

实验讲义 光电效应测普朗克常量

实验要求:

1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。
- (2) 本学期预习考核方式为在线测验（预习测试题），不再要求写预习报告。在线测验只能完成一次，如多次作答，后面提交的作答无效，请大家完成实验讲义的预习后，再作答。

2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯放在光学平台上，不得在实验室内吃东西。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在听完老师讲解后才能动手操作。在动手操作前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。

3. 注意！注意！注意！ （重要的事情说三遍）

由于本实验要求学生当堂提交实验测量结果，不写正式实验报告。

上课前学生务必准备以下学习用品：

- i. 坐标纸二张（画图）
- ii. 能计算“最小二乘法”的计算工具
（如：计算器、手机、电脑）

4. 实验完毕，完成出门测试卷（出门测）。

光电效应测普朗克常量

光电效应是指一定频率的光照射在金属表面时，有电子从金属表面逸出的现象。1887 年赫兹在用两套电极做电磁波的发射与接收的实验中，发现当紫外光照射到接收电极的负极时，接收电极间更易于产生放电。赫兹的发现吸引许多人去做这方面的研究工作。斯托列托夫发现负电极在光的照射下会放出带负电的粒子，形成光电流，光电流的大小与入射光强度成正比，光电流实际是在照射开始时立即产生，无需时间上的积累。1899 年，汤姆逊测定了光电流的荷质比，证明光电流是电子流。勒纳德从 1889 年就从事光电效应的研究工作，1900 年他用“在阴阳极间加反向电压”的方法研究电子逸出金属表面的最大速度，发现光源和阴极材料都对截止电压有影响，但光的强度对截止电压无影响，电子逸出金属表面的最大速度与光强无关。勒纳德因在这方面的工作获得 1905 年的诺贝尔物理奖。

1900 年，普朗克在研究黑体辐射问题时，先提出了一个符合实验结果的经验公式，为了从理论上推导出这一公式，他采用了玻尔兹曼的统计方法，假定黑体内的能量是由不连续的能量子构成，能量子的能量为 $h\nu$ 。能量子的假说是一个革命性的突破，具有划时代的意义。爱因斯坦以他惊人的洞察力，最先认识到量子假说的伟大意义并予以发展。1905 年爱因斯坦由光子假设得出了著名的光电效应方程，解释了光电效应的实验结果。密立根从 1904 年开始光电效应实验，历经十年，用实验证实了爱因斯坦的光量子理论。他们俩分别于 1921 和 1923 年获得诺贝尔物理学奖。

光子理论创立后，在固体比热、辐射理论、原子光谱等方面都获得成功，人们逐步认识到光具有波动和粒子二象属性。光子的能量 $E=h\nu$ 与频率有关，当光传播时，显示出光的波动性，产生干涉、衍射、偏振等现象；当光和物体发生作用时，它的粒子性又突出了出来。后来科学家发现波粒二象性是一切微观物体的固有属性，并发展了量子力学来描述和解释微观物体的运动规律，使人们对客观世界的认识前进了一大步。

作为第一个在历史上实验测得普朗克常数的物理实验，光电效应的意义是不言而喻的。

实验目的

1. 了解光电效应的基本规律，加深对光的量子性的理解。
2. 用光电效应法测量普朗克常数 h 。
3. 测量光电管的光电特性。包括：光电管的伏安特性曲线，饱和光电流与光强的关系。

实验原理

光电效应的实验原理如图 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。

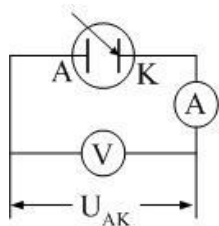


图 1
实验原理图

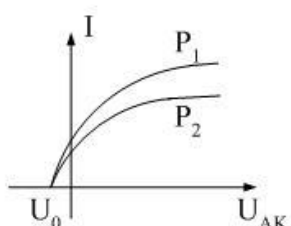


图 2
同一频率, 不同光强照射时
光电管的伏安特性曲线

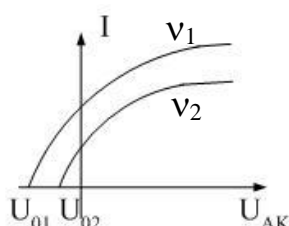


图 3
不同频率单色光照射时
光电管的伏安特性曲线

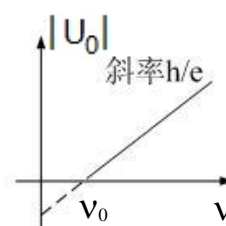


图 4
截止电压 U_0 与入射光频率 ν 的关系图

光电效应的基本实验原理如下：

(1) 对于某一频率单色光，光电效应的 $I \sim U_{AK}$ 关系如图 2 所示。从图中可见，对一定的频率，有一电压 U_0 ，当 $U_{AK} \leq U_0$ 时，电流为零，也就是这个负电压产生的电势能完全抵消了由于吸收光子而从金属表面逸出的电子的动能。这个相对于阴极为负值的阳极电压 U_0 ，被称为**截止电压**。

(2) 当 $U_{AK} \geq U_0$ 后，电势能不足以抵消逸出电子的动能，从而组件产生光电流 I 。随着 U_{AK} 增大， 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，由于它们的光子能量不同，赋予逸出电子的动能不同。显然，频率越高的光子，其产生逸出电子的能量也越高，所以截止电压的数值也越高，如图 3 所示。

(4) 作截止电压 $-U_0$ 与频率 ν 的关系图如图 4 所示。 $-U_0$ 与 ν 成线性关系。显然，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。

需说明一下，实际测量中，反向电流并不为零。图 2、图 3 中从零开始，是因为反向电流极小，仅为 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 数量级，所以坐标上反映不出来。

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，一次性地被金属中的电子全部吸收，而无需时间积累能量。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：

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

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， v_0 为最大速度， m 为光电子的质量， ν 为光的频率， h 为普朗克常数。

由 (1) 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：

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

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 $\nu_0 = A/h$ 。

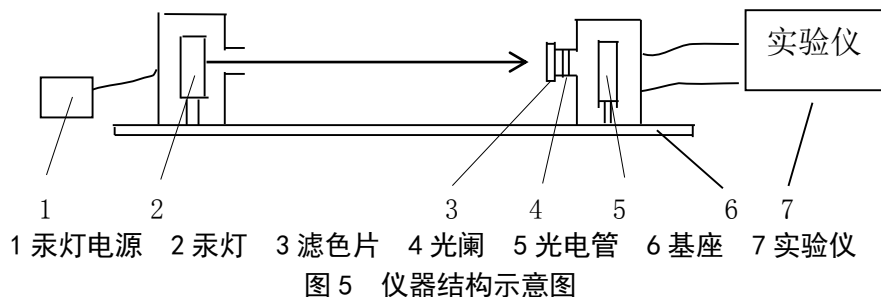
将 (2) 式代入 (1) 式可得：

$$eU_0 = h\nu - A \quad (3)$$

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。

实验仪器介绍



ZKY-GD-4 智能光电效应（普朗克常数）实验仪。仪器由汞灯及电源、滤色片、光阑、光电管、智能实验仪构成，仪器结构如图 5 所示，实验仪的调节面板如图 6 所示。实验仪有手动和自动两种工作模式，具有数据自动采集，存储，实时显示采集数据，动态显示采集曲线（需连接普通示波器，可同时显示 5 个存储区中存储的曲线，额外采购），及采集完成后查询数据的功能。



图 6 实验仪面板图

实验内容及步骤

1、测试前的准备

- 实验建议环境温度 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $<90\%$ 。测试前测试仪和汞灯都需要接电，预热 20 分钟。
- 将汞灯暗盒光输出口对准光电管暗盒光输入口，调整光电管与汞灯距离为约 40cm 并保持不变。
- 用专用连接线将光电管暗盒电压输入端与测试仪电压输出端（后面板上）连接起来（红—红，蓝—蓝）。
- 调零：**将“电流量程”选择开关置于所选档位，仪器在充分预热后，进行测试前调零。实验仪在开机或改变电流量程后，都会自动进入调零状态。旋转“调零”旋钮使电流指示为“+”、“-”、零转换点处。调节好后，用高频匹配电缆将光电管暗盒电流输出端和实验仪的微电流输入端连接起来，按“调零确认/系统清零”键，系统进入测试状态。

若要动态显示采集曲线，需将实验仪的“信号输出”端口接至示波器的“Y”输入端，“同步输出”端口接至示波器的“外触发”输入端。示波器“触发源”开关拨至“外”，“Y 衰减”旋钮拨至约“1V/格”，“扫描时间”旋钮拨至约“20 μs /格”。此时示波器将用轮流扫描的方式显示 5 个存储区中存储的曲线，横轴代表电压 U_{AK} ，纵轴代表电流 I 。

2、测普朗克常数 h

问题讨论

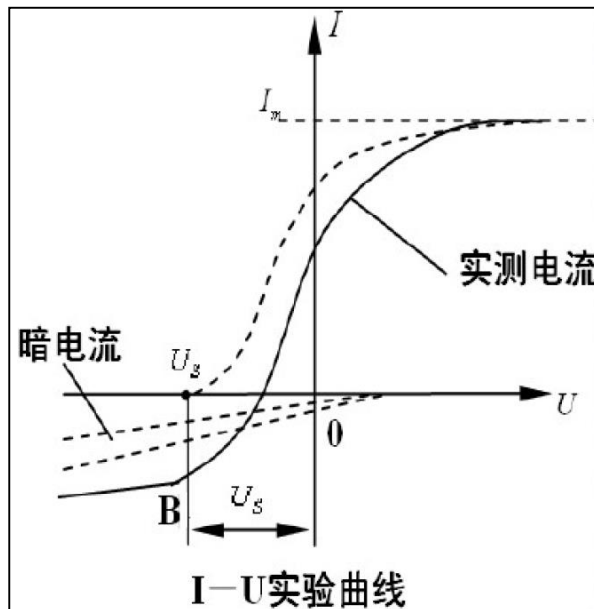
理论上，测出各频率光照射下阴极电流为零时对应的 U_{AK} ，其绝对值即该频率的截止电压，然而实际上由于光电管的阳极反向电流、暗电流、本底电流及极间接触电位差的影响，实测电流并非纯粹的阴极电流，实测电流为零时对应的 U_{AK} 也并非截止电压。

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。（如右图所示）

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小或消除他们的影响。

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 $U_0 \sim \nu$ 直线斜率，对测定 h 无影响。

由于本实验仪器的电流放大器灵敏度高，稳定性好；光电管阳极反向电流，暗电流水平也较低。在测量各谱线的截止电压 U_0 时，可采用零电流法，即直接将各谱线（单色光）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较小。且各谱线的截止电压（与各自的真实值之间）都相差 ΔU 对 $U_0 \sim \nu$ 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。



测量

测量截止电压时，“伏安特性测试/截止电压测试”状态键（右上角）应为截止电压测试状态。“电流量程”开关应处于 $10^{-13}A$ 档。

a) 手动测量

使“手动/自动”模式键处于手动模式。

将直径 4mm 的光阑及 577.0nm 的滤色片装在光电管暗盒光输入口上，打开汞灯遮光盖。

此时电压表显示 U_{AK} 的值，单位为伏；电流表显示与 U_{AK} 对应的电流值 I ，单位为所选择的“电流量程”。用电压调节键 \rightarrow 、 \leftarrow 、 \uparrow 、 \downarrow 可调节 U_{AK} 的值， \rightarrow 、 \leftarrow 键用于选择调节位， \uparrow 、 \downarrow 键用于调节值的大小。

从低到高调节电压（绝对值减小），观察电流值的变化，寻找电流为零时（电流指示为“+”、“-”零转换点处）对应的 U_{AK} ，以其绝对值作为该波长对应的 U_0 的值，并将数据记于表 1 中。为尽快找到 U_0 的值，调节时应从高位到低位，先确定高位的值，再顺次往低位调节。

依次换上 546.1 nm，435.8 nm，404.7nm，365.0 nm 的滤色片，重复以上测量步骤。

b) 自动测量

按“手动/自动”模式键切换到自动模式。

此时电流表左边的指示灯闪烁，表示系统处于自动测量扫描范围设置状态，用电压调节键可设置扫描起始和终止电压。

对各条谱线，我们建议扫描范围大致设置为：365nm、-1.90 ~ -1.50V；405nm、-1.60 ~ -1.20V；436nm、-1.35 ~ -0.95V；546nm、-0.80 ~ -0.40V；577nm、-0.65 ~ -0.25V。

实验仪设有 5 个数据存储区，每个存储区可存储 500 组数据，并有指示灯表示其状态。灯亮表示该存储区已存有数据，灯不亮为空存储区，灯闪烁表示系统预选的或正在存储数据的存储区。

设置好扫描起始和终止电压后,按动相应的存储区按键,仪器将先清除存储区原有数据,等待约30秒,然后按4mV的步长自动扫描,并显示、存储相应的电压、电流值。

扫描完成后,仪器自动进入数据查询状态,此时查询指示灯亮,显示区显示扫描起始电压和相应的电流值。用电压调节键改变电压值,就可查阅到在测试过程中,扫描电压为当前显示值时相应的电流值。读取电流为零时(电流指示为“+”、“-”零转换点处)对应的 U_{AK} ,以其绝对值作为该波长对应的 U_0 的值,并将数据记于表1中。

按“查询”键,查询指示灯灭,系统回复到扫描范围设置状态,可进行下一次测量。

在自动测量过程中或测量完成后,按“手动/自动”键,系统回复到手动测量模式,模式转换前工作的存储区内的数据将被清除。

若仪器与示波器连接,则可观察到 U_{AK} 为负值时各谱线在选定的扫描范围内的伏安特性曲线。

表 1 $U_0 - \nu$ 关系

距离 $L =$ mm 光阑孔径 $\Phi =$ mm

波长 $\lambda_i(\text{nm})$		365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 $\nu_i(\times 10^{14}\text{Hz})$		8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
截止电压 $U_{0i}(\text{V})$	手动					
	自动					

数据处理

由表1的实验数据,画图、描点。然后作线性拟合回归直线。

① 得出 $U_0 - \nu$ 直线的斜率 k ,即可用 $h = ek$ 求出普朗克常数,并与 h 的公认值 h_0 比较,求出相对误差 $E = \frac{|h-h_0|}{h_0}$,式中 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$, $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。

② 得出与 y 轴截距,计算逸出功

③ 得出与 x 轴焦点坐标,计算红限。

3、测光电管的伏安特性曲线(提高内容选做)、以及饱和光电流与光强的关系(必做)

“伏安特性测试/截止电压测试”状态键(右上角)应为伏安特性测试状态,“电流量程”开关应拨至 10^{-10}A 档,并重新调零。

注意,换量程后,暗电流就要重新调零。即:断开仪器背面同轴电缆信号线。

将直径4mm的光阑及所选谱线的滤色片装在光电管暗盒光输入口上。

测伏安特性曲线可选用“手动/自动”两种模式之一,测量的最大范围为-1~50V,自动测量时步长为1V,仪器功能及使用方法如前所述。

a) 可观察5种不同单色光,在同一光阑、同一距离照射下,光电管的不同伏安特性曲线。

b) 可观察某种单色光,在不同距离(即不同光强)、同一光阑下,光电管的不同饱和光电流。

c) 可观察某种单色光,在不同光阑(即不同光通量)、同一距离下,光电管的不同饱和光电流。

由a)可在坐标纸上绘制5条伏安特性曲线

由b)和c)可验证光电管饱和光电流与入射光强的关系,是否成正比。

数据记录 and 数据处理

1) 记录所测 U_{AK} 及 I 的数据到表2中,在坐标纸上作对应于以上波长及光强的伏安特性曲线。

2) 在 U_{AK} 为20V时,将仪器设置为手动模式,测量并记录对同一谱线、同一入射距离,光阑分别为2mm、4mm、8mm时对应的电流值于表3中,验证光电管的饱和光电流与入射光强成正比。

3) 也可在 U_{AK} 为20V时,将仪器设置为手动模式,测量并记录对同一谱线、同一光阑时,光电管与入射光在不同距离,如300mm、400mm等对应的电流值于表4中,同样验证光电管的饱和电流与入射光强成正比。

表 2 $I-U_{AK}$ 关系 $L =$ mm $\Phi =$ mm

577.0nm 光阑 4mm	U_{AK} (V)										
	I ($\times 10^{-11}A$)										
546.1nm 光阑 4mm	U_{AK}										
	I										
435.8nm 光阑 4mm	U_{AK}											
	I											
404.7nm 光阑 4mm	U_{AK}											
	I											
365.0nm 光阑 4mm	U_{AK}											
	I											

表 3 $I_{\text{光}}-P$ 关系 $U_{AK} =$ V $L =$ mm

435.8nm	光阑孔 $\Phi =$ mm				
	I ($\times 10^{-10}A$)				
546.1nm	光阑孔 $\Phi =$ mm				
	I ($\times 10^{-10}A$)				

表 4 $I_{\text{光}}-P$ 关系 $U_{AK} =$ V $\Phi =$ mm

435.8nm	入射距离 L/cm						
	I ($\times 10^{-10}A$)						
546.1nm	入射距离 L/cm						
	I ($\times 10^{-10}A$)						

注意事项

在仪器的使用过程中，汞灯不宜直接照射光电管，也不宜长时间连续照射加有光阑和滤光片的光电管，如此将减少光电管的使用寿命。实验完成后，请将光电管用光电管暗盒盖将遮住光电管暗盒入射光口存放。检查滤光片的数目并放置于盒中。

实验报告（简易版本）

实验题目 光电效应测普朗克常数

学号：_____

实验目的 测量普朗克常数 h

姓名：_____

实验原理

单色光照射在光电管的阴极上有电子发射出来的现象叫光电效应，出射的电子称之为光电子，形成的电流称之为光电流。光电流很弱。加载在光电管中阳极与阴极之间电压为正值时，随着电压的增大光电流迅速增大，电压增大到一定值后，光电流趋于饱和。加载在阳极与阴极之间电压为负值时，随着电压数值逐渐变大，光电流变弱，负电压数值增大到 U_0 值时，光电流变为零。把电压 U_0 称之为遏止电压。本实验要求测量 5 种不同单色光分别照射下，光电流的遏止电压值。本实验还需测量和验证饱和光电流与光强之间的关系，是否满足线性正比关系。

（实验提高内容）有能力的同学，要求测量 5 种不同单色光分别照射下，光电管完整的伏安特性曲线，以及基于此曲线分析和测量出光电流的遏止电压（拐点法）。

实验仪器介绍

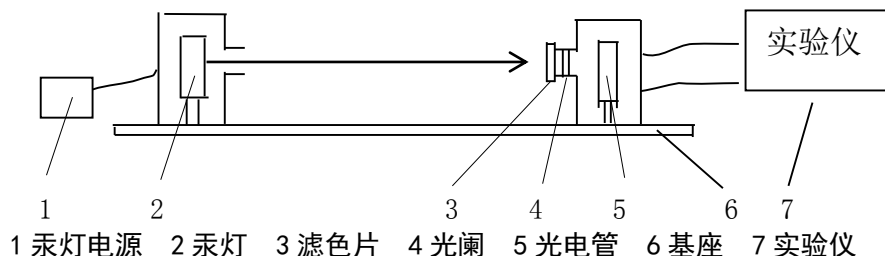


图 1 仪器结构示意图

ZKY-GD-4 智能光电效应（普朗克常数）实验仪。

基本必做实验内容

- ① 零电流法、补偿法分别测遏止电压；
- ② 饱和光电流与光强之间的变化关系。

1. 固定一种直径大小光阑的情况下，分别测量 5 种不同单色光照射下，光电流的遏止电压。

- a) 测量数据记录列表（1）
- b) 用最小二乘法计算普朗克常数 h 大小，以及与公认值 h_0 之间的相对误差。
- c) 计算此光电管阴极材料，产生光电效应的单色照射光的波长红限，以及光电子从材料表面逸出的功大小。

表 1 不同单色光照射下的光电流的遏止电压（光阑孔 $\Phi =$ mm）

波长 $\lambda_i(\text{nm})$	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 $\nu_i(\times 10^{14}\text{Hz})$	8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
零电流法测	手动				
	自动				
遏止电压 $U_{0i}(\text{V})$					
补偿法测	手动				
遏止电压 $U_{0i}(\text{V})$					

主机箱编号：_____ 光电管外壳编号：_____

数据处理和分析

对上述表 1 中的单色光频率与遏止电压（正值）之间，在直角坐标纸上进行画图、描点，再进行（最小二乘）线性回归拟合分析，做出拟合直线。写出拟合直线方程。【参见附图 1】

根据上述拟合直线方程，计算

- ① 普朗克常数值
- ② 与公认值比较计算相对误差
- ③ 计算单色入射光红限
- ④ 计算电子的逸出功

2. 测量饱和光电流与光强的关系

- 其一种情况是，选择一种单色光，固定光电管阴阳极电压（在饱和区），改变不同的光阑（直径）大小，来改变光强
- 另一种情况是，选择一种单色光，固定光电管阴阳极电压（在饱和区），改变光电管与汞灯光源的距离，来改变光强
- 二种测量内容，分别列表，画图。验证饱和光电流与光强，成正比关系。

表 2 $I_{\text{sat}}-P$ 关系 $U_{\text{AK}} = \quad \text{V}$ $L = \quad \text{mm}$

435.8nm	光阑孔 Φ					
	$I (\times 10^{-10} \text{A})$					
546.1nm	光阑孔 Φ					
	$I (\times 10^{-10} \text{A})$					

表 3 $I_{\text{sat}}-P$ 关系 $U_{\text{AK}} = \quad \text{V}$ $\Phi = \quad \text{mm}$

435.8nm	入射距离 L						
	$I (\times 10^{-10} \text{A})$						
546.1nm	入射距离 L						
	$I (\times 10^{-10} \text{A})$						

对上述二个表中的饱和光电流的测量数据，进行如下处理和分析。

提高性实验内容

测量完整的伏安特性曲线，以及使用“拐点法”测量光电流的遏止电压。计算普朗克常数 h 。

1. 分二段，测量光电管的伏安特性曲线（注意：电流表使用二个不同的档， 10^{-13}A 和 10^{-10}A ）
 - a) 第 1 段， $-2\text{V} \sim 0\text{V}$ 段。5 种不同单色光照射下光电管的伏安曲线
 - b) 第 2 段， $-1\text{V} \sim 50\text{V}$ 段。5 种不同单色光照射下光电管的伏安曲线
2. 记录数据
3. 数据处理
 - a) 画一张完整的伏安特性曲线图（五种单色光画在同一张图上）；
 - b) 画局部光电流放大图，利用“拐点法”分析遏止电压值。
4. 利用上述“拐点法”测算出的 5 种不同单色光的光电流的遏止电压，计算普朗克常数 h 。

数据量较大，可以不当堂上交实验报告。到下周同一个实验时间段（老师在位时）来交纳。