浙江大学

物 理 实 验 报 告

实验名称： 光电效应测定普朗克常量

实验桌号： 16

指导教师：

班级：

姓名：

学号：

实验日期： 2025 年 11 月 4 日　　**星期** 二 **下午**

（此处填实验选课系统内日期）

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：

情况说明：

一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，包括必要的光路图、电路图、公式等。不超过 500 字。）

实验现象： 光电效应是指当光照射到物体（通常是金属）表面时，光的能量被物体中的电子吸收，使这些电子逸出物体表面的现象。逸出的电子称为光电子。实验表明，光电效应具有瞬时性、存在饱和电流（见图 1）、截止电压和红限频率等特征。

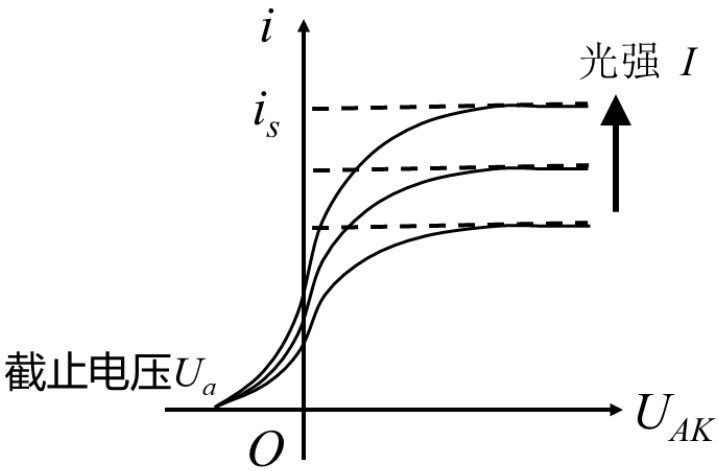


图 1: 光电流 I 与阳极电压 U_{AK} 的关系。饱和电流 I_H 与光强成正比，但遏止电压 U_a 与光强无关。

实验原理： 根据爱因斯坦的光量子理论，频率为 ν 的光是由能量为 $E = h\nu$ 的光子组成的。当光子照射到金属表面时，其能量被电子完全吸收。电子吸收能量后，一部分用于克服金属表面的逸出功 W，另一部分转化为电子逸出后的最大初动能 E_k。

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W \tag{1}$$

上式称为爱因斯坦光电效应方程。实验中（电路图见图 3），我们在光电管的阴极 K 和阳极 A 之间施加一个反向电压 U_{AK}。如图 1 所示，当 U_{AK} 为正时，光电流随电压增加而趋于饱和；当 U_{AK} 为负时，光电流迅速减小。当这个反向电压足以使具有最大初动能的光电子也无法到达阳极时，光电流降为零。此时的反向电压称为遏止电压（截止电压）U_a。此时，电子克服电场力所做的功等于其最大初动能：

$$eU_a = E_k \tag{2}$$

图 1 也表明，虽然光强（表现为饱和电流 I_H）不同，但 U_a 相同，这印证了 E_k 仅与频率 ν 有关（见方程 (1)），与光强无关。联立方程 (1) 和 (2) 可得：

$$eU_a = h\nu - W \quad \Longrightarrow \quad U_a = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e} \tag{3}$$

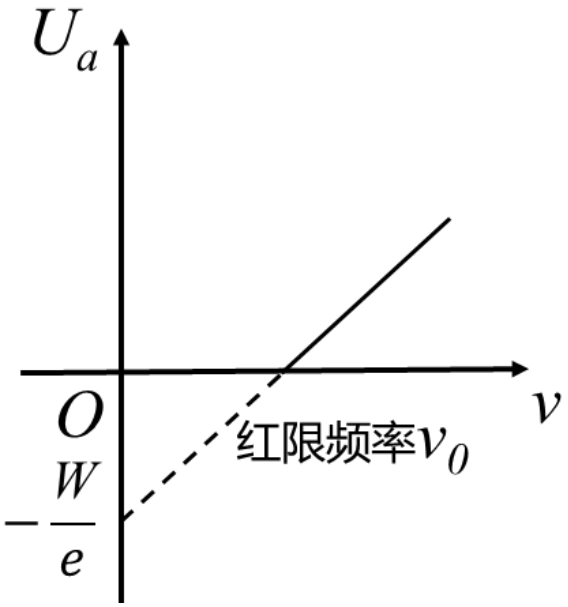


图 2: 遏止电压 U_a 与入射光频率 ν 呈线性关系。图线在横轴的截距即为红限频率 ν_0。

由 (3) 可知，遏止电压 U_a 与入射光的频率 ν 呈线性关系，这与图 2 所示的实验结果（$U_a - \nu$ 图像）相符。根据此方程，该直线的斜率 $K = h/e$，且图线在纵轴的截距为 $-W/e$，在横轴的截距即为红限频率 $\nu_0 = W/h$。

实验方法： 本实验的目的是通过测量 U_a 和 ν 的关系来计算普朗克常数 h。

(1) **获取单色光：**实验采用高压汞灯作为光源，通过不同中心波长的滤色片（如 365nm, 405nm, 436nm, 546nm, 577nm）来获得多组不同频率 ν 的近似单色光。实验光路如图 4 所示。

(2) **测量遏止电压 U_a：**对于每一种频率的单色光，调节光电管两端的反向电压 U_{AK}，同时用微电流计（G）监测光电流 I。逐渐增大反向电压，直到微电流计示数恰好为零。此时的电压值 U_{AK} 即为该频率下的遏止电压 U_a（零电流法）。

(3) **数据处理：**记录多组 (ν_i, U_{ai}) 数据，并在 $U_a - \nu$ 坐标系中绘制数据点。对这些数据点进行线性拟合，得到直线的斜率 K。

(4) **计算普朗克常数：**根据 $K = h/e$，计算普朗克常数 $h = e \cdot K$。

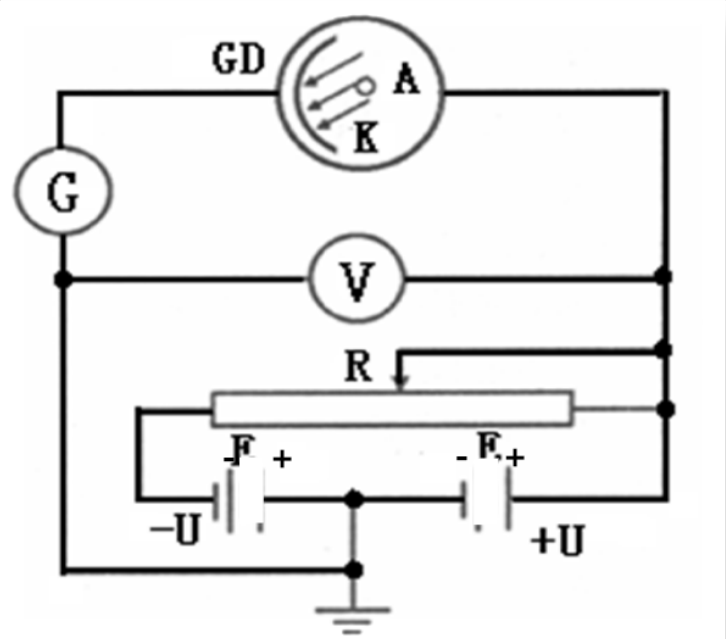


图 3: 光电效应实验电路示意图。GD 为光电管（K 为阴极，A 为阳极），G 为微电流计，V 为电压表，R 为滑线变阻器用于调节反向电压。

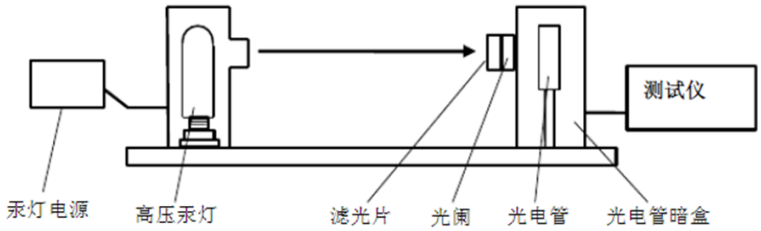


图 4: 实验光路：汞灯电源 -> 高压汞灯 -> 滤光片 -> 光阑 -> 光电管（置于暗箱中）。

2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字。）

- 深刻理解光电效应的基本规律和爱因斯坦的光量子假说（如方程 (1)）。
- 掌握使用“零电流法”测量不同频率单色光所对应的遏止电压 U_a 的实验方法。
- 验证 U_a 与 ν 之间的线性关系（如方程 (3)），并学会利用 $U_a - \nu$ 图线的斜率来求解普朗克常数 h。

3. 实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字。）

本实验的难点在于遏止电压 U_a 的准确测定。这是因为实际测量的电流中并非只包含光电流，还包含了暗电流（源于热发射、漏电等）和阳极反向电流（源于阴极材料污染阳极）。这些额外电流的存在，使得通过“零电流法”测得的电压 U_a' 只是真实遏止电压 U_a 的一个近似值，从而给实验结果带来系统误差。

二、原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

原始数据如图5所示。

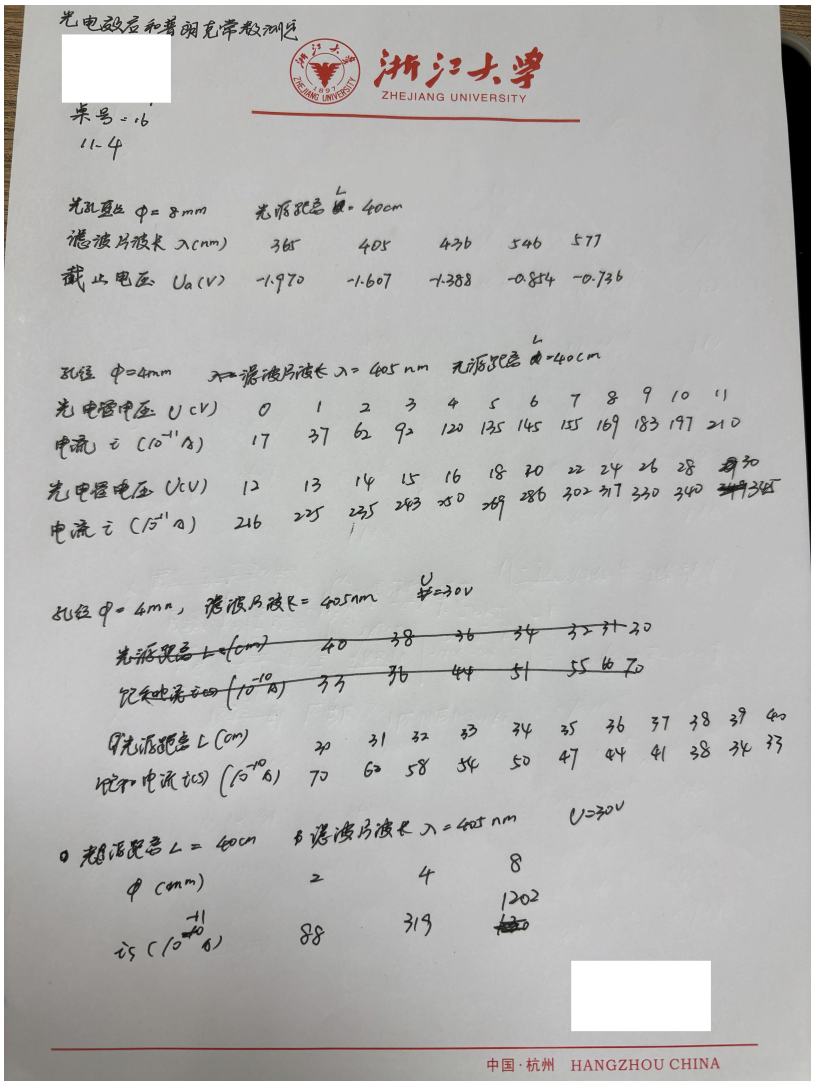


图 5: 原始数据记录

三、结果与分析（60 分）

1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）根据原始数据记录（图 5），本实验测得的数据分为四组，分别用于计算普朗克常数、绘制伏安特性曲线、探究饱和电流与距离的关系、探究饱和电流与光阑孔径的关系。

1. 遏止电压 U_a 与入射光频率 ν 关系 本实验的核心数据。根据公式 $\nu = c/\lambda$ 计算入射光频率。数据整理如表 1 所示。

表 1: 遏止电压与入射光频率对应表 (光阑孔径: 8mm, 光源距离: 40cm)

光谱线 λ (nm)	入射光频率 ν (10^{14} Hz)	遏止电压 U_a (V)
365	8.214	-1.970
405	7.408	-1.607
436	6.879	-1.388
546	5.490	-0.854
577	5.196	-0.736

数据处理： 对表 1 中的遏止电压 U_a (V) 和入射光频率 ν (10^{14} Hz) 进行线性拟合，得到 $U_a = K\nu + b$ 的关系，如图 6 所示。根据 Python 脚本运行结果：

- 拟合斜率 $K = -4.0440 \times 10^{-1}$ V / (10^{14} Hz) $= -4.0440 \times 10^{-15}$ V/Hz
- 拟合截距 $b = 1.3724$ V

物理学公式为 $eU_s = h\nu - W$，其中 U_s 为遏止电势（正值）。实验测量值为 $U_a = -U_s$（负值）。因此，我们拟合的方程 $U_a = K\nu + b$ 对应于 $U_a = (-h/e)\nu + (W/e)$。可得：

- $\mathbf{K = -h/e}$
- $\mathbf{b = W/e}$

计算结果：

- 普朗克常数 $\mathbf{h} = -K \cdot e = -(-4.0440 \times 10^{-15}\ \text{V/Hz}) \times (1.6022 \times 10^{-19}\ \text{C}) = \mathbf{6.4792 \times 10^{-34}}\ \text{J} \cdot \text{s}$
- 逸出功 $\mathbf{W} = b \cdot e = (1.3724\ \text{V}) \times (1.6022 \times 10^{-19}\ \text{C}) = \mathbf{2.200 \times 10^{-19}}\ \text{J}$
  (或 $\mathbf{W} = 1.3724$ eV)
- 红限频率 $\nu_\mathbf{0} = -b/K = (1.3724\ \text{V})/(0.40440\ \text{V}/(10^{14}\ \text{Hz})) = \mathbf{3.3938 \times 10^{14}}\ \text{Hz}$

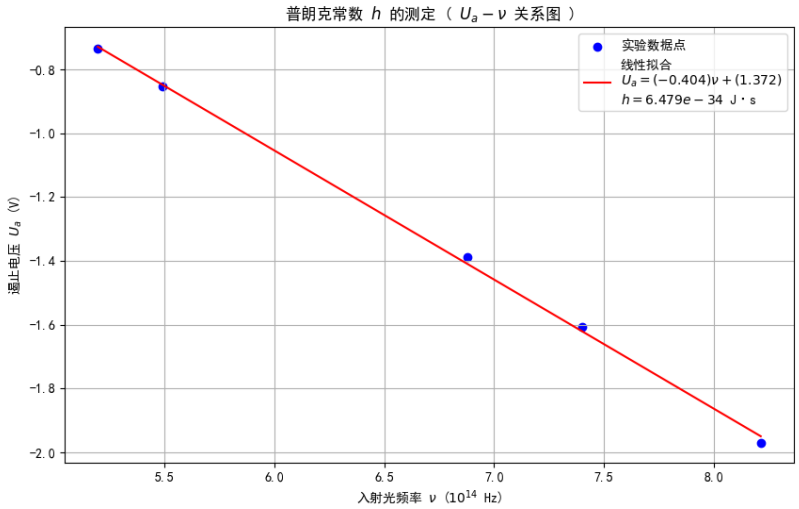


图 6: 普朗克常数 h 的测定 ($U_a - \nu$ 关系图)

2. 伏安特性曲线 使用 405nm 滤色片测得的光电流 i 随阳极电压 U 变化的数据如表 2 所示。

表 2: 伏安特性曲线数据 ($\lambda = 405$nm, $\Phi = 4$mm, $L = 40$cm)

电压 U (V)	0	1	2	3	4	5
电流 i (10^{-11} A)	17	37	62	92	120	135
电压 U (V)	6	7	8	9	10	11
电流 i (10^{-11} A)	145	155	169	183	197	210
电压 U (V)	12	13	14	15	16	18
电流 i (10^{-11} A)	216	225	235	243	250	269
电压 U (V)	20	22	24	26	28	30
电流 i (10^{-11} A)	286	302	317	330	340	345

数据处理： 绘制 $i - U$ 伏安特性曲线并进行平滑拟合，如图 7 所示。从拟合曲线中可以看出，光电流 i 随阳极电压 U 的增加而增大。在 $U > 20$V 后，曲线斜率逐渐减小，表明光电流开始趋于饱和。在 $U = 30$V 时，电流 $i = 345 \times 10^{-11}$A，已接近饱和电流。

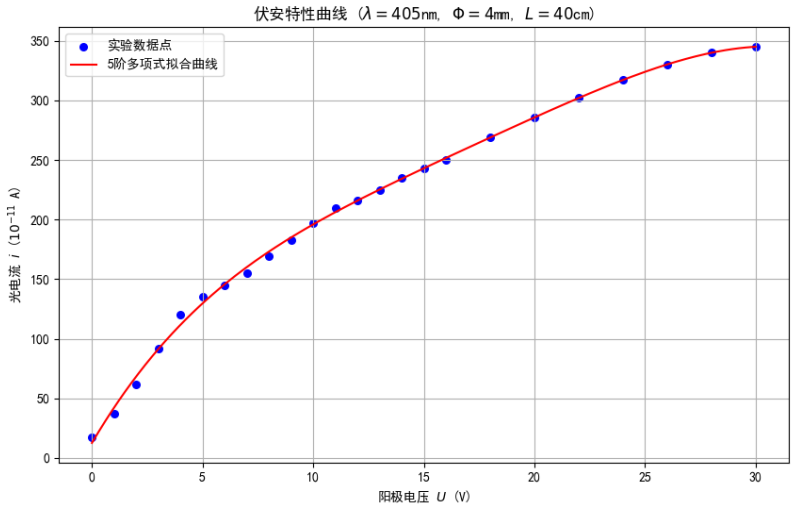


图 7: 伏安特性曲线 ($\lambda = 405$nm, $\Phi = 4$mm, $L = 40$cm)

3. 饱和电流 i_s 与光源距离 L 关系 在 $U = 30V$ (饱和区) 下测得的数据如表 3 所示。

表 3: 饱和电流与光源距离关系 ($\lambda = 405$nm, $\Phi = 4$mm, $U = 30$V)

距离 L (cm)	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
饱和电流 i_s (10^{-10} A)	70	62	58	54	50	47	44	41	38	34	33

数据处理： 光强 I 遵从平方反比定律，即 $I \propto 1/L^2$。理论上饱和电流 i_s 与光强 I 成正比，因此 $i_s \propto 1/L^2$。我们对 i_s 和 $1/L^2$ 进行线性拟合，如图 8 所示。根据 Python 脚本运行结果，拟合 $i_s = m(1/L^2) + c$：

- 斜率 $m = 73718.54$ (10^{-10} A $\cdot$ cm^2)
- 截距 $c = -13.42$ (10^{-10} A)

拟合结果显示 i_s 与 $1/L^2$ 具有良好的线性关系（R 值接近 1）。截距 $c = -13.42$ (10^{-10} A) 相对较小，理论上应为 0。这表明饱和电流 i_s 基本遵从平方反比定律。

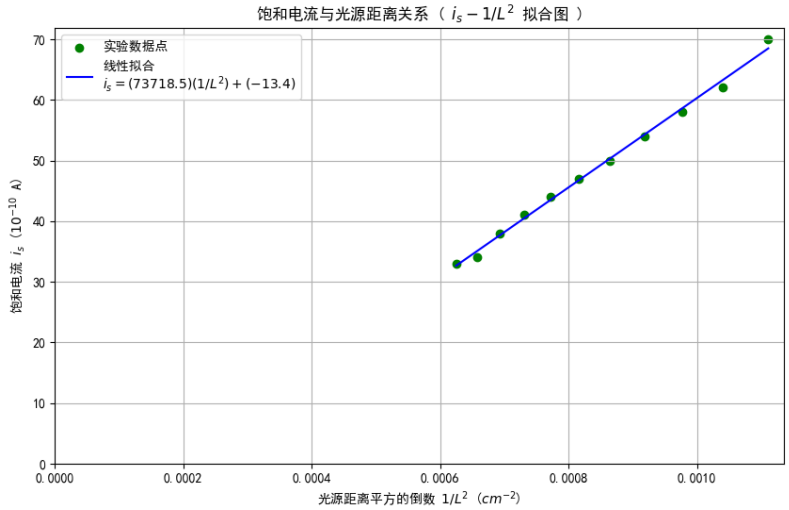


图 8: 饱和电流与光源距离关系 ($i_s - 1/L^2$ 拟合图)

4. 饱和电流 i_s 与光阑孔径 Φ 关系 在 $U = 30V$ (饱和区) 下测得的数据如表 4 所示。

表 4: 饱和电流与光阑孔径关系 ($\lambda = 405$nm, $L = 40$cm, $U = 30$V)

光阑孔径 Φ (mm)	2	4	8
饱和电流 i_s $(10^{-11}$ A)	88	319	1202

数据处理： 光强 I 应与光阑的通光面积 S 成正比，而 $S = \pi(\Phi/2)^2 \propto \Phi^2$。理论上饱和电流 i_s 与光强 I 成正比，因此 $i_s \propto \Phi^2$。我们对 i_s 和 Φ^2 进行线性拟合，如图 9 所示。根据 Python 脚本运行结果，拟合 $i_s = m(\Phi^2) + c$：

- 斜率 $m = 18.52$ $(10^{-11}$ A/mm$^2)$
- 截距 $c = 17.83$ $(10^{-11}$ A)

拟合结果显示 i_s 与 Φ^2 具有良好的线性关系。截距 $c = 17.83$ $(10^{-11}$ A) 相对较小（约为最小测量值 88 的 20%），理论上应为 0。这验证了饱和电流 i_s 基本与光阑面积成正比。

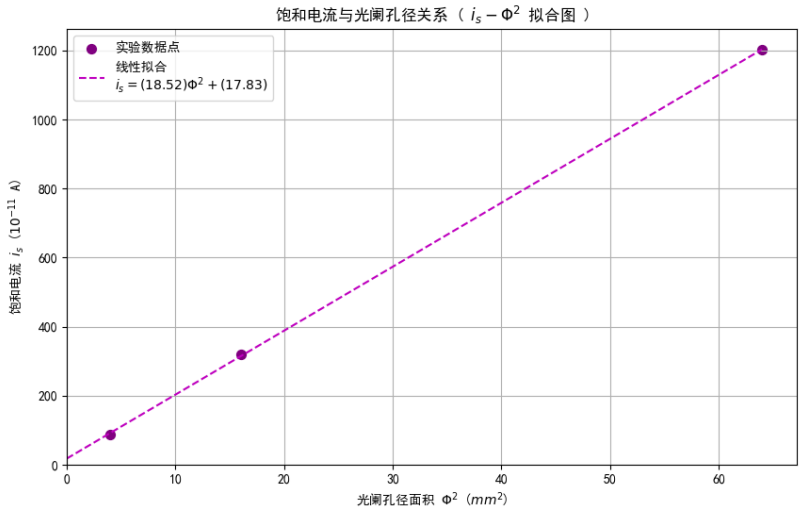


图 9: 饱和电流与光阑孔径关系 ($i_s - \Phi^2$ 拟合图)

2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

1. 普朗克常数 h 的误差计算

- **测量值：** $h = 6.4792 \times 10^{-34}$ J · s
- **公认值：** $h_0 = 6.6261 \times 10^{-34}$ J · s (CODATA 2018)
- **相对误差：** $E_r = \frac{|h-h_0|}{h_0} \times 100\%$

$$E_r = \frac{|6.4792 \times 10^{-34} - 6.6261 \times 10^{-34}|}{6.6261 \times 10^{-34}} \times 100\% = 2.22\% \tag{4}$$

实验测得的普朗克常数 $h = (6.48 \pm 0.15) \times 10^{-34}$ J · s，相对误差为 2.22%。

2. 伏安特性曲线的误差分析 此部分为定性观察，主要误差来源为饱和电流的判断。如图 7 所示，在 $U = 30$V 时，曲线斜率仍不为零（$k \approx (345 - 286)/(30 - 20) = 5.9(10^{-11}$ A/V)），表明电流尚未达到真正饱和。这会对抗扰动能力产生影响，但对趋势观察影响不大。

3. 饱和电流 i_s 与光源距离 L 关系的误差 理想模型为 $i_s = m(1/L^2)$，即截距 c 应为 0。

- **拟合截距：** $c = -13.42 \times 10^{-10}$ A
- **测量值范围：** i_s 的范围为 [33, 70] $(10^{-10}$ A)，最大值为 $i_{s,max} = 70 \times 10^{-10}$ A。
- **截距相对偏差：** $E_c = \frac{|c|}{i_{s,max}} \times 100\%$

$$E_c = \frac{|-13.42|}{70} \times 100\% \approx 19.2\% \tag{5}$$

截距偏差较大（19.2%），表明实验数据与理想的平方反比定律存在一定偏离。

4. 饱和电流 i_s 与光阑孔径 Φ 关系的误差 理想模型为 $i_s = m(\Phi^2)$，即截距 c 应为 0。

- **拟合截距：** $c = 17.83 \times 10^{-11}$ A
- **测量值范围：** i_s 的范围为 [88, 1202] (10^{-11} A)，最大值为 $i_{s,max} = 1202 \times 10^{-11}$ A。
- **截距相对偏差：** $E_c = \frac{|c|}{i_{s,max}} \times 100\%$

$$E_c = \frac{17.83}{1202} \times 100\% \approx 1.48\% \tag{6}$$

截距偏差非常小（1.48%），表明饱和电流 i_s 与光阑孔径面积 Φ^2 具有极好的线性关系。

误差原因分析： 根据上述计算，h 的测量存在 2.22% 的相对误差，而 $i_s - 1/L^2$ 关系的拟合截距偏差较大 (19.2%)。这些误差和偏差主要来源于以下几个方面：

- **系统误差（影响 h 的计算）：**
  (1) **滤色片波长偏差：**滤色片透过的光波长并非严格的单色光，其中心波长与标称值（365nm, 405nm 等）存在一定偏差。由于 h 的计算强依赖于频率 ν（即波长 λ），这是 h 测量值 2.22% 误差的主要来源。
  (2) **阳极光电流：**如预习报告中所述，阴极材料（低逸出功）可能污染阳极。当光照射时，阳极也会产生光电流，这会干扰“零电流法”对真实遏止电压 U_a 的判断，引入系统误差。
- **随机误差（影响所有测量）：**
  (1) **电流读数不稳定：**实验中，光电管输出的微电流计读数并不稳定，而是在一定范围内跳动。估读值带来了随机误差，尤其是在测量遏止电压（寻找零电流点）和饱和电流时。
  (2) **杂散光干扰：**尽管有遮光罩，但环境中的杂散光或汞灯自身非谱线的光（如 $i_s - 1/L^2$ 拟合截距不为零的部分原因）可能进入光电管，形成本底电流，造成误差。
- **仪器误差（影响 $i_s - 1/L^2$ 关系）：**
  (1) **距离测量不准：**在探究 i_s 与 L 关系时，距离 L 的测量精度较低，且 L 指的是光电管阴极到光源的距离，读数存在困难，这对 $1/L^2$ 这一非线性项的误差贡献尤为明显，是导致 19.2% 较大截距偏差的原因之一。

3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验成功验证了 U_a 与 ν 的线性关系，计算出 $h = 6.48 \times 10^{-34}$ J·s，相对误差 2.22%。同时，验证了饱和电流与光强成正比 ($i_s \propto 1/L^2$ 且 $i_s \propto \Phi^2$)。主要误差源于滤色片波长不准与电流读数不稳。

四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

1．测量普朗克常数的关键是什么？怎样根据光电管的特性曲线选择适宜的测定遏止电压 U_a 的方法。

测量普朗克常数的关键是准确测定 $U_a-\nu$ 关系直线的**斜率** $K=-h/e$。这要求精确测量多组 (ν,U_a) 数据。选择测量方法时需注意，实际 $I-U$ 曲线（如图 7）中存在暗电流和反向电流，导致 $I=0$ 的点并非真实 U_a。本实验采用的“零电流法”虽然简便，但存在系统误差。更精确的方法是“补偿法”（扣除本底电流）或“外推法”（对 $I-U$ 曲线的线性部分进行外推）。

2．从遏止电压 U_a 与入射光的频率 ν 的关系曲线中，你能确定阴极材料的逸出功吗？

能。根据拟合方程 $U_a=(-h/e)\nu+(W/e)$，直线的**纵轴截距** b 对应于 $\mathbf{W/e}$。因此，一旦通过线性拟合得到截距 b（单位 V），阴极材料的逸出功即为 $\mathbf{W=b\cdot e}$。在本实验中，我们测得 $b=1.3724$ V，因此确定逸出功 $\mathbf{W=1.3724}$ eV。

3．本实验存在哪些误差来源？实验中如何解决这些问题？

本实验存在的主要误差来源包括：(1) **系统误差**，如滤色片中心波长与标称值不符，以及阳极反向电流和暗电流对 U_a 测量的干扰；(2) **随机误差**，如微电流计读数跳动和环境杂散光干扰；(3) **仪器误差**，如光源距离 L 的测量不准。

为解决这些问题，可采取的措施有：使用**单色仪**替代滤色片以提高波长准确性；采用**补偿电路**或**锁相放大器**技术，以消除暗电流和杂散光干扰；使用更高精度的静电计并确保电路良好屏蔽。

注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名 + 学号 + 实验名称 + 周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制