

第3章

综合物理实验

在序言中已经提到,物理学和物理实验的发展是人类科学技术发展的基础.物理学本身已经发展了若干分支学科,这些学科既独立又交叉,而且物理学科与其他学科也都有交叉,这些交叉越来越多,越来越紧密,因而综合与近代物理实验也成为物理实验课程的重要组成部分.这部分实验原理、内容、方法、仪器和技术,都涉及两个甚至多个学科,综合性强、知识面广、仪器先进.这些实验原理和方法的应用领域非常广泛,学生通过这部分的学习,应熟悉和掌握有关的实验方法、综合性的技术,进一步提高运用物理学知识分析、解决问题的能力,培养创新能力.

实验 3.1 光电效应及普朗克常量的测定

当光束射到某些金属表面上时,会有电子从金属表面逸出,这种现象称为“光电效应”.1887年赫兹(H.Hertz)在验证电磁波存在时意外发现了光电效应现象,它所反映的实验事实是经典电磁理论无法完满解释的.1905年爱因斯坦(A.Einstein)把普朗克(M. Planck)提出的辐射能量不连续的观点引入光辐射,提出了光量子的概念,成功地解释了光电效应现象.普朗克常量 h 是一个非常重要的物理常量,它是微观世界规律的标志量,19世纪末普朗克为解决黑体辐射问题发现了此常量.1916年密立根(R.Millikan)以精确的光电效应实验证实了爱因斯坦光电效应方程的正确性,并精确测定了普朗克常量.爱因斯坦和密立根因光电效应等方面的杰出贡献分别于1921年和1923年获诺贝尔物理学奖.

光电效应是近代物理学的基础实验之一,在量子理论的发展史上,它有着特殊的意义.对光电效应现象的研究,使人们进一步认识到光的波粒二象性的本质,促进了光的量子理论的建立和近代物理学的发展.近30年来,光电效应已经被广泛地应用于工农业生产、科研和国防等各领域,特别是根据光电效应制成的各种光电器件在现代技术中(如光学信号、夜视器材、电视、有声电影、自动控制与自动计量等方面)有着广泛的应用,光电功能材料也越来越受人们的青睐.

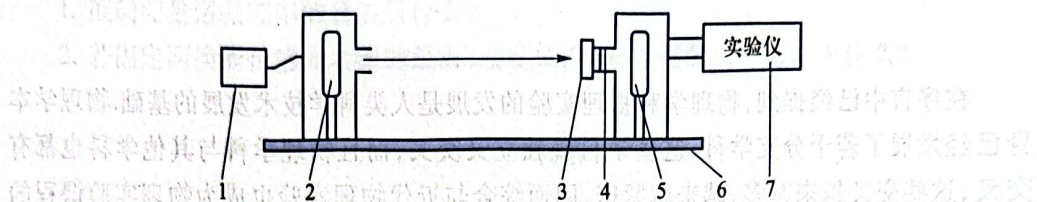
一、实验目的

1. 了解光电效应的基本规律,加深对光量子论的认识和理解;
2. 了解光电管的结构和性能,并测定其基本特性曲线;
3. 验证爱因斯坦光电效应方程,测定普朗克常量;

4. 学习用作图法和线性拟合法处理数据.

二、实验仪器

ZKY-GD-3 光电效应实验仪.仪器由汞灯及电源、滤色片、光阑、光电管、测试仪(含光电管电源和微电流放大器)构成.仪器结构如图 3-1 所示.



1、2—电源及汞灯:可用谱线 365.0 nm, 404.7 nm, 435.8 nm, 546.1 nm, 577.0 nm, 579 nm;

3—滤色片:5 片,透射波长 365.0 nm, 404.7 nm, 435.8 nm, 546.1 nm, 577.0 nm;

4—光阑:3 片,直径 2 mm, 4 mm, 8 mm;

5—光电管:光谱响应范围 320~700 nm,暗电流 $I \leq 2 \times 10^{-12}$ A ($-2 \text{ V} \leq U_{AK} \leq 0 \text{ V}$);

6—底座、光电管电源:2 挡, $-2 \sim +2 \text{ V}$, $-2 \sim +30 \text{ V}$,三位半数显,稳定度 $\leq 0.1\%$;

7—微电流放大器:6 挡, $10^{-8} \sim 10^{-3}$ A,分辨率 10^{-14} A,三位半数显,稳定度 $\leq 0.2\%$.

图 3-1 仪器结构示意图

三、实验原理

1. 光电效应及其规律

在一定频率的光的照射下,电子从金属(或金属化合物)表面逸出的现象称为光电效应,所逸出的电子称为光电子.研究光电效应的实验装置电路图如图 3-2 所示.在一抽成高真空的容器内装有阴极 K 和阳极 A,阴极 K 为金属板.当单色光通过石英窗口照射到金属板 K 上时,金属板便释放出光电子.如果在 A、K 两端加上电势差 U ,则光电子在加速电场作用下飞向阳极,形成回路中的光电流.光电流的强弱由微电流测试仪 G 读出.实验结果表明光电效应有如下规律:

(1) 只有当入射光频率大于某一定值时,才会有光电子产生,若光的频率低于这个值,则无论光强度多大,照射时间多长,都不会有光电子产生.即光电效应存在一个频率阈值 ν_0 ,称为截止频率.

(2) 光电子的多少与光的强度有关,即饱和光电流 I_H 与入射光的光强成正比.如图 3-3 所示, $I-U$ 曲线称为光电管伏安特性曲线.

(3) 光电子的动能 $\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ 与入射光的频率 ν 成正比,与光强无关.实验中反映初动能大小的是截止电势差 U_c .如果降低加速电势差的量值,光电流 I 也随之减小.当电势差 U 减小到零并逐渐变负时 ($U = U_A - U_K$ 为负值,即 A、K 间加反向电压),光电流 I 一般并不等于零,这表明从金属板 K 逸出的电子具有初动能,尽管有电场阻碍它运动,仍有部分电子能到达阳极 A,反向电势差绝对值越大,光电流越小.当反向电势差达到某一值时,光电

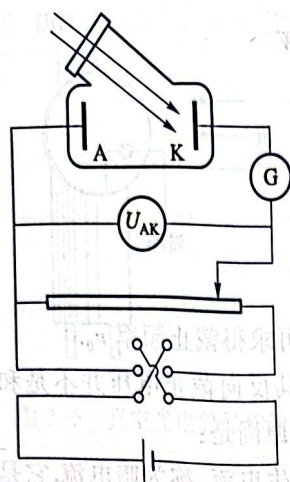


图 3-2 仪器结构示意图

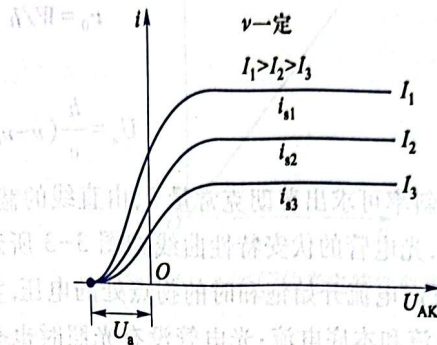


图 3-3 光电管伏安特性曲线

流便降为零.此时电势差的绝对值 U_A 叫做截止电压.截止电压的存在,表明光电子从金属表面逸出时的初速有最大值 v_m ,也就是光电子的初动能具有一定的限度,它等于

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = eU_A \quad (3.1.1)$$

式中, e 和 m 为电子的电荷量和质量.以不同频率 ν 的光照射时, $U_A - \nu$ 关系曲线为一直线,如图 3-4 所示.

(4) 光电效应是瞬时效应,一经光线照射,立刻产生光电子.

光电子效应的这些实验规律,用经典的电磁波理论是无法解释的.

2. 光子理论,爱因斯坦光电效应方程

1905 年爱因斯坦依照普朗克的量子假设,提出了光子的概念.他认为光是一种微粒——光子;频率为 ν 的光子具有能量 $\varepsilon = h\nu$, h 为普朗克常量.根据这一理论,当金属中的电子吸收一个频率为 ν 的光子时,便获得这光子的全部能量 $h\nu$,如果这能量大于电子摆脱金属表面的约束所需要的逸出功 W ,电子就会从金属中逸出.按照能量守恒原理有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + W \quad (3.1.2)$$

上式称为爱因斯坦光电效应方程,其中 m 和 v_m 是光电子的质量和最大速度; $\frac{1}{2}mv_m^2$ 是光电子逸出表面后所具有的最大动能.它说明光子能量 $h\nu$ 小于 W 时,电子不能逸出金属表面,因而没有光电效应产生;产生光电效应的入射光最低频率 $\nu_0 = W/h$,称为光电效应的截止频率(又称红限).不同的金属材料有不同的逸出功,因而 ν_0 也是不同的.

实验时,测出不同频率的光入射时的截止电势差 U_A 后,作 $U_A - \nu$ 曲线, U_A 与 ν 成线性关系

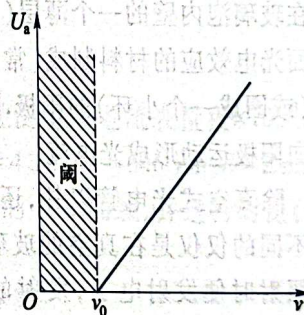


图 3-4 截止电压与入射光频率的关系图线

$$eU_a = \frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - W$$

而由

$$\nu_0 = W/h$$

即得

$$U_a = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0) \quad (3.1.3)$$

从直线斜率可求出普朗克常量 h , 由直线的截距可求得截止频率 ν_0 .

实际上, 光电管的伏安特性曲线如图 3-3 所示, 其反向截止电压并不是和横轴的交点, 而是在反向电流开始饱和时的拐点处的电压. 主要原因是:

① 暗电流和本底电流: 光电管没有光照时也会产生电流, 称为暗电流. 它是由热电子发射、漏电等原因造成的. 本底电流是由于各种漫射光入射到光电管上引起的. 这两种都不可能使电流降为零, 而且其大小随着电压的变化而变化.

② 反向电流: 在光电管的制造过程中, 阳极也往往被污染而沾上光电子材料, 所以光照射到阳极上时也有光电子发射.

3. 光电管

光电管是利用光电效应制成的能将光信号转化为电信号的光电器件. 在一个真空的玻璃泡内装有两个电极, 一个是阳极 A, 另一个是光阴极 K, 如图 3-5 所示. 光阴极是附在玻璃泡内壁的一个薄层(有的附在玻璃泡内的半圆形金属片的内侧), 此薄层由具有表面光电效应的材料制成(常用铯铷金属化合物). 在阴极的前面, 装有金属丝制成的单根(或圈成一个小环)的阳极. 阴极受到光线照射的时候便发射电子, 电子在外场的作用下向阳极运动形成光电流.

除真空式光电管以外, 还有一种充气式的光电管. 它的构造和真空式的完全相同, 所不同的仅仅是在真空的玻璃泡内充入少量的惰性气体, 如氩气等. 当光阴极被光线照射时便发射电子, 发射的电子在趋向阳极的途中撞击惰性气体的分子, 使气体游离成正离子、负离子以及电子. 撞击出的负离子、电子以及阴极发射的电子共同被阳极吸收, 因此阳极的总电流便增大了, 故充气式光电管比真空式光电管有更高的灵敏度.

(1) 光电管的伏安特性

当以一定频率和强度的光照射光电管时, 光电流随两极间电压变化的特性称为光电管的伏安特性, 其曲线如图 3-3 所示. 图中光电流随阳极电压的增加而增大, 但当阳极电压增大到某一值后, 光电流不再增加, 此时的光电流叫做饱和光电流 I_h , 饱和光电流相当于所有被激发出来的电子全部到达阳极. 实验表明, 饱和光电流和入射光的光通量成正比, 因此用不同强度的光照射阴极 K 时, 可得到不同的伏安特性曲线.

(2) 光电管的光电特性

当照射光电管的光的频率和两极间电压一定时, 饱和光电流 I_h 随照射光强度 E 变化的特性称为光电管的光电特性, 而照射光的强度与光阑孔径的平方成正比. 对于真空式光电管, 其曲线呈线性关系, 如图 3-6 所示.

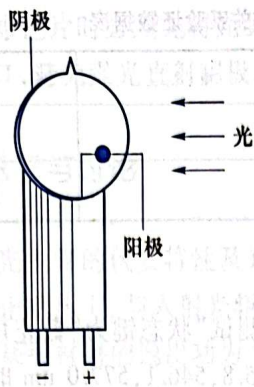


图 3-5 真空光电管结构简图

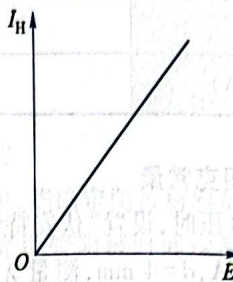


图 3-6 光电管的光电特性曲线

四、实验内容及步骤

1. 实验准备

将测试仪与汞灯电源接通,预热 10 分钟。

把汞灯及光电管暗盒遮光盖盖上,将汞灯暗盒光输出口对准光电管暗盒光输入口,调整光电管与汞灯的距离为约 30 cm,并保持不变。

将“电流量程”选择开关置于所选挡位,仪器在充分预热后,进行测试前调零,旋转“调零”旋钮使电流指示为 000.0。

2. 测量光电管的伏安特性

设置“伏安特性测量/截止电压测试”状态键为“伏安特性测量”,电流表量程 $\times 10^{-10}$ A,分别测量下述两个条件下光电管的 $I-U$ 特性;光阑直径 $d=4$ mm, $\lambda=546$ nm; $d=2$ mm, $\lambda=546$ nm. 电压范围: $-2 \sim 30$ V,在同一坐标系中做两条相应的 $I-U$ 曲线,并进行对比(表 3-1-1)。

表 3-1-1 伏安特性曲线测量数据记录表

光阑 $d =$ _____ mm												
U_{AK}/V	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0	6.0	8.0
$I/(10^{-11} A)$												
U_{AK}/V	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0	32.0
$I/(10^{-11} A)$												

3. 测量光电管的光电特性

电流表量程 $\times 10^{-11}$ A, $\lambda=577$ nm, $U_a=25$ V. 测量 $d=2$ mm, 4 mm, 8 mm 时的 I_H (表 3-1-2), 作 I_H-d^2 图线。

表 3-1-2 饱和光电流与光强之间的关系验证数据表

光阑孔 d/mm	2	4	8
d^2			
$I_{\text{H}}/(10^{-11} \text{ A})$			

4. 测量普朗克常量

测量截止电压时,设置“伏安特性测量/截止电压测试”状态键为“截止电压测试”,电流表量程 $\times 10^{-13} \text{ A}$, $d=4 \text{ mm}$,测量 $\lambda=365.0, 404.7, 435.8, 546.1, 577.0 \text{ nm}$ 时的截止电压 U_{c} ,测量时在 $-2 \sim +2 \text{ V}$ 调节电压,记录使光电流 $I=0$ 的电压即 U_{c} ,作 $|U_{\text{c}}|-\nu$ 图线,并求 h (表 3-1-3)。

表 3-1-3 普朗克常量测量数据记录表

光阑 $d=$ _____ mm

波长 λ/nm	365.0	404.7	435.8	546.1	577.0
频率 $f/(10^{14} \text{ Hz})$					
截止电压 U_{c}/V					

注意:由于本仪器的特点,在测量各谱线的截止电压 U_{c} 时,用“零电流法”测量.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_{c} .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 ΔU_{c} , $U_{\text{c}}-\nu$ 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.

五、数据记录与处理

1. 用作图法作出光电管的伏安特性曲线,在同一幅图中作出两条不同光照强度下的伏安特性曲线.

2. 用作图法作出饱和光电流 I_{H} 随光强变化的光电特性图线(即 $I_{\text{H}}-d^2$ 图).

3. 在坐标纸上作出截止电压随照射光频率变化的图线.求出直线的斜率 K ,由直线斜率与普朗克常量的关系 $K=\frac{h}{e}$,求出普朗克常量 h ,并与公认值比较,计算相对百分误差.式中 $e=1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $h_0=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

六、注意事项

1. 本实验不要求暗室环境,但应避免背景光强的剧烈变化.
2. 滤色片是精密光学元件,使用时应避免污染,切勿用手触摸以保证其良好的透光性.
3. 光阑和滤色片都放置在小孔一侧.

4. 更换滤色片时必须先将光源出光孔遮住,实验完毕应及时用遮光罩盖住光电管暗盒的进光窗口,避免强光直射阴极。

七、思考与讨论

1. 了解光电管的伏安特性及光电特性有何意义?
2. 从截止电压 U_a 与入射光频率 ν 的关系曲线中,能确定阴极材料的逸出功吗?
3. 如果某种材料的逸出功为 2.0 eV,用它做成光电管阴极时能探测的波长红限(截止波长)是多少?
4. 实验中光电管伏安特性曲线饱和区并非理想直线而是稍有增大的原因是什么?
5. 光电管截止电压与光源强度及频率有何关系,实验上如何得到?
6. 光电管阴极和阳极金属材料逸出功的选择及电极设计特点。

实验 3.2 霍尔效应及螺线管磁场的测定

霍尔效应是一种磁电效应,是 1879 年年仅 24 岁的霍尔在美国霍普金斯大学做研究生时发现的。霍尔在研究载流导体在磁场中受力的性质时发现:当电流垂直于外磁场方向流过导体时,在垂直于电流和磁场方向的导体两面产生一横向电势差,这种现象被称为霍尔效应,所产生的电势差被称为霍尔电势。半个多世纪后,人们发现半导体材料也有霍尔效应,而且比导体材料效果更加明显。在霍尔效应发现约 100 年后,德国科学家冯·克利青发现了整数量子霍尔效应,并因此获得 1985 年诺贝尔物理学奖。其后美籍华裔物理学家崔琦等在更强磁场下研究量子霍尔效应时发现了分数量子霍尔效应,获得了 1998 年诺贝尔物理学奖。本实验只研究经典霍尔效应。

利用霍尔效应制成的霍尔元件可以测量载流子浓度、磁场强度、电流强度、微小位移等物理量。霍尔元件具有高灵敏度、微型化、高集成度、抗干扰能力强等优点。现在人们在利用霍尔效应开发的各种传感器,如磁罗盘、磁头、电流传感器、非接触开关、接近开关、位置、角度、速度、加速度传感器、压力变送器、无刷直流电机以及各种函数发生器、运算器,等等,已广泛应用于工业自动化技术、检测技术和信息处理等各个方面。霍尔效应也是磁流体发电的理论基础。

霍尔效应的发现,当时看似没有什么用处,却在现代技术的革新中展示出巨大的应用价值;由霍尔效应引发的深入研究,屡获世界科技大奖,相信在未来会有更广阔的应用前景。这种通过抓住实验细节,深入研究下去,产生举一反三效果的物理创新历史,值得学习。

一、实验目的

1. 加深理解霍尔效应的原理;
2. 验证霍尔电势与霍尔控制电流的线性关系;
3. 验证霍尔电势与励磁电流的线性关系;