电压 U_{AK} 使电流值至 I_1 ，将此时对应的电压 U_{AK} 的绝对值作为截止电压 U_0 。此法可补偿暗电流和本底电流对测量结果的影响。

1) 实验内容与步骤

a、先通过“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；电流调零：将实验仪微电流输入高频电缆连接线断开；调零好后重新接上。

b、将光阑选择置于直径 4mm 的光阑，将 365.0nm 的滤色片转到光电管暗箱光输入口上。

c、从低到高调节电压（-2V~+2V），用“零电流法”或“补偿法”测量该波长对应的 U_0 ，并将数据记于表 4 中。

d、依次旋转到 404.7nm，435.8nm，546.1nm，577.0nm 的滤色片，重复以上测量步骤。

e、将光阑分别置于直径 4mm、8mm 的光阑；重复以上 a~d 测量步骤。

f、将“电流量程”选择开关置于 10^{-13}A 档；重复以上 a~e 测量步骤。

表 4、 $U_0 \sim V$ 关系

光阑孔 $\Phi =$ mm

波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_0 (V)					

2) 实验数据处理

1. 分别画出 365.0nm, 404.7nm, 435.8nm, 546.1nm, 577.0nm 波长光照下光电管的伏安特性曲线。

2. 拟合 $U_s - u$ 直线 (截止电压随入射光频率变化曲线图), 获得直线斜率和截距, 然后求出普朗克常量 h , 逸出功和红限频率 u_0 , 并与 h 的公认值 h_0 比较求出

$$\text{相对误差 } E = \left| \frac{h - h_0}{h_0} \right| \quad h = e * K$$

(式中 $e = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ (库仑), $h_0 = 6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$)。

3. 由于照到光电管上的光强与光阑面积成正比, 可以用光阑面积作为光强的一个指示, 用表 3 数据画出饱和光电流 I_M 与入射光强 P 的曲线关系, 并进行拟合, 给出拟合关系式。

暂时不做实验时, 把汞灯出光口遮盖住, 滤色片旋到堵口处, 并将实验进行复位, 这样有利于保护光电管的寿命; 由于汞灯预热需要较长时间, 所以如果要进行连续实验时, 可以不予关闭。

八、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。

另注：

可用以下三种方法来处理表 4 的实验数据，得出 U_0 — ν 直线的斜率 k 。

a、线性回归法

根据线性回归理论， U_0 — ν 直线的斜率 k 的最佳拟合值为：

$$k = \frac{\overline{\nu \cdot U_0} - \overline{\nu} \cdot \overline{U_0}}{\overline{\nu^2} - \overline{\nu}^2} \quad \text{其中:}$$

$$\overline{\nu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i \quad \text{表示频率 } \nu \text{ 的平均值}$$

$$\overline{\nu^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i^2 \quad \text{表示频率 } \nu \text{ 的平方的平均值}$$

$$\overline{U_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{0i} \quad \text{表示截止电压 } U_0 \text{ 的平均值}$$

$$\overline{\nu \cdot U_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i \cdot U_{0i} \quad \text{表示频率 } \nu \text{ 与截止电压 } U_0 \text{ 的乘积的平均值}$$

b、逐差法

根据 $k_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = \frac{U_{0i} - U_{0j}}{\nu_i - \nu_j}$ ，可用逐差法从表 4 的数据中求出一个或多个

K_i ，将其平均值作为所求 k 的数值。

c、作图法

可用表 4 数据在坐标纸上作 U_0 — ν 直线，由图求出直线斜率 k 。

由以上三种方法求出直线斜率 k 后，可用 $h=ek$ 求出普朗克常数，并与 h 的公认值 h_0 比较求出相对误差： $\delta = \frac{h-h_0}{h_0}$ ，式中 $e = -1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ， $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} \text{J.s}$ 。

附录 1：示例实验（数据仅供参考）

实验一 手动测量普朗克常数 h

1) 实验内容与步骤：

a、先通过“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；电流调零：将实验仪微电流输入高频电缆连接线断开；调零好后重新接上。

b、将光阑选择置于直径 4mm 的光阑。再分别将 365.0nm~577.0nm 的滤色片装在光电管暗箱光输入口上。

c、从低到高调节电压（-2V~+2V），用“零电流法”或“补偿法”测量该波长对应的 U_0 ，并将数据记于表中。

d、依次换上 404.7nm，435.8nm，546.1nm，577.0nm 的滤色片，重复以上测量步骤。

e、将光阑分别置于直径 2mm、8mm 的光阑；重复以上 a~d 测量步骤。

f、将“电流量程”选择开关置于 10^{-13}A 档；重复以上 a~e 测量步骤。

2) 实验数据 1 “电流量程”选择开关置于 10^{-12}A 档时按照以上步骤测得数据：

表 1 U_0 ~V 关系 10^{-12}A 档 光阑孔 $\Phi= 2 \text{ mm}$

波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_0 (V)	-1.798	-1.476	-1.260	-0.644	-0.460

表 2 U_0 ~V 关系 10^{-12}A 档 光阑孔 $\Phi= 4 \text{ mm}$

波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_0 (V)	-1.794	-1.471	-1.260	-0.647	-0.495

表 3 U_0 ~V 关系 10^{-12}A 档 光阑孔 $\Phi= 8 \text{ mm}$

波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_0 (V)	-1.778	-1.460	-1.250	-0.656	-0.512

3) 实验数据 2 “电流量程” 选择开关置于 10^{-13}A 档时, 按照以上步骤测得数据:

表 1 $U_0 \sim V$ 关系	10^{-13}A 档			光阑孔 $\Phi = 2 \text{ mm}$	
波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_0 (V)	-1.800	-1.457	-1.264	-0.660	-0.488

表 2 $U_0 \sim V$ 关系	10^{-13}A 档			光阑孔 $\Phi = 4 \text{ mm}$	
波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_0 (V)	-1.810	-1.465	-1.267	-0.665	-0.514

表 3 $U_0 \sim V$ 关系	10^{-13}A 档			光阑孔 $\Phi = 8 \text{ mm}$	
波长 λ (nm)	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 ν ($\times 10^{14}\text{Hz}$)	8.216	7.410	6.882	5.492	5.196
截止电压 U_0 (V)	-1.814	-1.473	-1.269	-0.678	-0.534

4) 实验数据处理

可用以下三种方法来处理表中的实验数据, 得出 $U_0 - V$ 直线的斜率 k 。

a、线性回归法

根据线性回归理论, $U_0 - \nu$ 直线的斜率 k 的最佳拟合值为:

$$k = \frac{\overline{\nu \cdot U_0} - \overline{\nu} \cdot \overline{U_0}}{\overline{\nu^2} - \overline{\nu}^2} \quad \text{其中:}$$

$$\overline{\nu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i \quad \text{表示频率 } \nu \text{ 的平均值}$$

$$\overline{\nu^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i^2 \quad \text{表示频率 } \nu \text{ 的平方的平均值}$$

$$\overline{U_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{0i} \quad \text{表示截止电压 } U_0 \text{ 的平均值}$$

$$\overline{\nu \cdot U_0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i \cdot U_{0i} \quad \text{表示频率 } \nu \text{ 与截止电压 } U_0 \text{ 的乘积的平均值}$$

b、逐差法

根据 $k_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = \frac{U_{0i} - U_{0j}}{\nu_i - \nu_j}$ ，可用逐差法从数据中求出一个或多个 K_i ，将

其平均值作为所求 k 。

c、作图法

可用表 4 数据在坐标纸上作 U_0 — ν 直线，由图求出直线斜率 k 。

由以上三种方法求出直线斜率 k 后，可用 $h=ek$ 求出普朗克常数，并与 h 的公认值 h_0 比较求出相对误差： $\delta = \frac{h-h_0}{h_0}$ ，式中 $e = -1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ， $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} \text{J.s}$ 。

5) 下面以实验数据 1 为例，计算普朗克常数及其误差。

将实验数据 1 中的数据按照 a、b 和 c 的计算方法计算普朗克常数及其误差。

(1) 光阑孔 $\Phi = 4 \text{ mm}$ ，电流 10^{-12}A 档：

a、线性回归法

根据线性回归理论， U_0 — ν 直线的斜率 k 的最佳拟合值为：

$$\overline{\nu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i = (\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \nu_4 + \nu_5) \div 5$$

$$= (8.216 + 7.410 + 6.882 + 5.492 + 5.196) \times 10^{14} \text{ Hz} \div 5$$

$$= 6.6392 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\overline{\nu^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i^2 = (\nu_1^2 + \nu_2^2 + \nu_3^2 + \nu_4^2 + \nu_5^2) \div 5$$

$$= (8.216^2 + 7.410^2 + 6.882^2 + 5.492^2 + 5.196^2) \times 10^{28} \text{ Hz}^2 \div 5$$

$$= 45.386632 \times 10^{28} \text{ Hz}^2$$

$$\begin{aligned}\overline{U_0} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{0i} = (U_{01} + U_{02} + U_{03} + U_{04} + U_{05}) \div 5 \\ &= (-1.794 - 1.471 - 1.260 - 0.647 - 0.495) \text{ V} \div 5 \\ &= -1.1334 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{\nu \cdot U_0} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \nu_i \cdot U_{0i} = (\nu_1 \cdot U_{01} + \nu_2 \cdot U_{02} + \nu_3 \cdot U_{03} + \nu_4 \cdot U_{04} + \nu_5 \cdot U_{05}) \div 5 \\ &= (-1.794 \times 8.216 - 1.471 \times 7.410 - 1.260 \times 6.882 - 0.647 \times 5.492 - 0.495 \times 5.196) \times 10^{14} \div 5 \\ &= -8.087 \times 10^{14} \text{ V} \cdot \text{Hz}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}k &= \frac{\overline{\nu \cdot U_0} - \overline{\nu} \cdot \overline{U_0}}{\overline{\nu^2} - \overline{\nu}^2} = \frac{6.6392 \times 10^{14} \times (-1.1334) - (-8.087) \times 10^{14}}{(6.6392 \times 10^{14})^2 - 45.386632 \times 10^{28}} \\ &= -0.430072 \times 10^{14} \text{ V/Hz}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h = ek &= (-1.602 \times 10^{-19}) \text{ C} \times (-0.430072 \times 10^{14}) \text{ V/Hz} \\ &= 6.8897 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}\end{aligned}$$

$$\partial = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{(6.8897 - 6.6226) \times 10^{-34}}{6.6226 \times 10^{-34}} = 3.98\%$$

去掉波长为 577nm 的数据点后，再按照上面公式计算的普朗克常数误差为 2.02%。

b、逐差法

根据 $k_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = \frac{U_{0i} - U_{0j}}{\nu_i - \nu_j}$ ，可用逐差法从表 4 的数据中求出一个或多个

K_i，将其平均值作为所求 k。

下面的数据采用两两相邻逐差：

$$k_1 = \frac{U_{02} - U_{01}}{v_2 - v_1} = \frac{-1.471 + 1.794}{(7.410 - 8.216) \times 10^{14}} \frac{V}{Hz} = -0.40074 \times 10^{14} V / Hz$$

$$k_2 = \frac{U_{03} - U_{02}}{v_3 - v_2} = \frac{-1.260 + 1.471}{(6.882 - 7.410) \times 10^{14}} \frac{V}{Hz} = -0.39962 \times 10^{14} V / Hz$$

$$k_3 = \frac{U_{04} - U_{03}}{v_4 - v_3} = \frac{-0.647 + 1.260}{(5.492 - 6.882) \times 10^{14}} \frac{V}{Hz} = -0.44101 \times 10^{14} V / Hz$$

$$k_4 = \frac{U_{05} - U_{04}}{v_5 - v_4} = \frac{-0.495 + 0.647}{(5.196 - 5.492) \times 10^{14}} \frac{V}{Hz} = -0.51351 \times 10^{14} V / Hz$$

$$K = (k_1 + k_2 + k_3 + k_4) / 4 = 0.4387 \times 10^{14} V / Hz$$

$$h = ek = (-1.602 \times 10^{-19}) C \times (-0.4387 \times 10^{14}) V / Hz$$

$$= 7.028 \times 10^{-34} J \cdot s$$

$$\partial = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{(7.028 - 6.6226) \times 10^{-34}}{6.6226 \times 10^{-34}} = 6.07\%$$

经过分析，发现 K_4 误差较大，去掉此点后，求得：

$$K = (k_1 + k_2 + k_3) / 3 = 0.4138 \times 10^{14} V / Hz$$

$$h = ek = (-1.602 \times 10^{-19}) C \times (-0.4138 \times 10^{14}) V / Hz$$

$$= 6.6289 \times 10^{-34} J \cdot s$$

$$\partial = \frac{h - h_0}{h_0} = \frac{(6.6289 - 6.6226) \times 10^{-34}}{6.6226 \times 10^{-34}} = 0.04\%$$

有兴趣的学生，可以用其它逐差法，如用 $k_i = \frac{U_{0(i+j)} - U_{0i}}{v_{i+j} - v_i}$ （其中 $j=0,1,2,3,4$ ）

来分别求 k ，从而求出普朗克常数及其误差，上面的数据为 $j=0$ 时的处理数据。

c、作图法

可用表中数据在坐标纸上作 $U_0 - v$ 直线，由图求出直线斜率 k ，在此略。

