

# 光电效应测定普朗克常量

光电效应是指一定频率的光照射在金属表面时会有电子从金属表面逸出的现象。光电效应实验对于认识光的本质及早期量子理论的发展，具有里程碑式的意义。利用光电效应可以制成各种光电转换器件，光电管就是应用光电效应的原理制成的光电元件。随着科学技术的发展，人们发现某种类型的半导体材料能把光能直接转变为电能的本领，当光入射在这样的材料上时，就会产生电流，入射的光越强，产生的电流也越大。光电二极管、光电三极管就是利用这种材料制成的。

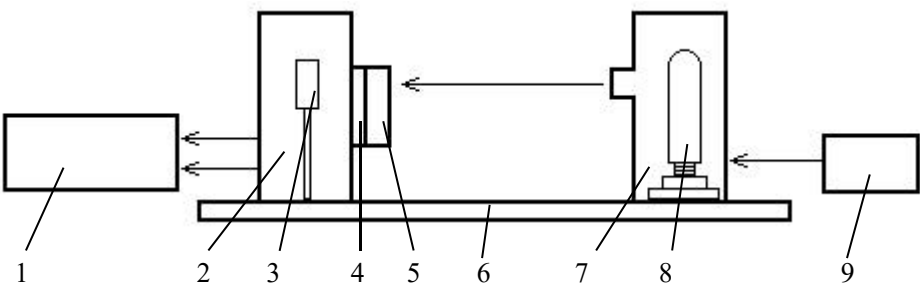
普朗克常量是自然界最为重要的普适量之一，利用光电效应可以简单而又准确地测定。作为第一个在历史上通过实验方法测得普朗克常数的物理实验，光电效应的意义是不言而喻的。

## 一、实验目的

- 1. 了解光电效应的规律，加深对光的量子性的理解。
- 2. 掌握爱因斯坦光电效应方程的基本实验方法，测定普朗克常量。

## 二、实验仪器

ZKY-GD-4 智能光电效应（普朗克常数）实验仪，包含电源、汞灯、滤色片、光阑、光电管、微电流测量仪等部件组成，仪器结构如图 7-7-1 所示。



1. 微电流测试仪； 2. 光电管暗盒； 3. 光电管； 4. 光阑选择圈；  
5. 滤色片选择圈； 6. 基座； 7. 汞灯暗盒； 8. 汞灯； 9. 汞灯电源

图 7-7-1 仪器结构示意图

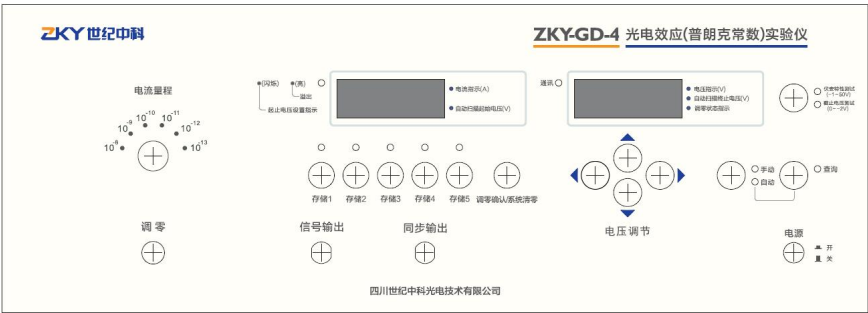


图 7-7-2 实验仪面板图

### 三、实验原理

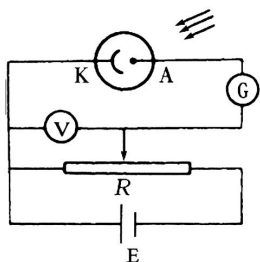


图 7-7-3 光电效应实验原理图

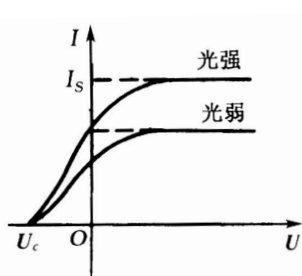


图 7-7-4 光电管的伏安特性曲线

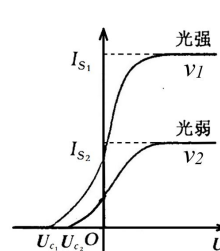


图 7-7-5 不同频率光伏安特性曲线

在一定频率的光照射下，电子从金属或金属化合物表面逸出的现象称为光电效应，逸出的电子称为光电子。图 7-7-3 是研究光电效应实验规律的原理图，图中 A-K 为抽成真空的光电管，A 为阳极，K 为阴极。在光照下电子从阴极 K 表面逸出，部分光电子会到达阳极 A 形成光电流。1902 年勒纳德宣布的光电效应的基本实验规律有：

(1) 光电流  $I$  与光电管两端电压  $U$  的关系曲线（称为光电管的**伏安特性曲线**），如图 7-7-4 所示。其中，当光的强度一定时，光电流  $I$  随着电压  $U$  增大而趋于饱和值  $I_s$ ；当光的频率一定时，光电流饱和值  $I_s$  与光的强度成正比。

(2) 对于不同频率的光  $\nu_1$  和  $\nu_2$ ，由于它们的光子能量不同，因此光照射同一种金属时赋予逸出电子的动能也不同。显然，频率越高的光子，其产生逸出电子的能量也越高，所以截止电压的值也越高，如图 7-7-5 所示。

(3) 光电效应存在一个频率阈值  $\nu_c$ （也称**截止频率**或**红限频率**），即入射光的频率低于阈值  $\nu_c$  时，不论光强如何均没有光电子产生，而  $\nu_c$  仅与阴极 K 的材料有关。

(4) 当光电管两端加上反向电压时，光电流迅速减小，但直到反向电压达到某个值  $U_c$  时光电流才为零， $U_c$  称为**遏止电压**。这说明光电子有一个最大初动能，显然

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eU_c \quad (7-7-1)$$

实验表明，光电子的最大初动能与光强无关，而与入射光的频率有关。

(5) 光电效应是一种瞬时效应，一经光照射光电子立即产生，而且与光的强弱无关。即使入射光的强度非常微弱，只要频率大于  $\nu_0$ ，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。

**说明：**实验中，反向电流并不为零。图 7-7-4、图 7-7-5 中从零开始，是因为反向电流极小，仅为  $10^{-13} \sim 10^{-14}$  数量级，所以在坐标上反映不出来。

因此贡献，勒纳德荣获 1905 年度的诺贝尔物理学奖。但以上这些实验规律，用光的电磁波理论无法做出圆满解释。1905 年，爱因斯坦受普朗克量子假设的启发，提出了光量子理论并成功地解释了光电效应的实验规律：一束频率为  $\nu$  的光是一束以光速  $c$  运动的具有能量  $\varepsilon = h\nu$  的粒子流，这些粒子称为光量子，简称为光子，它不能再被分割，而只能整个地被吸收或产生出来。在光电效应中，

当光照射到金属表面时，一个光子的能量可以立即被金属中的自由电子吸收。但是只有当入射光的频率足够高时，吸收了光子的电子才有可能克服金属的电子逸出功  $A$  而逸出金属表面成为光电子。由能量守恒定律可得，光电子的最大初动能为

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - A \quad (7-7-2)$$

此式称为爱因斯坦光电效应方程。

当光电子的最大初动能为零时，由 (7-7-2) 式可得光的截止频率为  $\nu_c = A/h$ ，再由式 (7-7-1) 和式 (7-7-2) 可得

$$U_c = \frac{h}{e}(\nu - \nu_c) \quad (7-7-3)$$

上式表明遏止电压差  $U_c$  和照射光的频率  $\nu$  成直线关系，由直线斜率可求出  $h$ ，由截距可求出  $\nu_c$ 。

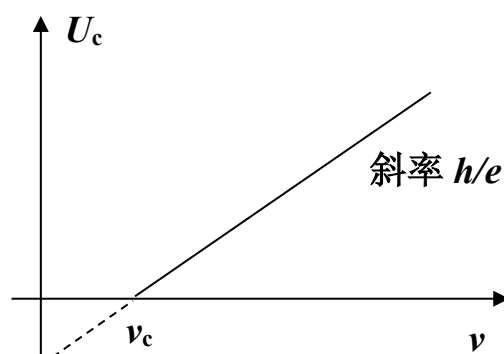


图 7-7-6 截止电压与入射光频率关系图

然而由于许多干扰因素难以排除，故欲精确测量不同频率下纯粹由阴极光电效应产生的光电管的伏安特性曲线并非易事，所以直到 1916 年才由密立根的精确实验验证了爱因斯坦光电效应方程，这是密立根在多年研究接触电势差，分析阳极光电流等各种误差来源，改进光电管的真空装置以剔除氧化膜的基础上实现的。实际上在实验中，除了阴极的光电效应外，还显著地伴随着下列两个过程：

(1) 当光照射到阴极时，必然有部分光漫反射至阳极，致使阳极产生光电效应并发射光电子，这些光电子很易到达阴极而形成阳极光电流。显然，在外加反向电压的作用下阳极光电流会很快地趋于饱和，其  $I \sim U$  曲线如图 7-7-7 中的虚线所示。

(2) 当光电管无任何光照时，在外加电压作用下仍会有微弱电流流过，我们称之为光电管的暗电流，形成暗电流的主要原因是由阴极和阳极之间绝缘电阻不够高以及常温下金属的热电子发射等。一般说来，光电管的暗特性，即无光照射的伏安特性，基本上是非线性的，

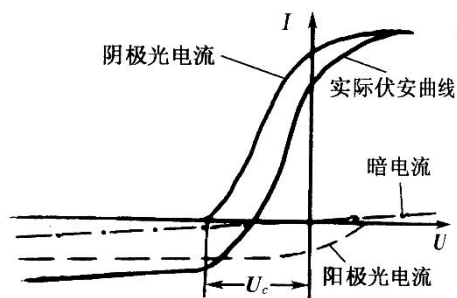


图 7-7-7 光电管的实际伏安特性曲线

其  $I \sim U$  曲线如图 7-7-7 中的点划线所示。

因上述两种影响，光电管的实际伏安特性曲线如图 7-7-7 中的实线所示，它是阴极光电流、阳极光电流和暗电流的叠加结果，这样给准确找出外加遏止电压  $U_0$  带来了一定的困难。正确地找出各种频率的入射光所对应的阴极光电流的遏止电压是本实验的关键，根据暗电流及阳极光电流的大小和特点（由光电管的类型决定），常用下面两种方法求出遏止电压：

(1) 交点法。若光电管的暗电流很小，并在实验中尽量防止入射光直接照射或较强烈地反射到阳极上，则阳极光电流也很小，因而光电管的伏安特性曲线比较理想，它与  $U$  轴（横轴）交点处的电压即可以近似地认为是遏止电势差  $U_0$ 。（推荐）

(2) 拐点法。减小阳极光电流是比较困难的，而且阳极光电流与光强有关，难以消除其影响，但由于阳极光电流有随外加反向电压很快趋于饱和的特点，实际伏安曲线应在阴极光电流的遏止电势差处为一拐点，利用伏安特性曲线的拐点找出遏止电势差  $U_0$  的方法称为拐点法，这是一种较为常见的方法。显然阴极光电流在遏止电势差附近上升得越快，阳极光电流越容易饱和，拐点就越明显，确定的遏止电势差  $U_0$  也越精确。可以理解，用拐点法时应在实验中适当提高入射光的强度。

#### 四、实验内容与步骤

##### 1、测试前准备

- 打开实验仪和汞灯电源，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“光电管暗盒的电压输入端”与“测试仪的电压输出端（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。

##### 2、测普朗克常数 $h$

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

###### a) 手动测量（推荐）

使“手动/自动”模式键处于手动模式。

旋转光阑选择圈的“Φ4”光阑及滤色片选择圈的“365”滤色片到“↓”下方，打开汞灯暗盒遮光盖开始实验。

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，先确定高位值，再顺次往低位调节。

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

###### b) 自动测量（选做）

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。

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。

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。

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。

表 1  $U_0 - v$ 关系光阑孔 $\Phi =$  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
截止电压 $U_{0i}(\text{V})$	手动					
	自动					

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

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（仪器与示波器连接）。

- 由此可验证光电管饱和光电流与入射光成正比。

也可在  $U_{AK}$  为 50V 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      **Φ=**    mm

435.8nm 光阑 2mm	$U_{AK}$ (V)								
	$I$ ( $\times 10^{-11}A$ )								
546.1nm 光阑 4mm	$U_{AK}$ (V)								
	$I$ ( $\times 10^{-11}A$ )								

表 3  $I_M - P$  关系 $U_{AK} =$  V  $L =$  mm

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

表 4  $I_M - P$  关系 $U_{AK} =$  V  $\Phi =$  mm

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

## 五、数据处理

由表 1 的实验数据, 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  $e = 1.602 \times 10^{-19} C$ ,  $h_0 = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ 。

根据表 2、3、4 中数据, 在坐标纸上作图。

## 六、注意事项

1. 滤色片表面应保护好, 切忌污染, 并防止打碎。
2. 更换滤色片时, 先将光源出射孔盖住, 实验完毕后光电管应立即罩上遮光罩, 避免光直射阴极而缩短光电管寿命。
3. 汞灯一旦打开, 不要随意关闭。汞灯熄火后, 不能立即启动, 需过十多分钟待灯管冷却后才能再次点燃。由于汞灯辐射的紫外线较强, 不要直视汞灯以防眼睛受伤。
4. 由于光电管的内阻很高, 光电流很小, 在测量中要注意外界干扰。

## 七、预习思考题

1. 为什么反向电压加到一定数值后, 光电流出现负值?
2. 什么是遏止电压? 影响其确定的主要因素有哪些? 在实验中如何较精确地确定?

## 八、分析讨论题

1. 讨论“交点法”和“拐点法”两种确定遏止电压  $U_c$  方法的优点以及误差因素。

## 附录 1：光电效应实验步骤（示例）

### 测普朗克常数

（以 400mm 距离， $\Phi 4$  光阑为例）

#### 准备工作

- 1、将汞灯及光电管暗箱用遮光盖盖上，接通实验仪及汞灯电源，预热 20 分钟。
- 2、调整光电管与汞灯距离为 400mm 并保持不变。
- 3、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连接起来（红—红，蓝—蓝）。
- 4、将光电管暗箱电流输出端 K 与实验仪微电流输入端断开（断开实验仪一端）。“电流量程”置于  $10^{-13}$  档位（光电管工作情况与其工作环境，工作条件密切相关，可能置于其他档位），进行调零。

**注：调零时，必须将光电管暗箱电流输出端 K 与实验仪微电流输入端断开，且必须断开连线的实验仪一端。**

- 5、用高频匹配电缆(短 Q9 线，长 500mm)将电流输入连接起来，按“调零确认/系统清零”键，系统进入测试状态。

#### 测量

##### 手动

- 1、按“手动/自动”键将仪器切换到手动模式。
- 2、打开光电管遮光盖，将“ $\Phi 4$ ”的光阑及 365.0nm 的滤光片滤色片调到“↓”下方，打开汞灯遮光盖。

**注：先安装光阑及滤光片后打开汞灯遮光盖。**

- 3、由高位到低位调节电压（←，→调节位，↑，↓调节值的大小）。寻找电流为零时的电压值，以其绝对值作为  $U_0$  的值，记录下来。
- 4、依次更换 404.7nm，435.8nm，546.1nm，577.0nm 的滤光片，重复步骤 2。

**注：更换滤光片时需盖上汞灯遮光盖。**

- 5、测试结束。

##### 自动

- 1、按“手动/自动”键将仪器切换到自动模式。
- 2、此时电流表左边指示灯闪烁，表示系统处于自动测量扫描范围设置状态，用电压调节键设置扫描起始电压和扫描终止电压。

**注：显示区左边设置起始电压，显示区右边设置终止电压。**

建议扫描范围：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。

- 3、设置好后，按动相应的存储区按键，右边显示区显示倒记时 30 秒。倒记时结束后，开始以 4mV 为步长自动扫描，此时右边显示区显示电压，左边显示区显示相应电流值。
- 4、扫描完成后，“查询”指示灯亮，用电压调节键改变电压，读取电流为零时的电压值，以其绝对值作为  $U_0$  的值，记录下来。
- 5、按“查询”键，查询指示灯灭，此时系统回复到扫描范围设置状态，可进行下一次测试。
- 6、旋转滤色片选择圈，依次换上 404.7nm，435.8nm，546.1nm，577.0nm 滤光片，重复步骤 2-6。

**注：更换滤光片时应盖上汞灯遮光盖。**

- 7、测试结束。

## 测 $I-U_{AK}$ 关系

一、不同谱线在同一光阑，同一距离下的伏安饱和特性曲线。（以 400mm 距离， $\Phi 4$  光阑为例）  
准备工作

- 1、断开光电管暗箱电流输出端 K 与实验仪微电流输入端，将“电流量程”置于  $10^{-11}$  档（光电管工作情况与其工作环境，工作条件密切相关，可能置其它挡位），系统进入调零状态，进行调零。

**注：调零时必须把光电管暗箱电流输出端 K 与实验仪微电流输入端断开，且必须断开实验仪一端。**

- 2、用高频匹配电缆(短 Q9 线，长 500mm)将电流输入连接起来，按“调零确认/系统清零”键，系统进入测试状态。

手动

- 1、按“手动/自动”键将仪器切换到手动模式。
- 2、旋转光阑选择圈和滤色片选择圈，“ $\Phi 4$ ”光阑及“365.0”滤色片调到“↓”下方，打开汞灯遮光盖。
- 3、按电压值由小到大调节电压（←，→调节位，↑，↓调节值的大小），记录下不同电压值及其对应的电流值。
- 4、改变滤光片，重复步骤 2-4。
- 5、测试结束，依据记录下的数据作出  $I-U_{AK}$  图像。

自动

- 1、按“手动/自动”键将仪器切换到自动模式。
- 2、旋转光阑选择圈和滤色片选择圈，“ $\Phi 4$ ”光阑及“365.0”滤色片调到“↓”下方，打开汞灯遮光盖。
- 3、（此时电流表左边指示灯闪烁，表示系统处于自动测量扫描范围设置状态）用电压调节键设置扫描起始电压和扫描终止电压。（最大扫描范围为 -1~50V）
- 4、设置好后，按动相应的存储区按键，右边显示区显示倒记时 30 秒。倒记时结束后，开始以 1V 为步长自动扫描，此时右边显示区显示电压，左边显示区显示相应电流值。
- 5、扫描完成后，“查询”指示灯亮，用电压调节键改变电压，录下不同电压值及其对应的电流值。
- 6、按“查询”键，查询指示灯灭，此时系统回复到扫描范围设置状态,可进行下一次测试。
- 7、旋转滤色片选择圈，依次换上 404.7nm，435.8nm，546.1nm，577.0nm 滤光片。

**注：更换滤光片时应盖上遮光盖。**

- 8、重复步骤 2-6，直到测试结束，依据记录下的数据作出  $I-U_{AK}$  图像。

注：使用示波器观察不同谱线在同一光阑，同一距离下的伏安饱和特性曲线时，由于各谱线的特性曲线数据跨度较大，为取得最佳显示效果，建议只做“435.8”“546.1”“577.0”三条谱线的特性曲线进行比较。

二、测某条谱线在同一光阑，不同距离下的伏安饱和特性曲线和某条谱线在不同光阑，同一距离下的伏安饱和特性曲线与不同谱线在同一光阑，同一距离下的伏安饱和特性曲线的方法类似，只是将改变滤光片改为改变距离或光阑，同时为避免数据溢出，将“电流量程”适当调整即可。



## 附录 2：光电效应伏安特性曲线的说明

光电效应具有如下的实验事实：

- 1、截止电压与频率成线性关系，光子频率越高，截止电压越高。
- 2、对同一频率的光，饱和光电流的大小与入射光强成正比，如实验原理中图 2 所示。
- 3、对不同频率的光，饱和光电流的大小取决于入射光强与光电管阴极材料在该频率的光谱灵敏度。饱和光电流大小与频率无直接的必然联系。

对于光电管常用的阴极材料，365-577nm 的光谱灵敏度相差不大，做 5 条谱线的伏安特性曲线时，哪条谱线位置高，主要取决于该条谱线的入射光强度。

应该说明，实验原理中图 3 只是用于说明对于不同频率的光，截止电压不同。图 3 中频率高的光饱和光电流大，只是因为在于举例的两条条谱线中，频率高的谱线光更强。假如是频率低的光更强，则频率低的光的饱和光电流当然会大于频率高的光的饱和光电流。

在光阑大小一致时，不同波长的光强度由汞灯光源在该波长处的相对强度及该波长滤光片的透过率共同决定。

图 1 为光电效应用汞灯谱线典型的相对强度，表 1 为滤色片的透过率。

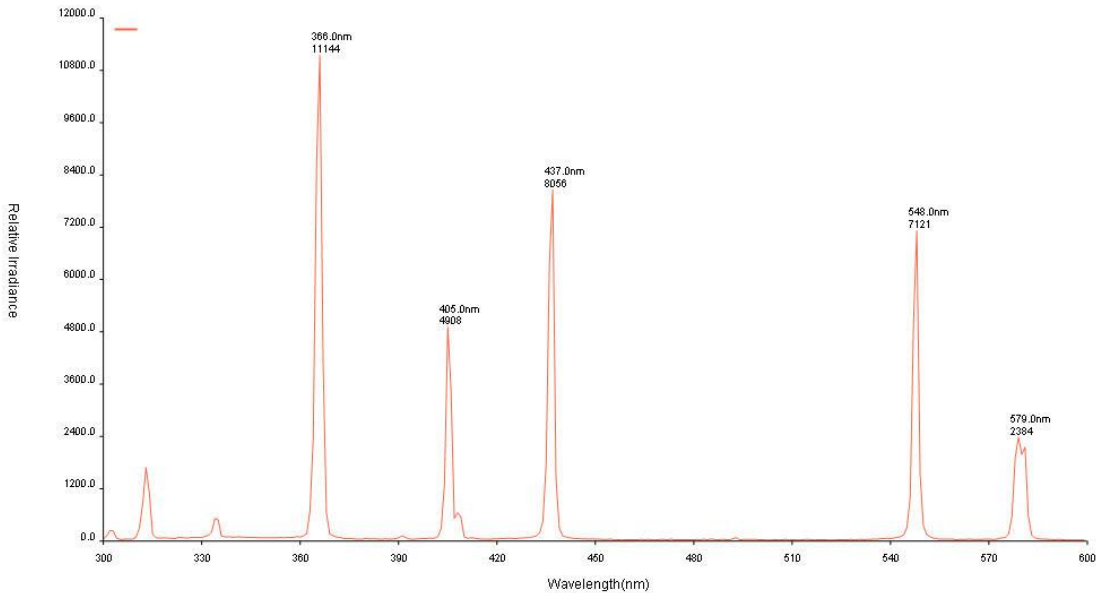


图 1 汞灯谱线的相对强度

表 1 各滤光片的透过率

滤光片	365nm	405nm	436nm	546nm	577/579nm
透过率	35%	38%	53%	15%	20%

综合考虑汞灯谱线强度和滤色片透过率，光电管接收到的谱线强度依次是 365nm，436nm，405nm，546nm，577nm。典型情况下各谱线的高低也依此排序。

需要说明的是，由于汞灯在生产中的差别或使用过程中发生条件改变，同一批次的各只汞灯，或同一只汞灯在使用一段时间后，光谱都可能不一样，可能导致不同频率伏安特性曲线的高低排序发生改变。

不论各条谱线高低如何排序，只要证明饱和光电流大小与光强成正比，就与光电效应的基本实验事实符合，我们的实验正好证明了这点。