

微观粒子的相互作用

—通过冉绍尔-汤森效应探究

[摘要]: 微观粒子之间的相互作用在很多物理研究中十分重要, 因为通过对微观粒子作用的研究可以更好的理解宏观物理事件。本文着重通过冉绍尔-汤森效应实验来阐述电子和原子的相互作用。

[Abstract]: Interactions between microscopic particles in physics is very important for the role of the micro particles can better understand the macroscopic physical events. This paper by Ramsauer - Townsend effect experiment to illustrate the interaction between electrons and atoms.

[关键词]: 冉绍尔-汤森效应 电子 原子 散射

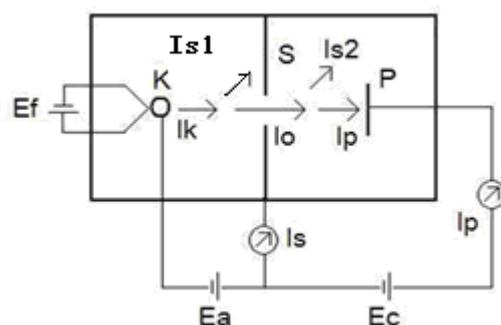
[引言]:

1921年, 德国物理学家冉绍尔在研究电子与惰性气体原子碰撞的过程中, 发现了一个很异常的现象: 在低能区随电子能量的降低, 散射几率随之而减小。次年, 汤森在研究电子自由程中发现在电子以很小速度在氩原子中运动时, 电子的平均自由程存在一个极大值, 这与经典的分子动理论相违背。¹

本文通过实验验证了冉绍尔-汤森效应, 并对实验结果进行了分析和解释, 提出了对实验的改进。

[实验原理]:

1、实验测量原理



1.1、阴极发出的电子在加速区被加速, 部分电子 (I_s) 被栅极吸收, 透过矩形孔的电子 (I_o) 在碰撞区与氩原子进行碰撞, 部分 (I_s2) 被散射出去, 剩余部分 (I_p) 到达极板P。在散射区电子被原子散射到栅极, 将透过矩形孔的电子看为1, 其中没被散射的占: I_p/I_o , 所以被散射的几率 P_s 为: $1 - I_p/I_o$ 。电子的速度可以通过加速电压来控制。这样就可以得到散射几率和电子速度的关系, 从而验证冉绍尔-汤森效应。²

1.2、有两个不易直接测量的量, 电子速度 v 和 I_o 。这里就要用到物理研究中常用的方法: 间接量关系转化为直接量关系。电子速度 v 可以通过能量守恒关系

由加速电压得到。

1.3、假定几何因子 $f=I_o/I_{s1}$, I_o 转化为 $f \cdot I_{s1}$ 。把电子碰撞管的管端部分浸入温度为 77K 的液氮中, 这时, 管内的气体冻结, 在这种低温状态下, 气体原子的密度很小, 对电子的散射可以忽略不计, 几何因子 f 就等于这时的板流 I_{p^*} 与屏流 I_{s^*} 之比, 即 $f=I_{p^*}/I_{s^*}$ 。这样 $P_s=1-I_{p^*}I_{s^*}/I_{s^*}I_{p^*}$ 。从而达到间接量向直接量转化的过程: $P_s \rightarrow I_o \rightarrow f \rightarrow I_{p^*}/I_{s^*}$ 。

所以散射截面 $Q_L=-\ln(1-P_s)$, 做 Q_L 与 $\sqrt{E_a}$ 关系曲线, 即得总散射截面与电子速度的关系。

1.4、由于在闸流管中, 由于屏蔽极与板极材料表面状况不同, 存在接触电位差, 所以需要 对阴极和屏极之间的接触电位差进行修正, 使得 S 和 P 极构成等势空间。实验过程中将补偿电压设为 $E_c=0.36V$ 时, S、P 板极电流开始变化, 所以认为 $E_c=0.36V$ 就是补偿电压。

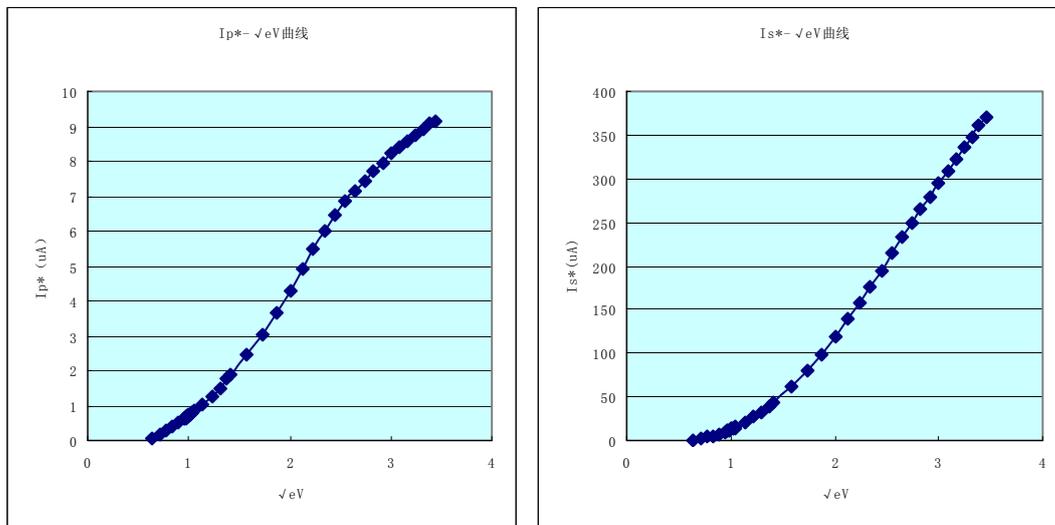
[实验结果、分析]:

2、测量结果:

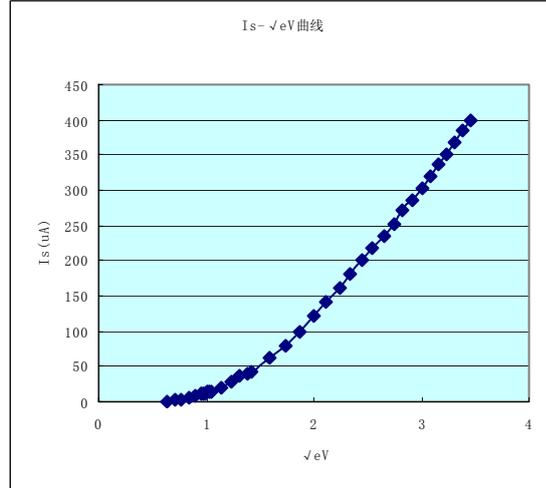
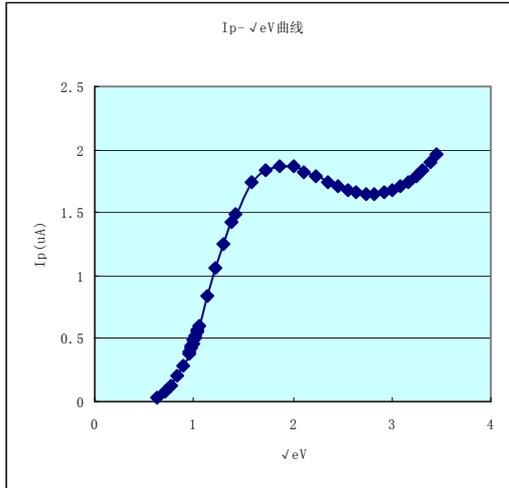
2.1、在 77K 时, $E_f=2V$, $E_a=1.0V$, $E_c=0.36V$ 。此时 S 与 P 构成等势空间, 改变 E_a , 测量 I_{p^*} 和 I_{s^*} 。

2.2、在室温下, $E_f=2.2V$, $E_a=1.0V$, $E_c=0.36V$ 。此时阴极发射电子的情况和低温时的情况相同, $I_p(0.484\mu A)+I_s(12.81\mu A) \approx I_{p^*}(0.719\mu A)+I_{s^*}(12.7\mu A)$ 。

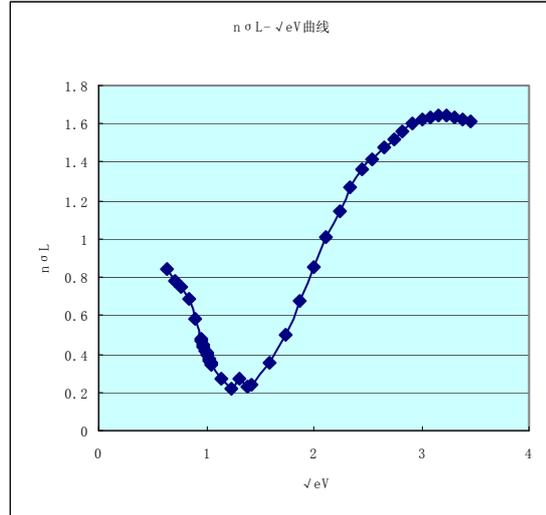
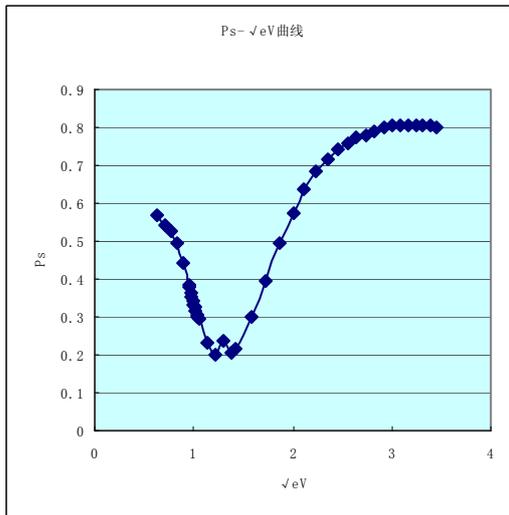
选择 $E_a=1.0V$ 是因为在 1V 的加速电压下散射几率最小。改变 E_a 测量 I_p 和 I_s 。



上图为 77K 下, I_{p^*} 和 I_{s^*} 与加速电压的平方根 $\sqrt{E_a}$ 即与电子速度 v 的关系曲线, 可以看出 I_{p^*} 和 I_{s^*} 与 $\sqrt{E_a}$ 几乎为线性关系, 这是因为在低温下, 氙气体变为液体, 此时电子与原子的散射可以忽略不计。



上图为室温下， I_p 和 I_s 与 $\sqrt{E_a}$ 的关系曲线，可以看出 I_s 与 $\sqrt{E_a}$ 几乎为线性关系，但是 I_p 与 $\sqrt{E_a}$ 关系完全不是线性，在 I_p 在 $1 \sim 3eV$ 有一个极大值。因为 $I_p \ll I_s$ ，所以 I_s 与 $\sqrt{E_a}$ 关系曲线变化不大。



上面左图为散射几率与 $\sqrt{E_a}$ 关系曲线，可以看出在 $\sqrt{E_a} \approx 1.25$ 时 P_s 存在一个最小值，在这个加速电压下电子几乎没发生散射。上面右图为 QL 与 $\sqrt{E_a}$ 关系曲线，可以看出在 $\sqrt{E_a} \approx 1.25$ 时 QL 也存在一个最小值，这个异常的现象是经典的分子动理论无法解释的。量子力学能给这个异常的现象很好的解释，而冉绍尔-汤森效应也成了量子力学的一个有力的支撑。

实验数据所得的 P_s 极小值在 $\sqrt{E_a} \approx 1.25$ ，较理论值偏大。在实验中发现加速电压测量表无法达到仪器最小值，所以 $\sqrt{E_a}$ 偏大，进而导致曲线右偏。

实验所得图像在极小值点附近有一点偏离了整体趋势 ($E_a = 1.7V$)，从数据上可知这点数据可能是等电流表稳定才读的值。在实验中观察到，变化 E_a 后电流表示数达到某值后开始减小。实验过程中为了防止液氮蒸发对实验结果造成的误差故没等到数据稳定后读数。稳定值所得的 P_s 大于初始值所得的 P_s ，这也就解释了该点 P_s 值偏离整体曲线的现象。

3、量子力学对冉绍尔-汤森效应的简单解释：

若将粒子看作刚性小球，那么散射截面 $Q = \pi d^2$ 其中 d 是瞄准距与散射系数的

比值，可以看出散射截面与粒子的速度没有关系。在一维势阱中，计算结果是当电子半波长等于势垒厚度的整数倍时，散射几率趋于 0，这与冉绍尔-汤森效应只有一个极小值不符。³

将电子看作是 $\lambda = h/mv$ 的平面波，气体原子看作是球对称的势场 $V(r)$ ，当电子接近原子，平面波与势场相互作用，从而导致散射，这种散射可由发源于原子中心的一个球面波来表示。⁴下面用三维势阱简单解释冉绍尔-汤森效应：

$V(r) = -V_0, (r < a); 0, (r > a)$ 总散射截面为： $Q = 4\pi/k^2 \sum (2l+1) \sin^2 \delta_l$
解径向方程：

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} R_l \right) + \left[k^2 - \frac{l(l+1)}{r^2} - U(r) \right] R_l = 0 \quad R_l \xrightarrow{kr \rightarrow \infty} \frac{1}{kr} \sin \left(kr - \frac{l\pi}{2} + \delta_l \right)$$

其中 $k^2 = 2mE / (\hbar/2\pi)^2, U(r) = 2mV(r) / (\hbar/2\pi)^2, l = 0, 1, 2, \dots$ ，对于低能的情况，即 $ka \ll 1$ 时，高 l 分波的贡献很小，可以只计算 $l=0$ 的分波的相移 δ_0 。此时散射截面为： $Q_0 = 4\pi \sin^2 \delta_0 / k^2$ 可见，对于非零的 k ，当 $\delta_0 = \pi$ 时， $Q_0 = 0$ ，这就是说，当 $l=0$ 的分波过零而高 l 分波的截面 Q_1, Q_2, \dots 又非常小时，总散射截面就可能显示出一个极小值。另一方面，解 $l=0$ 时的方程可以得到 $\delta_0 = \pi$ 的条件为：

$\text{tg}(k'a) \approx k'a$ ，其中 $k' = \sqrt{2m(E + V_0) / \hbar^2}$ 。由此可见，调整势阱参数 V_0 和 a ，可以使入射粒子能量为 1eV 时散射截面出现一个极小值，即出现共振透射现象。而当能量逐渐增大时，高 l 分波的贡献便成为不可忽略的，在这种情况下需要解 $l \neq 0$ 时的方程，这样三维方势阱模型定性的说明了冉绍尔曲线。⁵

[结束语]：

- 1、通过本实验较好的了解了电子碰撞管的设计原理，掌握了电子与原子的碰撞规则和测量的原子散射截面的方法。学习到了用直接测量量反应出间接量之间关系的方法。
- 2、通过数据的测量和分析验证了冉绍尔-汤森效应，并通过量子力学对冉绍尔-汤森效应做了简单的解释。
- 3、由于本实验要测量的数据较多，人为调仪器和读数容易造成实验误差，所以可以考虑使用计算机来计数和处理数据，这样一方面可以减少实验者的实验量，更重要的是有利于得到更精确的实验结果。
- 4、感谢马世红老师的悉心指导和崔璨同学的愉快合作。

[参考文献]：

¹ [1] 氦原子散射截面反常现象的观测分析 胡永茂，张桂樯，李汝恒，陈丽，张学清

² [2] 近代物理实验第二版 戴乐山，戴道宣. 高等教育出版社

³ [3] 用充 Xe 闸流管演示冉绍尔-汤森效应 Stephen G. Kukolich

⁴ [4] 真空技术（第 2 版）P37-P41 王欲知 陈旭

⁵ [5] 准确计算氦原子中正电子散射的简单方法 宁雅丽