

仪器
设计
与
使用



冉绍尔-汤森效应实验仪自动化改进

顾恩遥,白翠琴,吕景林

(复旦大学 物理学系,上海 200433)

摘 要:针对大学物理教学中近代物理实验课堂演示的匮乏,基于复旦大学物理教学实验中心现有冉绍尔-汤森实验,进行自动化改造,使之能适应课堂演示实验的需求,并进一步替换实验室现有老式冉绍尔汤森实验仪,扩充实验教学内容.

关键词:冉绍尔-汤森效应;自动化;演示实验;LabVIEW

中图分类号:O562.5 文献标识码:A 文章编号:1005-4642(2013)11-0011-05

1 引 言

德国物理学家卡·冉绍尔在 1921 年和英国卡文迪许实验室的 J·S·汤森在 1922 年均发现当电子能量小于十几电子伏后,散射截面随着电子能量的降低迅速减小,在 1 eV 左右时散射截面达到最小值^[1]. 这种不符合经典气体分子动力论的现象,只能用量子力学才能给出满意的解释. 惰性气体原子对于电子的弹性散射截面在低能部分强烈依赖于碰撞电子的能量,并在 1 eV 出现极小值,这一效应称为冉绍尔-汤森效应.

该实验是近代物理实验教学中的重要实验,可以直接加深学生对量子力学的理解和认识. 但现有的教学实验室中仍然使用手动调节,人工读数,实验效率低下,不利于学生将注意力集中在实验原理和实验方法的体会与理解上,更不能用于课堂演示实验. 由于散射理论是本科量子力学教学中重要的部分,如果能将该实验在课堂中演示,必能起到较好的教学效果,同时还进一步拓展了实验内容.

2 实验原理

冉绍尔-汤森效应,是指电子以比较低的速度在原子气体中运动而发生碰撞时,电子平均自由程异常增大,散射截面接近零的量子现象. 为再现这一现象,笔者使用电子碰撞管来创造碰撞空

间,以氩-氦混合气作为碰撞靶原子气. ZQ1 0.1/1.3 型充气闸流管符合实验需要.

碰撞管原理示意如图 1 所示,F 两脚接入旁热式灯丝,K 为阴极,M 和 S 短接作为栅极,P 为板级.

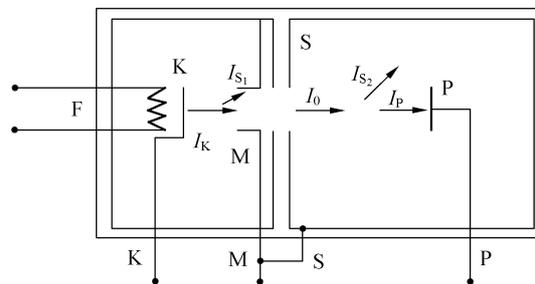


图 1 碰撞管结构及电流分布

当 F 接入加热电流时可以使 K 极产生热电子,通过 S-K 之间的电场加速,并经过栅极 S 产生具有一定速度的电子流,若使 S-P 之间为等势空间,则电子可以在这个空间中发生碰撞并通过 P 极接受到的电流来计算电子散射截面,进一步计算平均自由程.

由简单的统计推导可以得出,电子在原子气中走过 x 路程而被散射的概率为 $P_s(x) = 1 - e^{-n\sigma x}$,其中 $Q = n\sigma$ 定义为总散射截面. 而当入射电子数为 N_0 时,通过原子气的电子数则为 $N(x) = N_0 e^{-Qx}$.

“第 11 届全国高等学校物理演示实验教学研讨会”论文
收稿日期:2013-07-08;修改日期:2013-09-10

作者简介:顾恩遥(1991-),男,广西南宁人,复旦大学物理学系 2010 级本科生.

指导教师:白翠琴(1979-),女,河北无极人,复旦大学物理学系工程师,硕士,从事物理实验教学及物理生物方面的研究工作.

根据以上关系,如图 2 连接实验电路. 灯丝电压 E_F 起到加热阴极的作用,从而发射阴极电流,加速电压 E_A 使电子以确定速度入射到散射区,补偿电压 E_C 用于补偿接触电压,使散射区为等势空间. 电流满足关系:

$$I_K = I_0 + I_{S_1},$$

$$I_S = I_{S_1} + I_{S_2},$$

$$I_0 = I_P + I_{S_2}.$$

式中, I_K 为阴极发射电子流, I_{S_1} 为打到栅极的电子流, I_0 为进入碰撞空间的电子流, I_{S_2} 为被散射的电子流, I_P 为透射到板极的电子流, I_S 为栅极总电子流.

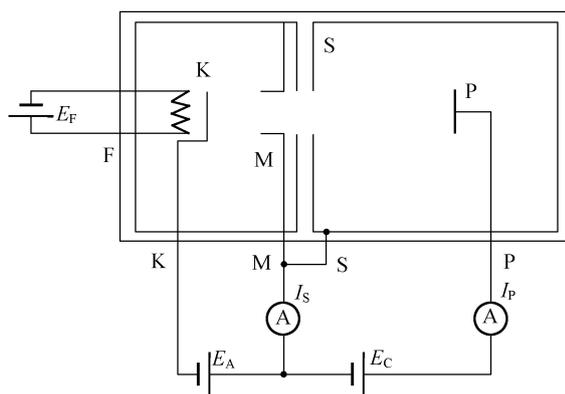


图 2 实验电路

根据散射概率与透射电子数关系有

$$P_S = 1 - \frac{I_P}{I_0}.$$

其中 I_S 和 I_P 是直接可测量量. 阴极电流 I_K 按照一定比例分为 I_0 和 I_{S_1} , 这个比例称为几何因子 $f = \frac{I_0}{I_{S_1}}$, 几何因子和碰撞管的几何结构以及阴极周围的空间电荷分布有关, 而空间电荷分布则与加速电压和阴极电流有关.

将充气闸流管浸入液氮使氩-氦混合气体液化. 此时有 $f = \frac{I_P^*}{I_S^*}$. 将相同加速电压和阴极电流下的几何因子代入散射概率公式, 并引入近似 $I_{S_2} < I_0 \ll I_{S_1} \Rightarrow I_S \approx I_{S_1}$, 得到

$$P_S(L) = 1 - \frac{I_P I_S^*}{I_S I_P^*},$$

$$Q = -\frac{1}{L} \ln \frac{I_P I_S^*}{I_S I_P^*}.$$

分别在常温和低温下, 改变加速电压, 测出电流并计算总散射截面, 即可做出 $Q \sim \sqrt{V}$ 关系曲线,

由此曲线可以表征冉绍尔-汤森效应, 即低能量电子与气体原子发生碰撞散射时出现的最小散射截面现象.

3 旧式实验仪及其缺陷

现有旧式教学仪器分为 4 部分: 电源组、微电流放大器、示波器和碰撞管.

电源组用于提供灯丝加热电压 E_F 、补偿电压 E_C 、加速电压 E_A , 均为互感式变压器供电, 通过整流滤波再以电位器调整输出电压, 相互之间使用独立变压器保证电气隔离.

微电流放大器也使用独立变压器和整流滤波电路, 以提供运放芯片 $\pm 15 \text{ V}$ 的工作电压, 且 I_S 和 I_P 的测量放大电路之间也为独立供电, 均使用了三级放大电路. 另外还附带由变压器和分压电阻输出的 18 V , 50 Hz 正弦交变电, 用于通过示波器快速观察 $I-V$ 曲线.

示波器用于快速观察, 以交流电源代替电源组的 E_A , 用示波器直接观察碰撞管的输出电流可以直接显示 $I-V$ 图, 用于调校实验参量.

碰撞管为 ZQ1 0.1/1.3 型充气闸流管.

实验室中现有实验仪器如图 3 所示.



图 3 旧式仪器实物图

旧式仪器的主要缺点有:

1) E_A 的调整完全手动, 数据完全依靠人为读数和记录, 效率低下, 容易造成错误且不利于快速进行实验, 后续的数据处理工作也非常繁琐.

2) 电源组和放大器总共使用了 5 个变压器与整流滤波模组, 设计较为繁琐. 过多的整流滤波电路不但使仪器造价提高, 也使仪器变得沉重.

3) 电流曲线的直接观察是通过交流电源和示波器显示, 而数据记录则通过直流手动调整电压记录. 实验被分为 2 部分, 繁琐且不直观.

基于对以上几点主要缺陷的考虑, 新仪器主

要解决的问题有: 简化电源设计, 实现加速电压快速自动控制以及电流信号即时采集.

4 改进仪器电路设计及配套软件开发

为实现电压的自动控制, 采用数模转换的原理, 利用数字信号控制加速电压模拟量进行扫描, 同时利用可选放大率的差分放大电路将电流信号放大为大小适宜的电压量, 保留手动调整其他实验参量功能. 电路设计如图 4 所示.

E_F 作为旁热式灯丝电源, 需要满足: 连续可调, 能提供足够大的电流, 与电子碰撞管其他部分无电接触. 故采用独立变压整流滤波电路实现电气隔离, 利用 7805 与 7905 稳压芯片组成 $0 \sim 5 \text{ V}$ 可调直流电源, 最大工作电流为 2.2 A , 足以驱动电子管旁热式灯丝. 使用 LM358 集成运放组成电压跟随器以保证 7805 芯片参考端稳定, 从而使输出电压稳定. 电路如图 5 所示, 利用变压器得

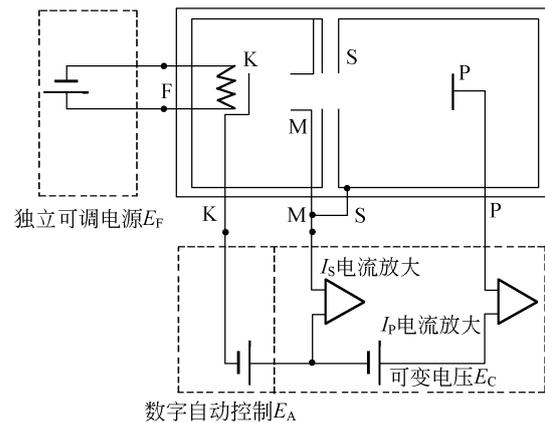


图 4 实验控制电路框图

到的 8 V 交流电, 通过整流滤波稳压得到正负电源, F 为电压输入端, 通过外接电位器调整电压, 通过电压跟随器而控制 E_F 输出电压. 7805 芯片可以提供 2.2 A 最大电流.

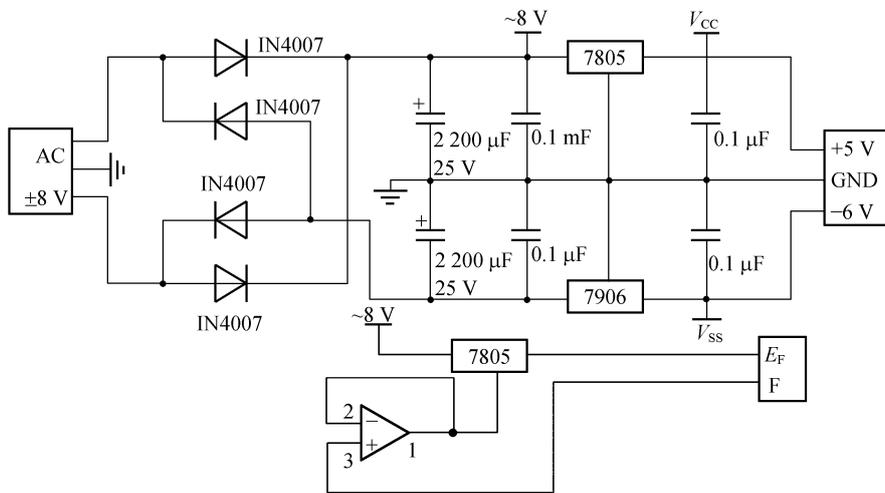


图 5 灯丝电源电路

主实验电路亦采用独立供电电路, 可以提供 $\pm 15 \text{ V}$ 与 $+5 \text{ V}$ 用于运放工作和仪器表头供电.

E_A 正端为控制-采集电路地线, 则 E_A 需设计成数控负电源. 由于一般使用广泛的数据采集卡都具备并行数字 I/O 端口, 采用 DAC0832 并行 8 位数模转换芯片, 配合 LF353 集成运放组成负电压控制电路, 用外接电位器端实现多道可选参考电压. 电子管电流较小, 运放直接输出可以满足. 电路如图 6 所示, $D_0 \sim D_7$ 为 8 位数字信号, D 为允许输出, 高电平时允许数字信号影响模拟输出; E_A 为模拟电压输出, E_m 外接最大扫描范围电压.

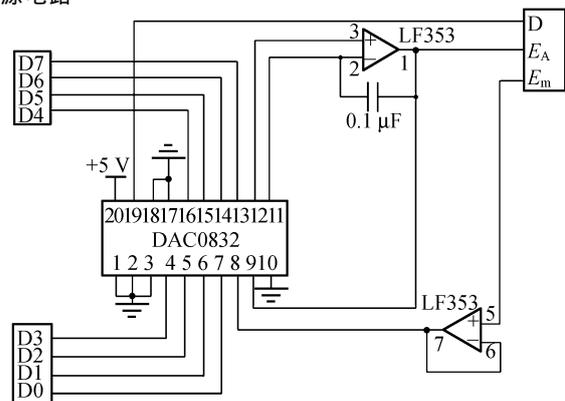


图 6 数控 E_A 电路

电子管电流 I_S, I_P 分别为 10 mA 和 10 μA 量级,可以直接采用 LM358 集成运放组成电流-电压信号转换电路,并使用差分放大和反向电路实现非共地源信号的共地输出,也能比较容易地实现多组放大倍数的选择,适应不同条件下较大的电流差异,充分利用数据采集卡的精度和量程。 E_C 用外接电位器调节,电压跟随器稳定。电路如图 7 所示,P,S 分别直接接入碰撞管的 P,S 端;C 用于外接电位器调节 E_C ;P0~P2 和 S0~S2 端用于外接单刀双掷开关选择放大率; I_P, I_S 则用于向采集卡输出放大后的信号。

综上电路设计,定制了电路板,并制做了原型仪器外壳(图 8)。另外采用了 NI-USB 6009 数据采集卡用作计算机与实验电路的连接(图 9),利用其数字输出和模拟采集功能。NI 采集卡和 LabVIEW 虚拟仪器之间有很好的兼容性。

实验软件基于 LabVIEW 进行开发。实验控制软件主要实现数字信号递增输出和采集模拟信号的循环操作,逻辑框图如图 10 所示,在 LabVIEW 开发环境中可以很容易地实现。

图 11 是开发的软件界面以及配合本套仪器做出的实验结果。

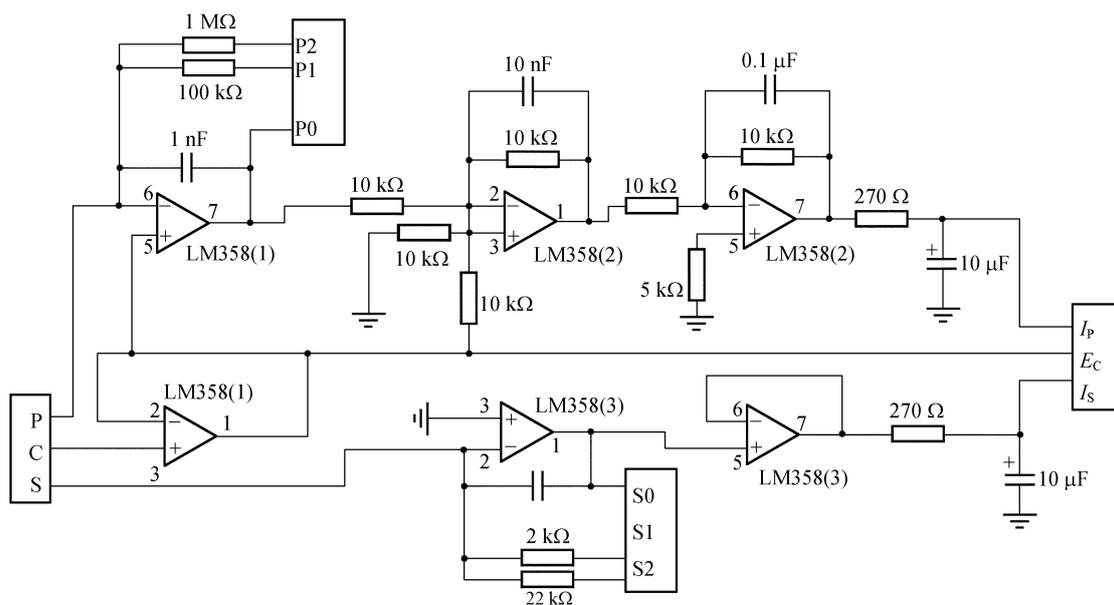


图 7 电流放大电路



图 8 原型机

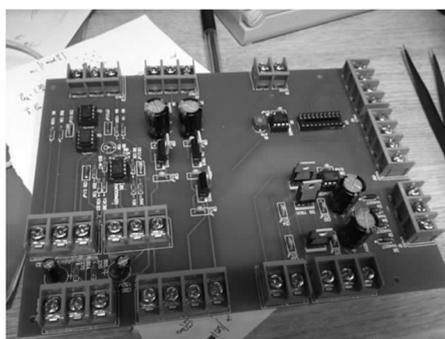


图 9 PCB 电路板

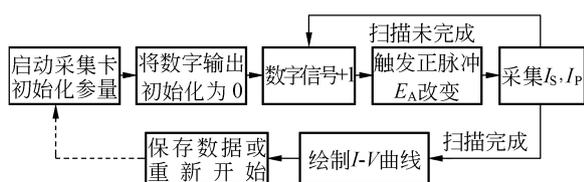


图 10 软件逻辑图

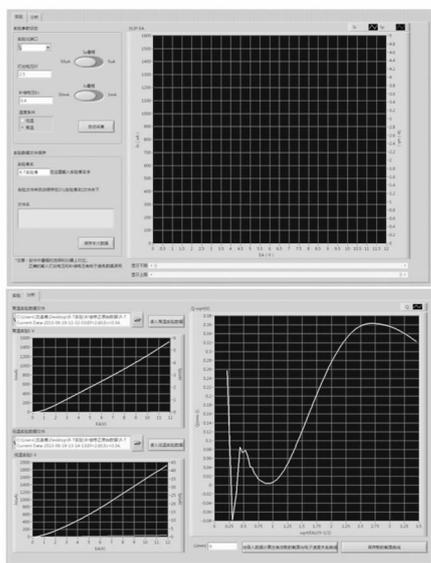


图 11 软件界面

5 结束语

改进的仪器在实际调试中工作良好,操作简单:只需连接仪器和碰撞管之间 5 根导线,设置好灯丝电压、补偿电压以及放大率,启动实验软件,在数秒内即可完成 1 次加速电压扫描,绘制出 I - V 图并保存数据.还能用已经保存的数据直接计

算散射截面曲线.仪器本身体积小重量轻,电路简单,携带方便.配套软件也易于使用.

冉绍尔-汤森效应实验是近代物理教学实验中的一个重要部分,而在课堂演示实验方面近代实验一直有着空缺,本实验仪器利用数模转换器和数据采集卡,在原实验的基础上改进,实现冉绍尔-汤森实验的电脑集成化.在调整好实验参量的情况下,每次实验只需要短短若干分钟就可以完成,而且电路连接也非常简单,完全满足课堂演示的需求.而其低成本与易扩展性,使其完全可以应用在物理教学实验中,扩充近代物理教学实验内容.

参考文献:

- [1] Thomas F O'Malley. Extrapolation of electron-rare gas atom cross sections to zero energy [J]. Physical Review, 1963,130(3):1020-1030.
- [2] Gianturco F A, Willner K. Ramsauer-Townsend effect for electron scattering from gaseous CF_4 molecules [J]. Physics Review A, 2007,75(6):1-7.
- [3] 戴乐山,戴道宣.近代物理实验[M].北京:高等教育出版社,2006:78-93.
- [4] 李洁.电子技术基础[M].北京:清华大学出版社,2007:94-103.
- [5] 苏汝铿.量子力学[M].北京:高等教育出版社,2002:299-313.
- [6] 陈锡辉,张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2007:180-239.
- [7] 胡永茂,张桂楠,李汝恒,等.氩原子散射截面反常现象的观测分析[J].物理实验,2008,28(7):40-44.

Automation of Ramsauer-Townsend effect experiment and development of demonstration apparatus

GU En-yao, BAI Cui-qin, LV Jing-lin

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Modern-physics experiments are rarely conducted as demonstration experiments in college classrooms. The Ramsauer-Townsend experimental apparatus was redesigned so that it could be used in classroom demonstration to get better teaching effect.

Key words: Ramsauer-Townsend effect; automation; demonstration experiment; LabVIEW

[责任编辑:尹冬梅]