

光电效应实验（讲义）

1887 年德国物理学家赫兹在研究电磁波时首先发现了光电效应现象，但是这一现象当时无法用人们熟知的经典电磁波理论进行解释。1905 年爱因斯坦在普朗克研究黑体辐射时引入的能量子假设的基础上，提出了光量子的概念，建立了著名的爱因斯坦光电效应方程，从而成功地解释了光电效应。在爱因斯坦提出光电效应方程后，以实验精确著名的密立根用了十年时间对光电效应实验进行艰苦卓绝的研究，终于在 1916 年以精湛的实验技术证实了爱因斯坦光电效应方程，并给出了当时最精确的普朗克常量数值。爱因斯坦因在光电效应方面的杰出贡献于 1921 年获得了诺贝尔物理学奖，密立根也因在光电效应实验和基本元电荷测定方面的卓越工作于 1923 年获得了诺贝尔物理学奖。

对光电效应的研究使人们进一步认识到光的波粒二象性本质，促进了光的量子理论的建立和近代物理学的发展，基于光电效应制成的太阳能电池、光电管、光电倍增管等光电器件已在日常生活、工农业生产、科研和国防等众多领域得到了广泛的应用。

一、实验目的

- (1) 测定光电管的伏安特性曲线，了解光电效应的基本规律；
- (2) 验证爱因斯坦光电效应方程，测定普朗克常量；
- (3) 通过实验加深对光的波粒二象性的理解。

二、实验仪器

普朗克常数测量仪，汞灯，滤光片，光阑，导轨，光电管，电缆。

三、实验原理

当一定频率的光照射到某些金属表面时，可以使电子从金属表面逸出，这种现象称为

光电效应，逸出的电子称为光电子。利用光电效应做成的器件，叫做光电管。图 19-1 是光电效应实验原理图，GD 为抽成真空的光电管，A 为光电管的阳极，K 为光电管的阴极，G 为微电流计，V 为电压表，R 为滑线变阻器，调节 R 可使光电管阳极和阴极之间的电压 U 从负电压到正电压连续变化。

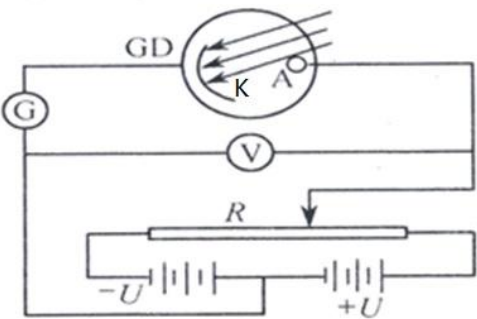


图 1 光电效应实验原理图

当一束频率为 ν 的单色光照射在由金属材料制成的阴极 K 上时，立即有光电子逸出金属表面，如果在阳极 A 和阴极 K 之间加上正向电压，光电子将在正向电场作用下定向加速运动到阳极，在电路中形成光电流 I ，可以用微电流计检测到。当在阳极 A 和阴极 K 之间加上反向电压时，即阴极 K 的电势高于阳极 A，光电管内的静电场方向为从 K 到 A，电场对从阴极 K 逸出的光电子起减速作用。随着反向电压的增加，能够到达阳极 A 的光电子数目越来越少，光电流 I 逐渐减小，当反向电压达到 U_c 时，从阴极 K 逸出的具有最大动能

$\frac{1}{2} m v^2$ 的光电子刚好不能到达阳极 A，光电流减小为零， U_c 称为截止电压。此时具有最大初速度的光电子将全部初动能用于克服反向电场的作用，即

$$eU_c = \frac{1}{2} m v^2 \tag{1}$$

光电效应具有如下基本实验规律：

(1) 饱和光电流与入射光的光强成正比。用频率为 ν 的单色光照射光电管，在一定的入射光强 P 下，改变光电管两端的电压 U ，可以测得不同电压 U 所对应的光电流 I ，其对应关系 $I-U$ 曲线称为光电管的伏安特性曲线。固定入射光强 P 不变，光电流 I 会随着光电管两端的电压 U 的增大而增加，当 U 增加到一定数值后， I 随 U 的增加放缓，并最终达到一饱和值，称为饱和光电流 I_s 。对于不同光强 P_1 、 P_2 的入射光，其饱和光电流 I_s 与入射光的光强 P 成正比，其伏安特性曲线如图2所示。

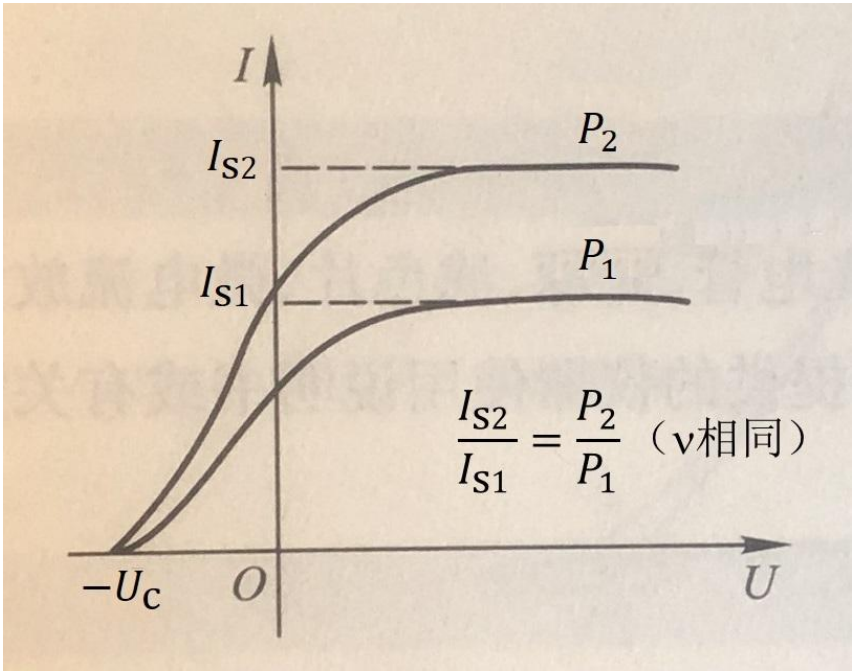


图2 光电管伏安特性曲线

(2) 光电效应存在截止频率 ν_0 。对于某一金属，存在一个特定频率 ν_0 ，只有在入射光的频率 ν 大于 ν_0 时，才能有光电子从金属表面逸出，电路中才有光电流，这个频率 ν_0 叫做截止频率，对应的波长叫做截止波长，亦称红限。如果射光的频率 ν 小于截止频率 ν_0 ，

则无论光强有多大，照射时间有多么长，都不会产生光电效应。不同的金属具有不同的截止频率 ν_0 。

(3) 光电子的初动能 $\frac{1}{2} m \nu^2$ 与入射光的频率 ν 成正比，与光强 P 无关。用频率为 ν (ν 大于截止频率 ν_0) 的光照射金属阴极 K ，如图 2 所示，在不同的光强 P 下得到相同的截止电压 U_c ，由公式 (1)，与截止电压对应的是光电子的最大初动能 $\frac{1}{2} m \nu^2$ ，这也就是说光电子的初动能与入射光光强的大小无关。若改变入射光的频率 ν ，实验中得到的截止电压 U_c 也随之变化， $U_c - \nu$ 关系曲线为一直线，截止电压 U_c 正比于入射光频率 ν ，也即光电子的初动能 $\frac{1}{2} m \nu^2$ 正比于入射光的频率 ν 。图 3 是钾、钠、锌、钨、铂五种金属的截止电压随入射光频率变化的关系曲线，可以看到它们都呈线性关系，且互相平行，即斜率都是相同的。

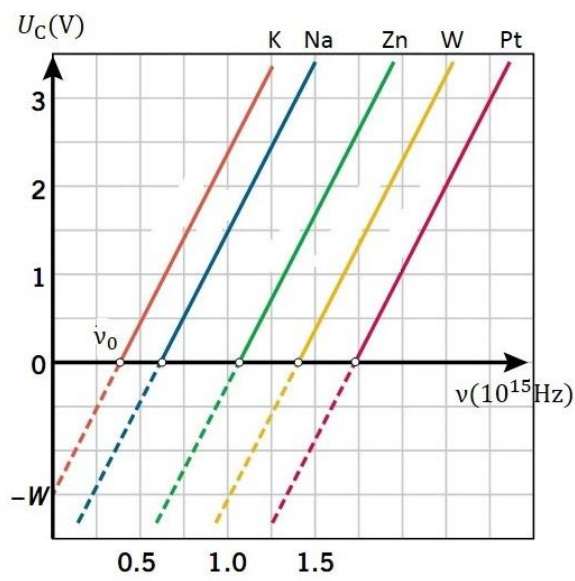


图3 五种金属的截止电压随入射光频率变化关系曲线

(4) 光电效应是瞬时效应。无论入射光的光强怎样微弱，只要其频率大于截止频率，一经照射，立刻产生光电子，时间间隔不超过 10^{-9}s 。

光电效应的上述实验规律在用光的经典电磁波理论解释时遇到了困难。首先，按照经典理论，不论入射光的频率是多少，只要光强足够大，总可以使金属表面的电子获得足够的能量逸出金属，而这却与实验规律相矛盾，实验中存在截止频率，如果入射光的频率小于截止频率，无论光强有多大，都不能产生光电效应。此外，按照经典理论，电子逸出金属需要有一定的时间来积累所需的能量，而这也与实验规律相矛盾，实验中光的照射和电子的逸出几乎是同时发生的。

为了解释光电效应现象，1905年爱因斯坦在普朗克能量量子假设的基础上，提出了具有重要历史意义的光量子理论。他认为光并不是以连续分布的形式把能量传输到空间，而是一份一份地向外辐射，一束频率为 ν 的光可以看成是一束粒子流，这些粒子称为光量子，后称为光子，每个光子的能量为 $h\nu$ ，其中 h 为普朗克常量，其值为

$6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。当频率为 ν 的光照射在金属上时，一个能量为 $h\nu$ 的光子与一个自由电子发生碰撞，电子吸收了光子全部的能量，其中一部分用于电子克服金属表面的束缚逸出所需要消耗的逸出功 W ，剩余能量作为电子逸出后的初动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 。根据能量守恒定律，有

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

这就是著名的爱因斯坦光电效应方程，它成功地解释了光电效应的实验规律。

由式(2)可知，如果能够发生光电效应，需要逸出电子的动能 $\frac{1}{2}mv^2 \geq 0$ ，则

电子吸收光子的能量 $h\nu$ 必须大于电子的逸出功 W ，即 $h\nu \geq W$ ， $\nu \geq \frac{W}{h}$ ，当逸

出电子动能为零时对应的照射光频率

$$\nu_0 = \frac{W}{h} \quad (3)$$

就是截止频率。当照射光频率 $\nu < \frac{W}{h}$ 时，电子吸收光子后获得的能量小于逸出功，光

电效应是不能发生的，存在截止频率 ν_0 。用 $\nu > \nu_0$ 的光束照射，光子一个一个地打在金属上面，电子要么完全不吸收光子，要么一次性吸收一个光子，光电子会立即从金属中释放出来，而不需要能量积累的时间，所以光电效应是瞬时发生的。入射光的光强越大，意味着光子流的密度越大，单位时间内吸收光子的金属电子数目越多，从而饱和电流就越大。但无论光子流的密度如何，一个电子一次只吸收一个光子，电子获得的能量 $h\nu$ 与光强无关，只与频率 ν 成正比，将式 (2) 改写为

$$\frac{1}{2} m\nu^2 = h\nu - W \quad (3)$$

即光电子的初动能是与入射光的频率 ν 成正比的。再将式 (1) 代入式 (3)，有

$$\begin{aligned} eU_c &= h\nu - W \\ U_c &= \frac{h}{e} \nu - \frac{W}{e} \end{aligned} \quad (4)$$

可知道截止电压 U_c 也是与入射光频率成正比的，比例系数为 $\frac{h}{e}$ ，是与金属种类无关的常量，图 3 中不同金属的截止电压随入射光频率变化关系的曲线互相平行，即是这一物理原理的实验表现。

实验中以不同频率 ν 的光入射，测得相应的截止电压 U_c ，做 $U_c - \nu$ 变化关系图，可

得到一直线， $\frac{h}{e}$ 为直线的斜率，将电子电荷值 $e = 1.602176565 \times 10^{-19} \text{C}$ 代入即可测得普朗克常量 h ，这就是用光电效应实验测量普朗克常量的实验原理。由 $U_c - \nu$ 直线的截距 $-\frac{W}{e}$ 可以得到金属的逸出功大小，由直线与 ν 坐标轴的交点可以得到金属的截止频率 ν_0 。

四、仪器介绍

光电效应实验装置如图 4 所示。光电管的光谱响应范围为 340~700 nm。汞灯光谱中有多条较强的谱线，实验室提供 5 种不同波长的滤光片，将汞灯光线滤光后可分别获得波长为 365.0 nm、404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm 的光线。实验室提供直径分别为 2mm、4mm、8mm 的光阑，可以限制进入光电管的光束大小。汞灯和光电管可以沿导轨移动，导轨上有刻度，可以设定汞灯与光电管之间的距离。

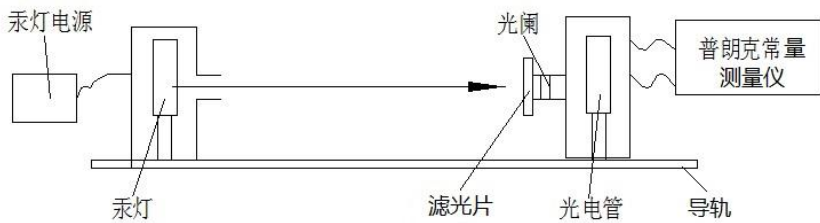


图 4 光电效应实验装置图

五、实验内容与步骤

1. 测量前准备

首先用遮光罩把光电管入光孔盖上，接通汞灯和测量仪的电源，预热 20 min。将汞灯和光电管之间的距离调整到约 400 mm。用连接线将测量仪后面板上的电压输出端与光电管的电压输入端同色相连。

2. 测量普朗克常量 h

图 2 是理想情况下的光电流随电压变化的曲线，实际实验中还会有一些不利因素影响测量结果，如暗电流、本底电流、反向电流等，实际测得的光电流是这些干扰电流与待测光电流之和。由于本实验设备的电流放大器灵敏度高、稳定性好，光电管的暗电流和阳极反向电流水平也比较低，所以我们直接采用“零电流法”来确定各频率光照下的截止电压，即将某一频率光照射下测得光电流为零时对应的反向电压绝对值作为该频率的截止电压 U_c 。

图 5 所示是测量仪的前面板图。测量截止电压时，将“伏安特性测试/截止电压测试”状态键设为“截止电压测试”，“电流量程”档位设为 10^{-13} A。将光电管电流输出端与测量仪后面板上的电流输入端断开，在不输入信号的情况下对测量仪进行调零，旋转“调零”旋钮使“电流指示”为零，再用电缆将电流输出输入端连接起来，按下“调零确认/系统清零”键，测量仪即进入测量状态。注意：每次改变电流量程后，都要按上述方法进行对测量仪进行重新调零。



图 5 光电效应实验仪面板图

将汞灯和光电管之间的距离调整为 400 mm，把汞灯出光孔用遮光盖盖上，光电管遮光盖取下，将直径 4 mm 的光阑和 365.0 nm 的滤光片装在光电管的入光孔上，安装好后取下汞灯遮光盖。将“手动/自动”模式键设为“手动”，在-2~0 V 范围内调节加在光电管上反向电压的大小，用◀、▶键选择电压调节的数位，用▲、▼键调节该数位的数值，从高位到低位逐步精细调节，同时观察相应光电流的变化，找到光电流为零时对应的反向电压数值，将其绝对值作为该波长光对应的截止电压 U_c ，测量数据记入表 19-1 中。

表 19-1 测量截止电压 U_c 与入射光频率 ν 的关系数据记录表

λ/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
$\nu/10^{14}\text{Hz}$	8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
U_c/V					

再将汞灯遮光盖盖上，依次换上 404.7 nm、435.8 nm、546.1 nm、577.0 nm 的滤光片，用上述同样的测量方法，测得各频率光对应的截止电压，记入表 19-1 中。注意：每次更换滤光片时要先将汞灯遮光盖盖上，严禁让汞灯灯光不经滤光片直接射入光电管，以免强光直接照射阴极而缩短光电管寿命。

3 测量光电管的伏安特性曲线

测量伏安特性曲线时，将“伏安特性测试/截止电压测试”状态键设为“伏安特性测试”，“电流量程”档位设为 10^{-11}A ，将光电流输入电缆断开，测量仪重新调零后再接上。汞灯和光电管之间的距离设为 400 mm，将直径 4mm 的光阑和 435.8 nm 滤光片安装在光电管进光孔上。采用手动模式测量，从-1V 到 50V 区间调节光电管阳极和阴极间的电压 U_{AK} ，将施加的电压值 U_{AK} 和对应的光电流值 I 记入数据记录表 19-2 中。在开始截止电压 U_c 附近

光电流突然快速增加时，电压变化间隔可以取小一些，随着 U_{AK} 增大，光电流接近饱和，可以逐渐增大电压步长。

表 19-2 测量光电管伏安特性曲线数据记录表

U_{AK}/V								
$I/10^{-11}A (\lambda=435.8\text{ nm})$								
$I/10^{-11}A (\lambda=546.1\text{ nm})$								

换上 546.1 nm 滤光片，用上述同样的方法，测量在 546.1 nm 波长光照射下光电管的伏安特性曲线，将测量数据记入表 19-2 中。

4. 验证光电管的饱和光电流与入射光强度成正比

(1) 通过改变光阑孔径以改变入射光强度

将“伏安特性测试/截止电压测试”状态键设为“伏安特性测试”，“电流量程”档位设为 $10^{-11}A$ ，在手动模式下设 U_{AK} 为 50 V。将汞灯和光电管之间的距离设为 400 cm，安装 435.8 nm 滤光片，测量分别装上直径为 2mm、4mm、8mm 的光阑时对应的饱和光电流 I_s 的大小，将测量数据记入表 19-3 中。更换 546.1 nm 滤光片，再次测量安装不同直径光阑对应的饱和光电流 I_s ，将测量数据记入表 19-3 中。

表 19-3 测量饱和光电流 I_s 与光阑孔径 d 的关系数据记录表

d/mm	2	4	8
$I_s/10^{-11}A (\lambda=435.8\text{ nm})$			
$I_s/10^{-11}A (\lambda=546.1\text{ nm})$			

(2) 通过改变照射距离以改变入射光强度

将“伏安特性测试/截止电压测试”状态键设为“伏安特性测试”，“电流量程”档位设为 10^{-11}A ，在手动模式下设 U_{AK} 为 50V 。将 546.1nm 滤光片和直径 4mm 的光阑安装在光电管的入光孔上，调整汞灯和光电管之间的距离 L 依次为 300mm 、 320mm 、 360mm 、 380mm 、 400mm ，测量不同照射距离对应的饱和光电流 I_{s} ，将测量数据记入表 19-4 中。

表 19-4 测量饱和光电流 I_{s} 与照射距离 L 的关系数据记录表

L/mm	300	320	360	380	400
$I_{\text{s}}/10^{-11}\text{A}$					

六、数据处理与分析

1. 由表 19-1 中截止电压 U_{c} 与入射光频率 ν 的关系实验数据，做 $U_{\text{c}}-\nu$ 关系图，用直线进行拟合，求出直线的斜率 k ，利用 $h = ke$ 求出普朗克常量 h ，并与公认值 $h_0 = 6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$ 进行比较，计算实验相对误差 $E = (h - h_0) / h_0$ ，计算中取 $e = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ 。

2. 由表 19-2 中光电流 I 与光电管电压 U_{AK} 的关系实验数据，在同一个图中作波长为 435.8nm 和 546.1nm 光照射下的光电管伏安特性曲线 $I-U_{\text{AK}}$ 关系图，分析曲线特征，并将两条曲线进行比较。

3. 分析表 19-3 中饱和光电流 I_{s} 与光阑孔径 d 的关系实验数据，给出结论。

4. 由表 19-4 中饱和光电流 I_{s} 与照射距离 L 的关系实验数据，做 $I_{\text{s}}-\frac{1}{L^2}$ 关系图，对实验曲线进行分析，并给出结论。

七、经验提示

1. 注意事项

- (1) 实验开始前要将测量仪和汞灯预热 20 min。
- (2) 汞灯一旦接通电源，不要随意关闭，一旦中途关闭，至少等 5 分钟后再打开。
- (3) 汞灯工作时温度很高，不要用手触碰和遮挡汞灯上方通风窗，以免烫伤。
- (4) 更换滤光片时要先将汞灯遮光盖盖上，严禁让汞灯灯光不经滤光片直接射入光电管，以免强光直接照射阴极而缩短光电管寿命。
- (5) 不要用手触摸滤光片表面。
- (6) 电流调零时应断开测量仪后面板上的电流输入电缆。每次改变电流量程后，都要按对测量仪进行重新调零。
- (7) 实验过程中尽量保持室内环境光强不变，即照明灯不要随意开或关。
- (8) 实验完毕应盖上汞灯和光电管的遮光盖。

2. 关键环节

本实验的关键环节是在测量光电管截止电压时，细致耐心地从高位到低位逐步精细调节电压，寻找光电流为零时的电压数值。

3. 常见问题

- (1) 增加电压时光电流一直为零。可能原因：①调零后忘记将光电流输入电缆重新接上；②忘记将汞灯或光电管遮光盖取下。
- (2) 截止电压测量结果误差较大。可能原因：①电流量程选择过大；②电压改变的步长过大。

4. 易犯错误

- (1) 改变电流量程后没有重新调零。
- (2) 更换滤光片和光阑时没有把汞灯遮光盖盖上。

八、实验思想方法精髓

在阴极和阳极之间施加反向电压，阻碍阴极发射的电子到达阳极，从而由阴极电流变化的信息中获得电子能量的信息，光电效应实验中“减速法”的实验思想在弗兰克-赫兹实验中也有应用。

九、思考题

1. 实验时能否将滤光片插到汞灯の出光孔上？为什么？
2. 实验中若改变光电管上的光照强度，对伏安特性曲线会有什么影响？

十、深入探究

1. 本实验中测量普朗克常量时采用了直径 4 mm 的光阑，那么你有没有想过光阑的大小对实验结果有影响吗？影响有多大？在选择光阑的大小时需要考虑哪些因素的影响？

参考资料：吕佩伟, 施洋, 马宋设, 马靖. 光电效应实验中光阑大小对实验结果影响的探讨[J]. 大学物理实验, 2014, 27 (03) :68-70.

2. 本实验中采用“零电流法”确定截止电压的大小，那么这种方法的优缺点是什么？你能否对确定截止电压的方法进行更深入的探究？

参考资料：徐金瑛, 鲁晓东. 用 Mathematica 实现光电效应实验的曲率法数据处理[J]. 大学物理实验, 2015, 28 (06) :94-97.

实验 19 光电效应实验原始数据

姓名: _____ 学号: _____ 班号: _____ 教师姓名: _____

实验时间: _____ 年 _____ 月 _____ 日 (☐ 上午 ☐ 下午 ☐ 晚上)

1. 测量截止电压 U_c 与入射光频率 ν 的关系

实验条件: 照射距离 $L =$ _____ mm, 光阑直径 $d =$ _____ mm, 电流量程为 _____ A

λ/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
$\nu/10^{14}\text{Hz}$	8.214	7.408	6.879	5.490	5.196
U_c/V					

2. 测量光电管伏安特性曲线

实验条件: 照射距离 $L =$ _____ mm, 光阑直径 $d =$ _____ mm, 电流量程为 _____ A

U_{AK}/V										
$I/10^{-11}\text{A}$ ($\lambda=435.8\text{nm}$)										
$I/10^{-11}\text{A}$ ($\lambda=546.1\text{nm}$)										

U_{AK}/V										
$I/10^{-11}\text{A}$ ($\lambda=435.8\text{nm}$)										
$I/10^{-11}\text{A}$ ($\lambda=546.1\text{nm}$)										

U_{AK}/V										
$I/10^{-11}\text{A}$ ($\lambda=435.8\text{nm}$)										

$I/10^{-11}\text{A } (\lambda=546.1\text{ nm})$										
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

U_{AK}/V										
$I/10^{-11}\text{A } (\lambda=435.8\text{ nm})$										
$I/10^{-11}\text{A } (\lambda=546.1\text{ nm})$										

U_{AK}/V										
$I/10^{-11}\text{A } (\lambda=435.8\text{ nm})$										
$I/10^{-11}\text{A } (\lambda=546.1\text{ nm})$										

3. 测量饱和光电流 I_s 与光阑孔径 d 的关系

实验条件：照射距离 $L=$ _____mm，光电管电压 $U_{AK}=$ _____V，电流量程为_____A

d/mm	2	4	8
$I_s/10^{-11}\text{A } (\lambda=435.8\text{ nm})$			
$I_s/10^{-11}\text{A } (\lambda=546.1\text{ nm})$			

4. 测量饱和光电流 I_s 与照射距离 L 的关系

实验条件：光阑直径 $d=$ _____mm，光电管电压 $U_{AK}=$ _____V，电流量程为_____A

L/mm	300	320	360	380	400
$I_s/10^{-11}\text{A}$					