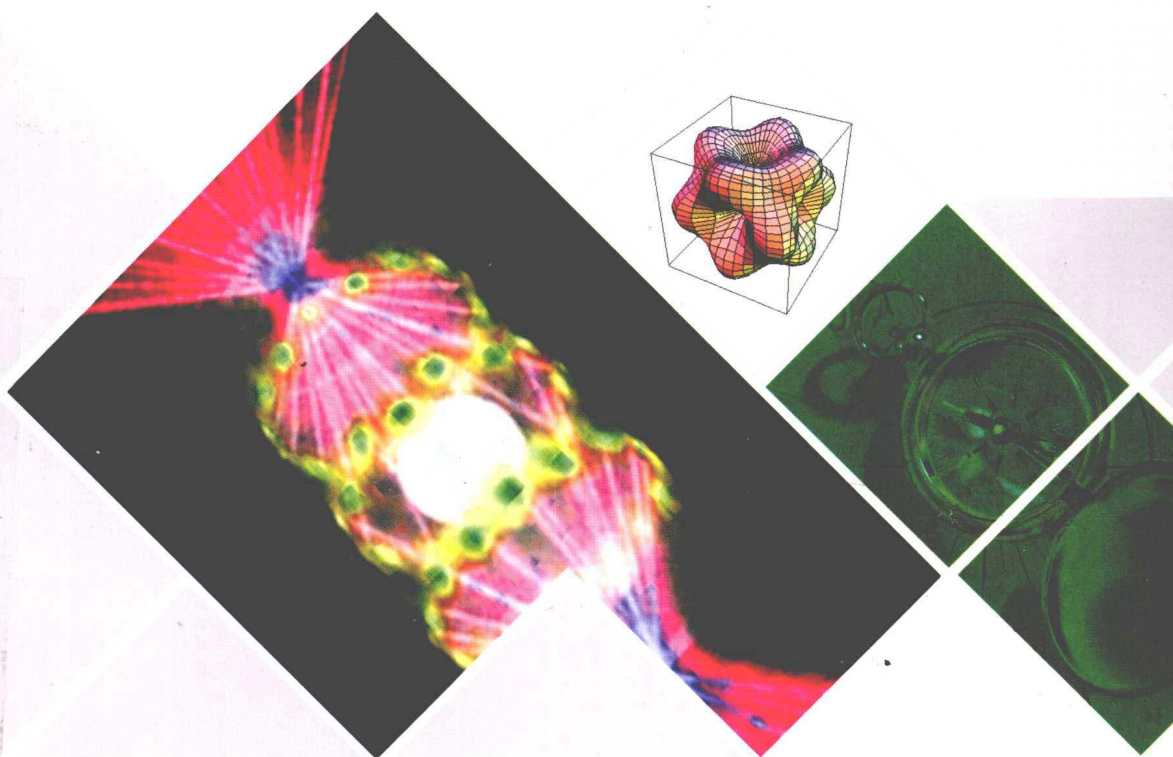




高等教育“十一五”规划教材
公共基础课教材系列

新编物理实验教程 (下册)

叶有祥 主 编



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书内容涵盖物理实验基本知识、物理实验基本训练、物理实验基本技术、近代及综合实验、设计性实验、研究性教学拓展实验。将分散在各实验中的基本物理实验知识、基本物理实验方法、基本物理实验技能进行归纳总结,并在撰稿过程中着重系统化。

本书可作为理工科物理类及非物理类各专业物理实验课程的教材或参考书,上册可为专科院校、函授、职大及夜大学生教学参考书,下册可为物理专业近代物理实验课程的教学参考书,也可供其他专业和社会学者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

新编物理实验教程(下册)/叶有祥主编. —北京:科学出版社,2009
(高等教育“十一五”规划教材·公共基础课教材系列)
ISBN 978-7-03-025190-9

I. 新… II. 叶… III. 物理学-实验-高等学校-教材 IV. O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 138960 号

责任编辑:沈力匀 / 责任校对:柏连海 王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2009 年 9 月第 1 版 开本:787×1092 16

2010 年 3 月第二次印刷 印张:19 1/4

印数:4 001—5 500 字数:451 000

定价:30.00 元(上下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换《海生》)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135235(HP04)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

目 录

(下册)

第 4 章 近代综合实验	149
4.1 夫兰克-赫兹实验	149
4.2 光电效应测定普朗克常数	154
4.3 密立根油滴 CCD 微机系统电子电荷的测定	158
4.4 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线	166
4.5 氢原子光谱的测定	171
4.6 光拍法测量光速实验	175
4.7 核磁共振	181
4.8 电子顺磁共振	186
4.9 塞曼效应	192
4.10 法拉第效应	200
4.11 超声光栅测量声速	204
4.12 音频信号光纤传输技术实验	209
4.13 X 射线衍射实验	213
4.14 激光双光栅法测微小位移	218
4.15 高真空的获得与测量	223
第 5 章 设计性实验	229
5.1 设计性实验的性质与任务	229
5.2 处理系统误差的一般知识	230
5.3 实验方案的选择和实验仪器的配套	235
5.4 设计实验题目	242
第 6 章 研究性教学拓展实验	248
6.1 非线性电路振荡周期的分岔与混沌实验	248
6.2 磁阻效应的研究	252
6.3 巨磁阻传感器的应用	255
6.4 椭圆偏振光法测量薄膜厚度和折射率	259

6.5 溅射薄膜的制作与膜厚的测量	270
6.6 用电离法探测 X 射线实验	275
6.7 表面磁光克尔效应实验	277
附录	286
主要参考文献	293

第4章 近代综合实验

4.1 夫兰克-赫兹实验

1913年,丹麦物理学家玻尔(N. Bohr)提出了一个氢原子模型,并指出原子存在能级。该模型在预言氢光谱的观察中取得了显著的成功。根据玻尔的原子理论,原子光谱中的每根谱线表示原子从某一个较高能态向另一个较低能态跃迁时的辐射。

1914年,德国物理学家夫兰克(J. Franck)和赫兹(G. Hertz)用慢电子(几个到几十个电子伏特)与稀薄气体原子碰撞的办法,使原子从低能级激发到高能级。通过测量电子与原子碰撞时交换某一定值的能量,直接证明了原子发生跃变时吸收和发射的能量是分立的、不连续的,证明了原子能级的存在,给玻尔的原子理论提供了直接的实验证据。由此获得了1925年诺贝尔物理学奖。

【实验目的】

- (1) 通过测定氩原子的第一激发电位,证明原子能级的存在。
- (2) 了解电子与原子碰撞和能量交换过程的微观图像及影响该过程的主要物理因素。

【实验仪器】

DH4507 智能型夫兰克-赫兹实验仪。

【实验原理】

玻尔提出的原子理论指出:

(1) 原子只能较长时间地停留在一些稳定状态(简称为定态)。原子在这些状态时,不发射或吸收能量:各定态有一定的能量,其数值是彼此分隔的。原子的能量不论通过什么方式发生改变,它只能从一个定态跃迁到另一个定态。

(2) 原子从一个定态跃迁到另一个定态而发射或吸收辐射时,辐射频率是一定的。如果用 E_m 和 E_n 分别代表有关两定态的能量的话,辐射的频率 ν 决定于如下关系:

$$h\nu = E_m - E_n \quad (4.1)$$

式中 h ——普朗克常数为 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

为了使原子从低能级向高能级跃迁,可以通过具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换的办法来实现。

设初速度为零的电子在电位差为 U_0 的加速电场作用下,获得能量 eU_0 。当具有这种能量的电子与稀薄气体的原子发生碰撞时,就会发生能量交换。如以 E_1 代表氩原子的基态能量、 E_2 代表氩原子的第一激发态能量,那么当氩原子吸收从电子传递来的能量恰好为

$$eU_0 = E_2 - E_1 \quad (4.2)$$

时,氩原子就会从基态跃迁到第一激发态。而且相应的电位差称为氩的第一激发电位

(或称氩的中肯电位)。测定出这个电位差 U_0 ，就可以根据式 (4.2) 求出氩原子的基态和第一激发态之间的能量差了。夫兰克-赫兹实验的原理图如图 4.1 所示。

在充氩的夫兰克-赫兹管中，电子由热阴极 K 和第二栅极 G_2 之间的加速电压 U_{G_2K} 使电子加速。在板极 A 和第二栅极 G_2 之间加有反向拒斥电压 U_{G_2A} 。管内空间电位分布如图 4.2 所示。当电子通过 KG_2 空间进入 G_2A 空间时，如果有较大的能量 ($\geq eU_{G_2A}$)，就能冲过反向拒斥电场而到达板极形成板流，由微电流表检测出。如果电子在 KG_2 空间与氩原子碰撞，把自己一部分能量传给氩原子而使后者激发的话，电子本身所剩余的能量就很小，以致通过第二栅极后已不足以克服拒斥电场而被折回到第二栅极，这时，通过微电流表的电流将显著减小。

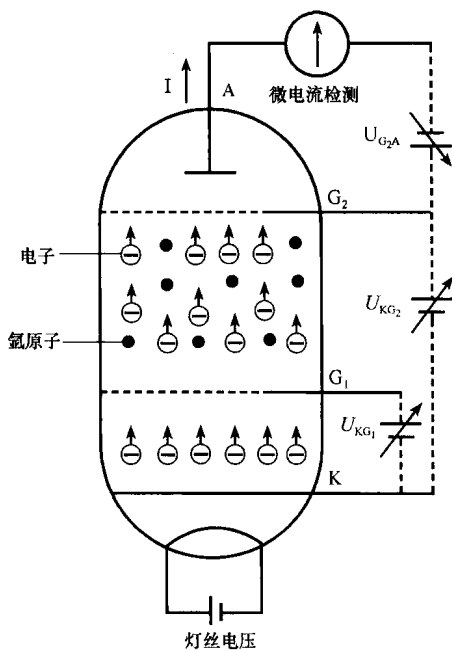


图 4.1 夫兰克-赫兹原理图

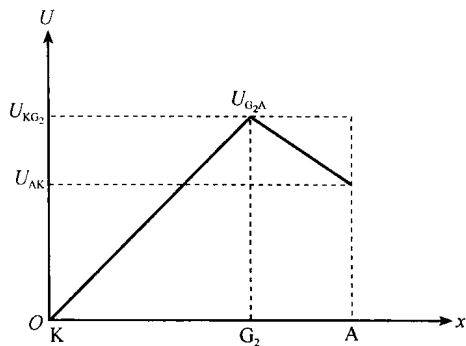


图 4.2 夫兰克-赫兹管管内空间电位分布

实验时，使 U_{G_2K} 电压逐渐增加并仔细观察微电流表的电流指示，如果原子能级确实存在，而且基态和第一激发态之间存在确定的能量差的话，就能观察到如图 4.3 所示的 $I_A-U_{G_2K}$ 曲线。该曲线反映了氩原子在 KG_2 空间与电子进行能量交换的情况。当 KG_2 空间电压逐渐增加时，电子在 KG_2 空间被加速而取得越来越大的能量。但起始阶段，由于电压较低，电子的能量较少，即使在运动过程中它与原子相碰撞也只有微小的能量交换（为弹性碰撞）。穿过第二栅极的电子所形成的板流 I_A 将随第二栅极电压 U_{KG_2} 的增加而增大（如图 4.3 的 Oa 段）。当 KG_2 间的电压达到氩原子的第一激发电位 U_0 时，电子在第二栅极附近与氩原子相碰撞，将自己从加速电场中获得的全部能量交给氩原子，并且使氩原子从基态激发到第一激发态。而电子本身由于把全部能量交给了氩原子，即使穿过了第二栅极也不能克服反向拒斥电场而被折回第二栅极（被筛选掉）。所以板极电流将显著减小（图 4.3 所示 ab 段）。随着第二栅极电压的增加，电子的能量也随之增加，在与氩原子相碰撞后还留下足够的能量，可以克服反向拒斥电场而达到板极 A，这时电流又开始上升（ bc

段)。直到 KG_2 间电压是 2 倍氩原子的第一激发电位时, 电子在 KG_2 间又会二次碰撞而失去能量, 因而又会造成第二次板极电流的下降 (cd 段), 同理, 凡在

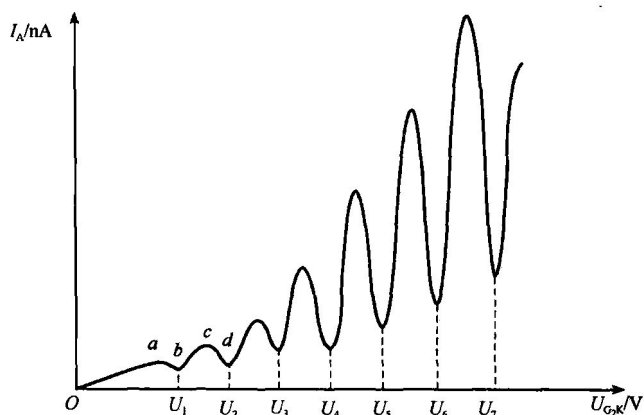


图 4.3 弗兰克-赫兹管 $I_A-U_{KG_2}$ 曲线

$$U_{G_2K} = nU_0 \quad (n=1, 2, 3\cdots) \quad (4.3)$$

的地方板极电流 I_A 都会相应下跌, 形成规则起伏变化的 $I_A-U_{KG_2}$ 曲线。而各次板极电流 I_A 下降相对应的阴、栅极电压差 $U_{n+1}-U_n$ 应该是氩原子的第一激发电位 U_0 。

本实验就是要通过实际测量来证实原子能级的存在, 并测出氩原子的第一激发电位 (公认值为 $U_0=11.55V$)。

【仪器简介】

DH4507 智能型弗兰克-赫兹实验仪 (图 4.4), 由四组程控直流稳压电源、微电流检测器和单片机控制器组成。有手动和自动两种工作方式。该实验仪可手动逐点测绘出爬坡曲线, 也可在慢速自动扫描的情况下, 只记下各点的电流值, 从而画出爬坡曲线; 也可在普通示波器上观察爬坡曲线, 实时观察到爬坡曲线的形成过程。

在实验时, 本实验仪应与专配的装有充氩电子管的测试架相连, 此外, 还可与一普通示波器相连, 充氩电子管不需外部加温便可进行测试。在“自动”方式下, 在普通示波器荧光屏上可实时观察到爬坡曲线的形成过程, 随着自动扫描的第二栅压的增加, 荧光屏上慢慢的画出有六个峰值的爬坡曲线, 在自动扫描完毕后, 该爬坡曲线仍能稳定的显示出来, 直到在“手动”方式下按下“清除”键 (“set” 键 + “自动/手动” 键) 为止。

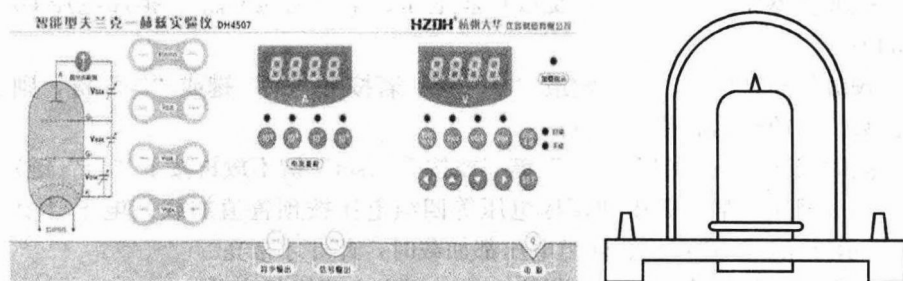


图 4.4 仪器的面板图及测试架平面图

1. DH4507 智能型夫兰克-赫兹实验仪按键功能

“自动/手动”键：自动/手动转换。

“ 10^{-9} ”、“ 10^{-8} ”、“ 10^{-7} ”和“ 10^{-6} ”：电流量程转换。

“灯丝电压”、“ U_{KG_1} ”、“ U_{G_2A} ”、“ U_{KG_2} ”：四组电压显示转换。

“set”+“灯丝电压”：灯丝电压加载。

“set”+“ U_{KG_1} ”：第一栅压加载。

“set”+“ U_{G_2A} ”：拒斥电压加载。

“set”+“>”：四组电压全部加载。

“set”+“<”：四组电压全部卸载（清零）。

“set”+“V”：若显示的爬坡曲线幅度过大，出现折叠，可在手动操作下按此组合键一到二次，按第三次则还原。

“set”+“自动/手动”：清除爬坡曲线。

“set”+“ 10^{-6} ”：第二栅压自动扫描时改变扫描速率。

“ $\wedge$ ”、“V”：电压上下调整，加载后才有效。

“<”、“>”：电压调整时左右移位。

2. 仪器出厂时预置值

灯丝电压：3.0V，第一栅压：2.1V，拒斥电压 U_{G_2A} ：5.2V，第二栅压：30V。实际操作时，应按照仪器铭牌标示值进行修改。

【实验内容与步骤】

1. 手动方式实验步骤

(1) 将面板上的四对插座按面板上的接线图与电子管测试架上的相应插座用专用连接线连好。注意：各对插线应一一对号入座，切不可插错！否则会损坏电子管或仪器。将“信号输出”及“同步输出”与示波器相连。或只将“信号输出”与示波器相连，使用示波器的内同步。微电流检测器已在内部连好。

(2) “自动/手动”挡开机时位于“手动”位置，此时“手动”灯点亮。

(3) 四档电流档： 10^{-9} A、 10^{-8} A、 10^{-7} A和 10^{-6} A开机时位于“ 10^{-9} A”位置。

(4) 按照仪器铭牌的标示值，更改灯丝电压、第一栅压 U_{KG_1} 、拒斥电压 U_{G_2A} 、第二栅压的值。

更改预置值时，按下“ $\wedge$ ”键或“V”键。若按下“<”键或“>”键，则更改预置值的位数，向前或向后移动一位。

(5) 同时按下“set”键和“>”键（或按下“set”键不放再按下“>”键），则灯丝电压，第一栅压，第二栅压和拒斥电压等四组电压按预置值加载到电子管上，此时“加载”指示灯亮。注意：只有四组电压都加载时，此灯才常亮。

(6) 四组电压都加载后，一般预热 10min 以上方可进行实验。

(7) 手动方式实验时，一般应保持灯丝电压，第一栅压和拒斥电压不变，而第二栅压从

0 开始 (若原先不为 0V, 需先调到 0V), 变到 85V, 步距为 0.2V 到 1V。预置一个第二栅压值 (自动加载), 记录电流值 I_A 及相应的电压值 $U_{K_{G_2}}$ (每 1V 记录 1 个点)。

手动方式下的实验可以在自动方式下进行:

在自动方式下, 将自动扫描速度设为“低”(或“中”), 这时每扫描一个电压值, 有足够时间记录下电流值 (电压值不用记), 这样使手动方式操作变得很简单。

(8) 实验完毕后, 可按“set”键+“<”键, 使四组电压卸载。

2. 自动方式实验步骤

(1) 按手动方式把实验连线连好, 按“set”键+“>”键, 使四组电压加载, 此时加载灯亮。

(2) 加载 10min 以后, 按下“自动/手动”键, 此时“自动”灯点亮。

(3) 此时第二栅压值开始从 0~85V 自动扫描, 共 512 个步进值, 每一伏有六个步进值, 一个步进值为 0.166V (显示时的十位和个位按原值显示, 而小数点后一位的六个步进值显示为 0.0、0.2、0.3、0.5、0.7 和 0.8), 自动扫描时, 电流表的读数应不断变化。

(4) 调整示波器的幅度及扫描旋钮, 使其波形稳定。在第二栅压自动扫描时, 可在示波器上观察到实时生成的六个峰, 在自动扫描完成后, 这六个峰仍稳定地显示在屏幕上, 若要清除这六个峰, 可在手动方式下按“set”键+“自动/手动”键。

(5) 在自动扫描时, 可按“set”键+“ 10^{-6} ”键, 以改变扫描的速度。扫描的速度共分为三档: 低、中、高。开机缺省设置为高。

(6) 若要进行一次自动扫描, 可按“自动/手动”键, 转到手动方式, 再按“set”键+“自动/手动”键, 清除上次扫描得到的数据, 再按“自动/手动”键转到自动扫描。

(7) 在 $I_A-U_{K_{G_2}}$ 曲线上, 求出各峰值所对应的电压值, 用逐差法求出氩原子的第一激发电位, 并与公认值 11.55V 相比较, 求出相对不确定度。

(8) 实验完毕后可按“set”键+“≤”键, 使四组电压卸载。

【注意事项】

(1) 使用前应正确连接好仪器面板至测试架的连线, 连好后至少检查三遍。连线错误会损坏仪器或电子管。

(2) 灯丝电压不要超过 4.5V。第二栅压不要超过 86V。

(3) 尽管本实验仪配有短路保护电路, 但应尽量避免使各组电源线短路。

(4) 手动操作完成后, 将第二栅压调至零伏。

(5) 实验结束后, 切断电源, 保管好被测电子管。仪器长期放置不用后再次使用时, 请先加电预热 30min 后使用。

(6) 键盘锁死时需按“复位”按钮, 可恢复到原测试状态。

【思考题】

(1) F-H 实验是如何观测到原子能级变化的?

(2) F-H 曲线 (以电压作为横坐标) 反映了什么?

(3) 弗兰克和赫兹用慢电子与稀薄气体原子碰撞的方法, 可以使原子状态发生什么变化?

(4) 弗兰克和赫兹从实验上直接证明了原子内能量的不连续性, 从而证实了什么?

4.2 光电效应测定普朗克常数

1905 年, 年仅 26 岁的爱因斯坦 (A. Einstein) 提出光量子假说, 发表了在物理学发展史上具有里程碑意义的光电效应理论, 10 年后被具有非凡才能的物理学家密立根 (Robert Millikan) 用光辉的实验证实了。两位物理大师之间微妙的默契配合推动了物理学的发展, 他们都因光电效应等方面的杰出贡献分别于 1921 年和 1923 年获得诺贝尔物理学奖。

光电效应实验及其光量子理论的解释在量子理论的确立与发展上, 在解释光的波粒二象性等方面都具有划时代的深远意义。利用光电效应制成的光电器件在科学技术中得到广泛的应用, 并且至今还在不断开辟新的应用领域, 具有广阔的应用前景。

【实验目的】

- (1) 加深对光电效应和光的量子性的理解。
- (2) 学习验证爱因斯坦光电方程的实验方法, 并测定普朗克常数 h 。

【实验仪器】

DH-GD-1 型普朗克常数测试仪。

【实验原理】

金属中的自由电子, 在光的照射下吸收光能从金属表面逸出的现象称为光电效应。

光电效应的基本实验事实为:

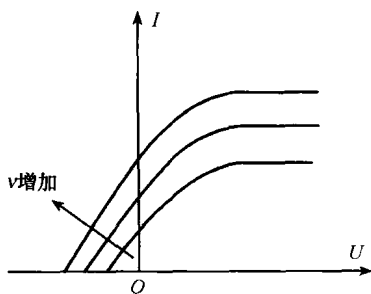
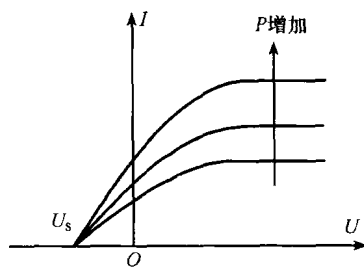
- (1) 饱和光电流与光强成正比。
- (2) 光电效应存在一个阈频率, 当入射光的频率低于此值时, 无论光强如何, 都无光电流产生。
- (3) 光电子的初动能与光强无关, 但与入射光的频率成正比。
- (4) 光电效应是瞬时效应, 一经光线入射, 立即产生光电子。

根据爱因斯坦假设, 当光与物质相互作用时, 其能流并不像波动理论所指出的那样, 不是连续分布的, 而是集中在一些叫做光子 (或光量子) 的粒子上, 当光的频率 ν 为时, 每个光子具有的能量为 $\epsilon/h\nu$ 。当金属受到频率为 ν 的光照射时, 金属中的电子在获得一个光子的能量后, 将能量的一部分用做逸出金属表面所需的逸出功 W_s , 另一部分则表现为电子逸出金属表面时的初动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 。即

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + w_s \quad (4.4)$$

这就是爱因斯坦光电效应方程。

由式 (4.4) 可见, 入射到金属表面的光的频率越高, 逸出电子的初动能越大, 如图 4.5 所示。正因为电子具有初动能, 所以即使在加速电压 U 等于 0 时, 依然有光电子落到阳极而形成光电流, 甚至当阳极的电位低于阴极的电位时也会有光电子落到阳极, 直到加速电压为某一负 U_s 值时, 所有光电子都不能到达阳极, 光电流才为零, 如图 4.6 所示, U_s 称为光电效应的截止电压。此时

图 4.5 入射光频率不同的 $I-U$ 曲线图 4.6 入射光强度不同的 $I-U$ 曲线

$$eU_s - \frac{1}{2}mv^2 = 0 \quad (4.5)$$

代入式 (4.4) 有

$$eU_s = h\nu - W_s \quad (4.6)$$

由于金属材料的逸出功 W_s 是金属材料的固有属性, 对于给定的基础材料, W_s 为一个定值, 它与入射光的频率无关, 若令 $W_s = h\nu_0$, ν_0 称为对应材料光电效应的红限频率 (或称阈频率)。即具有红限频率的光子的能量恰恰等于电子需要的逸出功, 此时的逸出电子没有多余的动能。

式 (4.6) 可改写成

$$U_s = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_s}{e} = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0) \quad (4.7)$$

式 (4.7) 表明, 截止电位 U_s 是入射光频率 ν 的线性函数。当入射光的频率 $\nu = \nu_0$ 时, 截止电位 $U_s = 0$, 没有光电子逸出。对应曲线如图 4.7 所示, 其斜率 $k = h/e$ 为一个正常数。故有

$$h = ek \quad (4.8)$$

可见, 只要用实验方法测出不同频率下的截止电压 U_s , 再做出 $U_s - \nu$ 直线, 并求出该直线的斜率 k , 就可通过式 (4.8) 求出普朗克常数的数值。其中 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 是电子的电荷量。

利用光电管进行光电效应实验的原理如图 4.8 所示。频率为 ν 、强度为 P 的光线照射到光电管阴极上, 即有光电子从阴极逸出。

如果在阴极 K 和阳极 A 之间加正向电压 U_{AK} , 它使 K、A 之间建立起的电场对从光电管阴极逸出的光电子起加速作用, 随着电压 U_{AK} 的增加, 到达阳极的光电子将逐渐增多。当正向电压 U_{AK} 增加到 U_m 时, 光电流达到最大, 不再增加, 此时即称为饱和状态, 对应的光电流即称为饱和光电流。

如果在阴极 K 和阳极 A 之间加有反向电压 U_{KA} , 它使电极 K、A 之间建立的电场对从光电管阴极逸出的电子的运动起减速作用, 随着电压 U_{KA} 的增加, 能够到达阳极的光电子将逐渐减少, 当 $U_{KA} = U_s$ 时, 光电流降为 0。不同强度的光线照射后的 $I-U$ 曲线如图 4.6 所示, 不同频率的光照射后的 $I-U$ 曲线如图 4.5 所示。如果在直角坐标系中绘出的 $U_s - \nu$ 关系曲线是一条直线, 就证明了爱因斯坦光电效应方程的正确性, 由该直

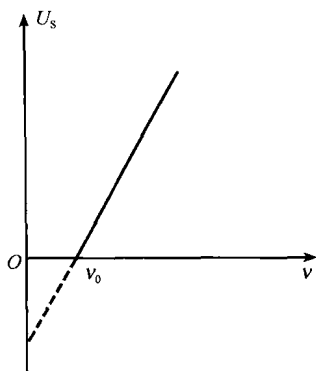
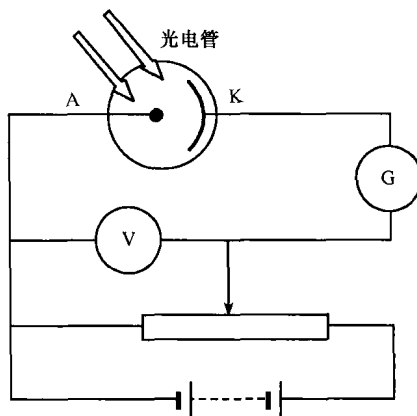
图 4.7 $U_s \sim \nu$ 直线

图 4.8 光电效应实验原理图

线的斜率 k 便可求出普朗克常数 h ，由直线与横坐标轴的交点可求出阈频率 ν_0 。

爱因斯坦方程是在同种金属作阴极和阳极，且阳极很小的理想状态下导出的。实际上作阴极的金属逸出功比做阳极的金属逸出功小，所以实验中存在着如下问题：

(1) 暗电流。当光电管阴极没有受到光线照射时也会产生电子流，称为暗电流。它是由电子的热运动（热电流）和光电管管壳漏电（漏电流）等原因造成的。

(2) 本底电流。室内各种漫反射光射入光电管造成的光电流称为本底电流。

(3) 阳极电流（反向电流）。制作光电管阴极时，阳极上也会被溅射有阴极材料，所以光入射到阳极上或由阴极反射到阳极上，阳极上也有光电子发射，这就形成阳极电流。

由于上述干扰的存在，使得 $I-U$ 曲线较理论曲线下移。

一般地，确定截止电压 U_s 有以下几种方法：

(1) 拐点法。光电管阴极为球壳形，阳极为半径比阴极小得多的同心小球，反向电流容易饱和，可以把反向电流进入饱和时的拐点电压近似作为截止电压，这种方法叫拐点法。

(2) 补偿法。调节电压 U_{AK} 使电流为零后，保持 U_{AK} 不变，遮挡汞灯光源，此时测得的电流 I_1 为电压接近截止电压时的暗电流和本底电流。重新让汞灯照射光电管，调节电压 U_{AK} 使电流值至 I_1 ，将此时对应的电压 U_{AK} 的绝对值作为截止电压。此法可补偿暗电流和本底电流对测量结果的影响。

(3) 零电流法。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。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。

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时，可采用零电流法。用零电流法测得的截止电压与真实值相差较小，对 h 的测量不会产生大的影响。

【仪器简介】

DH-GD-1 型普朗克常数测试仪整体结构图（图 4.9）。

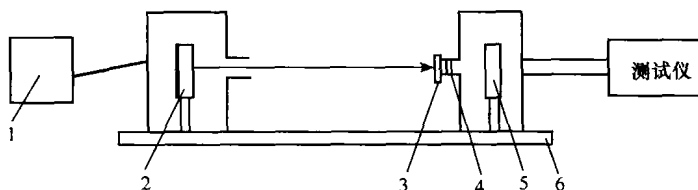


图 4.9 整体结构图

1. 汞灯电源；2. 汞灯；3. 滤光片；4. 光阑；5. 光电管；6. 基准平台

(1) 汞灯电源。

(2) 汞灯光源。

高压汞灯的光谱范围为 $320.3 \sim 872.0\text{nm}$ ，可用谱线为 365.0 、 404.7 、 435.8 、 546.1 、 577.0nm ，共五条强线谱线。

(3) 滤光片。高压汞灯发出的可见光中，强度较大的谱线有 5 条，仪器配以相应的 5 种滤光片。

(4) 光阑。光阑孔径 ϕ 分别为 2 、 4mm 和 8mm 。

(5) 光电管。光电管采用特殊结构，阳极反向电流和暗电流非常小。

(6) 基准平台。基准平台上标注刻度，便于调节和记录光源与接收窗口之间的距离。

【实验内容与步骤】

1. 测量准备

(1) 用专用电缆将微电流测量仪的输入接口与暗盒的输出接口连接起来；将微电流测量仪的电压输出端插座与暗盒的电压输入插座连接起来；将汞灯下侧的电线与限流器连接起来；接好电源，打开电源开关，充分预热 20min （汞灯及光电管暗箱用遮光罩罩住）。

(2) 将“电流量程”选择开关置于所选档位（截止电压测试为 10^{-13} ，伏安特性测试为 10^{-10} ）。

(3) 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。调零时应将光电管暗箱电流输出端与实验仪微电流输入端断开，旋转“调零”旋钮使电流指示为 000.0 。

(4) 调零确认：将断开的电缆连上，按“调零确认”键，系统进入测试状态。

2. 测量截止电压（零电流法）

(1) 选取“截止电压”测量，“手动”模式。

(2) 撤去光电管入口遮光罩，将 4mm 的光阑放入光电管入口处。

(3) 撤去汞灯灯罩。

(4) 将波长为 365.0nm 的滤光片套在光电管入口处，此时仪表所显示的就是对应波长的光电管电压与电流值。

(5) 轻点“电压调整”周围的“ $<$ ”和“ $>$ ”以及“ $\wedge$ ”和“ $\vee$ ”来改变电压，观察电流的变化，电流指示值约为“ 000.0 ”时的电压表指示就是该波长光所对应的截止

电压。

(6) 将 365.0nm 滤光片依次换成 404.7nm、435.8nm、546.1nm、577.0nm 的滤光片, 重复 (5) 步骤。列表记录各自的截止电压。

(7) 描绘 $U_s-\nu$ 关系曲线, 求出普朗克常数, 与公认值 $h_0 = 6.6260755(40) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 进行比较, 求出相对不确定度。

3. 光电管伏安特性测试

(1) 按“系统清零/调零确认”按钮, 重复 1 中步骤 (2)~(4)。

(2) 选取“伏安特性”测量, “手动”模式。

(3) 将某一波长的滤光片套在光电管入口处, 改变电压, 从 -1V 开始增加, 最高电压为 30V, 分别记录各电压下所对应的光电流。

(4) 将电压为横坐标, 光电流为纵坐标, 在图中描绘出该波长伏安特性曲线。

4. 光电管饱和电流与入射光强关系测试

(1) 按“系统清零/调零确认”按钮, 重复 1 中步骤 (2)~(4)。

(2) 选取“伏安特性”测量, “手动”模式。

(3) 设置 $U_{AK} = 30\text{V}$, 测试并记录不同光阑孔径 Φ 所对应的电流值 I 。

(4) 描绘 $\Phi-I$ 曲线, 得出实验结论。

【注意事项】

(1) 汞灯的预热时间必须长于 20min。实验中, 汞灯不可关闭。如果关闭, 必须经过 5min 后才可重新启动, 且须重新预热。

(2) 注意保护滤光片, 防止污染。

(3) 更换滤光片时, 注意遮挡住汞灯光源, 避免损坏仪器。

(4) 光电效应测量仪每改变一次量程, 必须重新调零。

【思考题】

(1) 什么是阈频率? 什么是截止电压? 实验中如何确定截止电压值?

(2) 反向电流、暗电流的来源是什么?

(3) 如何由光电效应测定普朗克常数 h ?

(4) 从截止电压 U_s 与入射光频率 ν 的关系曲线, 能否确定阴极材料的逸出功?

4.3 密立根油滴 CCD 微机系统电子电荷的测定

著名的美国物理学家密立根 (Robert A. Millikan) 在 1909 年到 1917 年期间, 所做的测量微小油滴上所带电荷的工作, 即油滴实验, 是物理学发展史上具有重要意义的实验。这一实验的设计思想简明巧妙, 方法简单, 而结论却具有不容置疑的说服力, 因此这一实验堪称物理实验的精华和典范。密立根在这一实验工作上花费了近 10 年的心血, 从而取得了具有重大意义的结果:

(i) 证明了电荷的不连续性。

(2) 测量并得到了元电荷即为电子电荷, 其值为 $e=1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ 。现公认 e 是元电荷, 目前对其值的测量精度不断提高, 正是由于这一实验的成就, 他荣获了 1923 年诺贝尔物理学奖。

本实验的目的, 是学习测量元电荷的方法, 并训练物理实验时应有的严谨态度与坚韧不拔的科学精神。

【实验目的】

- (1) 了解密立根油滴仪的结构, 验证电量的量子性。
- (2) 掌握实验方法和实验技巧, 测定电荷的基本量——电子电荷。
- (3) 培养学生的实验能力。

【实验仪器】

OM99 型密立根油滴仪。

【实验原理】

密立根油滴实验的基本设计思想是使带电油滴在测量范围内处于受力平衡的状态。按油滴静止或做匀速运动两种方式分类, 测定油滴所带电荷的方法有平衡法和动态法。

1. 平衡法测油滴所带电量

用喷雾器将油喷入两块相距为 d 的水平放置的平行板之间, 因油在喷射成雾状时, 油滴一般都带上了电。设油滴的质量为 m , 所带的电量为 q , 两极板间电压为 U , 则油滴在平行极板间将受两个力的作用 (空气浮力忽略不计), 一个是重力 mg , 一个是电场力 qE , 如图 4.10 所示。调节两极板的电压 U , 可使油滴受力达到平衡, 这时

$$mg = qE = q \frac{U}{d} \quad (4.9)$$

由式 (4.9) 可见, 为了测得油滴所带电量 q , 必须测定电压 U , 两极板间距离 d 和油滴的质量 m , 由于 m 很小, 需用特殊方法测定。

当平行极板间不加电压时, 油滴因受重力作用加速下降。由于空气阻力作用, 当下降速度达到某一值 v_g 时, 阻力 f_r 与重力 mg 平衡 (空气浮力忽略不计), 如图 4.11 所示。此时油滴开始匀速下降。根据斯托克斯定律, 油滴以 v_g 匀速下降时空气阻力为

$$f_r = 6\pi r \eta v_g = mg \quad (4.10)$$

式中 η ——空气的黏滞系数;

r ——油滴的半径 (由于表面张力作用, 油滴总呈球状)。设油的密度为 ρ , 油滴的质量 m 可表示为

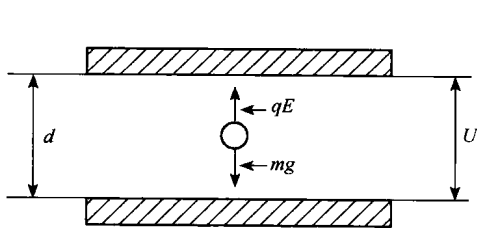


图 4.10 油滴在电场中受力图

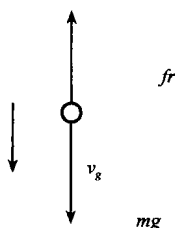


图 4.11 油滴匀速下降时受力图

$$m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \quad (4.11)$$

由式 (4.10) 和式 (4.11) 可得油滴的半径为

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g}} \quad (4.12)$$

对于半径小到 10^{-6}m 的小球, 空气的黏滞系数 η 应修正为

$$\eta = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}}$$

这时斯托克斯定律应改为

$$f_r = \frac{6\pi r \eta v_g}{1 + \frac{b}{pr}}$$

式中 b ——修正常数;

p ——大气压强。

因此油滴半径为

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \times \frac{1}{1 + \frac{b}{pr}}} \quad (4.13)$$

式 (4.13) 根号下仍含有油滴半径 r , 但因处于修正项中, 不需十分精确, 因此可用式 (4.12) 计算。将式 (4.13) 代入式 (4.11), 得

$$m = \frac{4}{3} \pi \left[\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \times \frac{1}{1 + \frac{b}{pr}} \right]^{\frac{3}{2}} \rho \quad (4.14)$$

由式 (4.14) 可知, 只要测出 v_g 就可算出油滴的质量 m 。油滴匀速下降的速度 v_g 的测量方法是将两极板间电压 U 调为零, 油滴立即匀速下降, 只要测出下降距离 l 和对应的时间 t_g , 就可知速度为

$$v_g = \frac{l}{t_g} \quad (4.15)$$

将式 (4.15) 代入式 (4.14), 再将式 (4.14) 代入式 (4.9), 得

$$q = 9 \sqrt{2\pi} \times \left(\frac{1}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\eta l}{t_g \left(1 + \frac{b}{pr} \right)} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \quad (4.16)$$

由式 (4.16) 可知, 只要测得平衡电压 U , 两极板间距离 d (由仪器而定), 油滴匀速下降的距离 l (一般固定), 所用的时间 t_g , 就可计算出油滴所带电荷。

实验发现, 对于同一油滴 (质量不变), 如果改变它所带的电量 q , 测得能使油滴平衡的电压为一些不连续的特定值 U_n 。对于不同油滴, 测得的平衡电压也为一些不连续的值。通过式 (4.16), 对大量的油滴进行测量计算, 结果所有油滴带的电量 q 都是不连续的, 是某一值的整数倍。这一值就是最小单位电荷 e 。 q 与 e 存在下列关系:

$$q = ne \quad (4.17)$$

式中 $n = \pm 1, \pm 2, \dots$; e 为电子电荷。则

$$e = \frac{q}{n} \quad (4.18)$$

式 (4.16) 和式 (4.18) 是用平衡法测量电子电荷的计算公式。

2. 动态法测油滴所带电量

在两平行极板间加适当的电压 U , 但不把 U 调至使静电力与重力平衡, 而是使油滴在静电力作用下加速上升 ($qE > mg$)。由于空气阻力作用, 当上升速度达到某一值 v_e 时, 空气阻力、重力与静电力达到平衡 (空气浮力忽略不计), 油滴将以速度 v_e 匀速上升 (实际上油滴会立即达到匀速运动状态), 如图 4.12 所示。这时三个力的平衡关系为

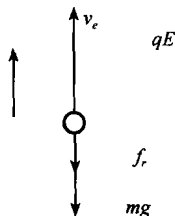


图 4.12 油滴在电场中匀速上升受力图

$$6\pi\eta r v_e = q \frac{U}{d} - mg \quad (4.19)$$

当两极板间电压为零时, 油滴立即匀速下降, 且式 (4.10) 成立。由式 (4.10) 和式 (4.19) 可得

$$\frac{v_e}{v_g} = \frac{q \frac{U}{d} - mg}{mg}$$

即

$$q = mg \frac{d}{U} \left(\frac{v_g + v_e}{v_g} \right) \quad (4.20)$$

将式 (4.14) 代入式 (4.20) 得

$$q = 9\sqrt{2}\pi \left(\frac{v_g}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{\eta}{1 + \frac{b}{pr}} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} (v_g + v_e) \quad (4.21)$$

实验时, 取油滴匀速下降和匀速上升的距离都为 l , 测出油滴匀速下降 l 所用的时间 t_g 和匀速上升 l 所用的时间 t_e , 则

$$v_g = \frac{l}{t_g}, \quad v_e = \frac{l}{t_e}$$

将 v_g 和 v_e 代入式 (4.21) 得

$$q = 9\sqrt{2}\pi \left(\frac{1}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{\eta l}{1 + \frac{b}{pr}} \right]^{\frac{3}{2}} \frac{d}{U} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_e} \right) \left(\frac{1}{t_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.22)$$

由式 (4.22) 可知, 对同一油滴而言, 如果改变油滴所带电量 q , 测得的 t_e 也发生改变。多次改变油滴所带的电荷进行测量, 分别由式 (4.22) 计算出 q , 结果发现油滴所带电荷的增量 Δq_1 、 Δq_2 、 Δq_3 、 $\dots$ 和油滴原有的电量 q 具有一个最大公约数, 且为某一量的整数倍。对不同的油滴测量计算, 发现 q 仍为某一量的整数倍。这一量就是