

2.1.2 冉绍尔效应

刘梓航*, 周非†

南京大学 物理系, 南京 210093

【摘要】 本实验通过定性观察和直流测量, 研究了低能电子与气体原子弹性碰撞散射截面的冉绍尔效应。首先, 按照交流观察接线图连接线路, 通过调节灯丝电压和电位器, 观察了不同条件下示波器上显示的 I_a - V_a 和 I_c - V_a 曲线。然后, 将闸流管置于液氮中, 记录液氮温度下的电流变化, 发现 I_c - V_a 曲线的凹陷消失。为了补偿接触电势差, 调节补偿电压使两条曲线基本重合。接着进行直流测量, 通过调节 V_a 和灯丝电压, 记录不同温度下的 I_a 和 I_c 值。根据测得的数据, 计算散射几率和散射截面。实验结果显示, 低温条件下散射几率和散射截面明显变化, 验证了冉绍尔效应。

【关键词】 冉绍尔效应, 低能电子, 弹性碰撞, 散射截面

Experiments of Modern Physics in Nanjing University

Liu Zihang, Prof. Zhou

Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: In this experiment, the Ramsauer-Townsend effect was studied through qualitative observation and DC measurement of the elastic scattering cross-section of low-energy electrons and gas atoms. First, the circuit was connected according to the AC observation wiring diagram. By adjusting the filament voltage and potentiometers, the I_a - V_a and I_c - V_a curves were observed under different conditions on the oscilloscope. Then, the thyatron was placed in liquid nitrogen, and the current changes at liquid nitrogen temperature were recorded, showing the disappearance of the depression in the I_c - V_a curve. To compensate for contact potential difference, the compensation voltage was adjusted to make the two curves coincide. Subsequently, DC measurements were performed by adjusting V_a and filament voltage, recording I_a and I_c values at different temperatures. Based on the measured data, the scattering probability and scattering cross-section were calculated. The experimental results demonstrated significant changes in scattering probability and cross-section under low-temperature conditions, confirming the Ramsauer-Townsend effect.

Key Words: Ramsauer-Townsend effect, low-energy electrons, elastic collision, scattering cross-section

1 引言

1921 年, Carl Ramsauer 在研究电子与气体原子的碰撞中, 发现碰撞截面的大小与电子的速度有关。当电子能量较高时, 电子与氩原子的碰撞散

射截面随着电子能量的降低而增大; 当电子能量小于十几个电子伏特后, 发现散射截面却随着电子的能量的降低而迅速减小。在经典理论中, 散射截面与电子的运动速度无关, 而冉绍尔与汤森的实验结果表明它们是相关的。这只能用量子力学才能作出满意的解释。气体原子的弹性散射截面在低能区与碰撞电子能量密切相关, 这就是冉绍尔-汤森德效应。

本实验测量了气体原子的有效弹性散射截面 Q 与电子速度的关系, 测定了散射截面最小时的

实验时间: 2024-05-30

报告时间: 2024-06-04

† 指导教师

*学号: 211840339

*E-mail: 211840339@smail.nju.edu.cn

电子能量，最后验证了冉绍尔-汤森效应，用量子力学理论加以解释。

2 实验目的

1. 通过测量氙原子与低能电子的弹性散射几率，考察弹性散射截面与电子能量的关系，了解有关原子势场的信息。

2. 学习研究低能电子与气体弹性散射所采用的实验方法。

3 实验原理

3.1 冉绍尔曲线

冉绍尔在研究极低能量电子 (0.75eV—1.1eV) 的平均自由程时，发现氙气中电子自由程比用气体分子运动论计算出来的数值大得多。后来，把电子的能量扩展到一个较宽的范围内进行观察，发现氙原子对电子的弹性散射总有效截面 Q 随着电子能量的减小而增大，约在 10eV 附近达到一个极大值，而后开始下降，当电子能量逐渐减小到 1eV 左右时，有效散射截面 Q 出现一个极小值。也就是说，对于能量为 1eV 左右的电子，氙气竟好像是透明的。电子能量小于 1eV 以后 Q 再度增大。

此后，冉绍尔又对各种气体进行了测量，发现无论哪种气体的总有效散射截面都和碰撞电子的速度有关。并且，结构上类似的气体原子或分子，它们的总有效散射截面对电子速度的关系曲线 $Q = F(\sqrt{V})$ (V 为加速电压值) 具有相同的形状，称为冉绍尔曲线。

图 1 为氙 (Xe), 氪 (Kr), 氩 (Ar) 三种惰性气体的冉绍尔曲线。图中横坐标是与电子速度成正比的加速电压平方根值，纵坐标是散射截面 Q 值，这里采用原子单位，其中 a_0 为原子的玻尔半径。图中右方的横线表示用气体分子运动论计算出的 Q 值。显然，用两个钢球相碰撞的模型来描述电子与原子之间的相互作用是无法解释冉绍尔效应的，因为这种模型得出的散射截面与电子能量无关。要解释冉绍尔效应需要用到粒子的波动性质，即把电子与原子的碰撞看成是入射粒子在原子势场中的散射，其散射程度用总散射截面来表示。

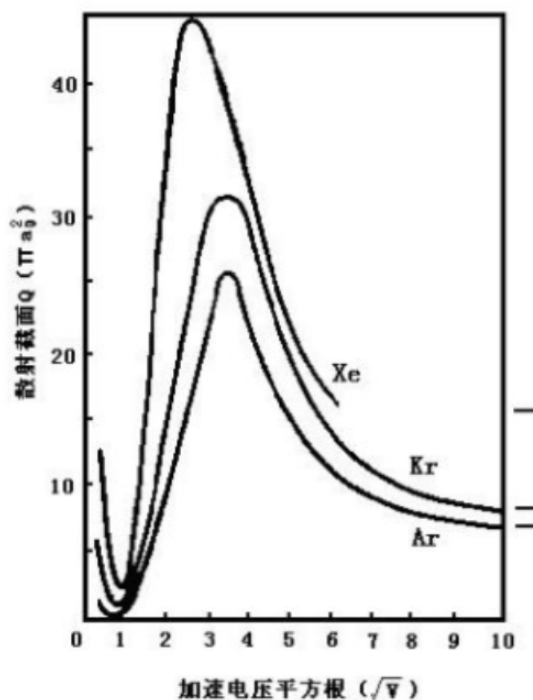


图 1 氙 (Xe), 氪 (Kr), 氩 (Ar) 三种惰性气体的冉绍尔曲线

3.2 测量原理

下图为测量气体原子总散射截面的原理图，当灯丝加热后，就有电子自阴极逸出，设阴极电流为 I_K ，电子在加速电压的作用下，有一部分电子在到达栅极之前，被屏极接收，形成电流 I_{s1} ；有一部分穿越屏极上的矩形孔，形成电流 I_0 ，由于屏极上的矩形孔与板极 P 之间是一个等势空间，所以电子穿越矩形孔后就以恒速运动，受到气体原子散射的电子则到达屏极，形成散射电流 I_{s2} ；而未受到散射的电子则到达板极 P，形成板流 I_P 。

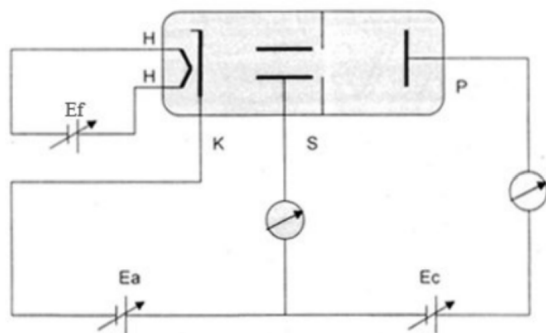


图 2 测量原理线路图

3.3 实验仪器

实验仪器由充气闸流管、R-T 实验仪（包括电源组和微电流计及交流测量两部分）示波器、液氮保温瓶等组成。

用 ZQI0.1/1.3 型充气闸流管作碰撞管, 进行低能电子和气体原子弹性碰撞散射截面的测量。图 2.6-2 是充气闸流管结构示意图, K 为旁热式氧化物阴极, 内有灯丝 F, M 为调制极, 调制极与板极 P 之间有一块中央开矩形孔的隔板, 它与周围的屏蔽金属套相连, 称为栅极或屏蔽极 S, 调制极与屏蔽极连在一起作加速极用。隔板右面区域是等电位区, 通道隔板小孔的电子与氩原子在这一区域进行弹性碰撞, 该区内的板极则收集未被散射的电子

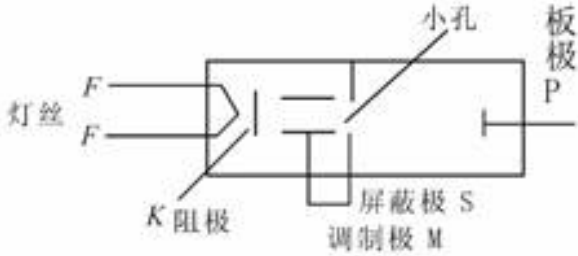


图 3 闸流管结构示意图

4 实验内容与结果分析

4.1 实验数据

室温下灯丝电压 $E_f=2.27V$, 液氮温度下灯丝电压 $E_f=2.00V$, 补偿电压 $E_c=1.11V$, 初始加速电压 $E_{a0}=-0.38V$

分别在室温和液氮温度下, 从 0 10V 逐渐增加加速电压 (2V 以下每隔 0.1V 记录一次数据, 2V-3V 可以每隔 0.2V 测量, 以后每隔 0.5V 测量), 列表记录每一点对应的电流 I_p I_s 、 I_p^* I_s^* 的大小

实验数据如表 1 所示。

4.2 I_p $I_p^* - \sqrt{E_a - E_{a0}}$ 曲线

作出 I_p $I_p^* - \sqrt{E_a - E_{a0}}$ 图像, 这反映的是在室温和液氮温度下极板 P 的电流与电子速率的关系。由图可以看出, 室温下, I_p 随电子速率的增大, 先会增大一段, 然后趋于稳定。这是由于电子散射截面与电子速率有关, 所以 I_p 无法一直增大。而在液氮温度下, 气体被冻结, 电子的散射可以忽略不计, 所以 I_p^* 与电子速率近似呈线性正相关关系

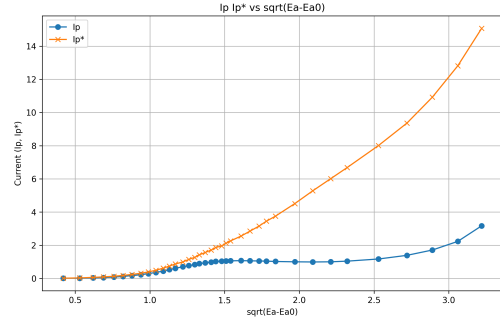


图 4 I_p $I_p^* - \sqrt{E_a - E_{a0}}$ 曲线

4.3 P_s $Q_L - \sqrt{E_a - E_{a0}}$ 曲线

图5、图5分别代表了电子散射几率-电子速率、电子散射截-电子速率关系曲线。

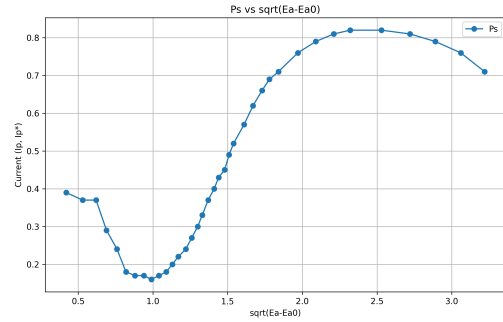


图 5 $P_s - \sqrt{E_a - E_{a0}}$ 曲线

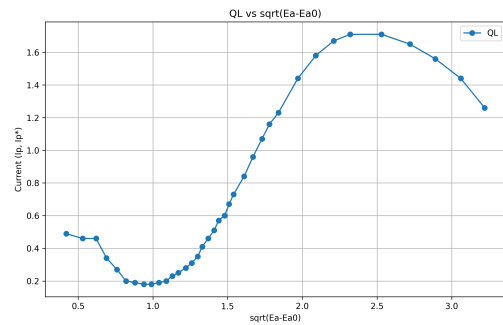


图 6 $Q_L - \sqrt{E_a - E_{a0}}$ 曲线

可以看出, 在 $\sqrt{E_a - E_{a0}} > 1$ 时, P_s 、 Q_L 与电子速率呈正相关; 在 $\sqrt{E_a - E_{a0}} < 1$ 时, P_s 、 Q_L 与电子速率呈负相关。

当 $\sqrt{E_a - E_{a0}}$ 在 1 左右时, P_s 、 Q_L 达到最小, 这一点的数据是:

$$\sqrt{E_a - E_{a0}} = 0.99, P_s = 0.16, Q_L = 0.18$$

这验证了冉绍尔效应。

Ea	Ip*	Is*	Ip	Is	$\sqrt{Ea - Ea_0}$	Ps	QL	Mid
-0.20	0.01	0.04	0.01	0.06	0.42	0.39	0.49	0.61
-0.10	0.03	0.21	0.01	0.18	0.53	0.37	0.46	0.63
0.00	0.06	0.62	0.03	0.46	0.62	0.37	0.46	0.63
0.10	0.09	1.49	0.05	1.10	0.69	0.29	0.34	0.71
0.20	0.13	2.69	0.08	2.18	0.76	0.24	0.27	0.76
0.30	0.18	4.38	0.12	3.56	0.82	0.18	0.20	0.82
0.40	0.24	6.53	0.17	5.52	0.88	0.17	0.19	0.83
0.50	0.31	9.31	0.22	8.01	0.94	0.17	0.18	0.83
0.60	0.39	12.65	0.29	11.13	0.99	0.16	0.18	0.84
0.70	0.49	16.70	0.36	14.87	1.04	0.17	0.19	0.83
0.80	0.62	22.10	0.44	19.51	1.09	0.18	0.20	0.82
0.90	0.74	27.90	0.53	25.00	1.13	0.20	0.23	0.80
1.00	0.87	34.30	0.61	31.20	1.17	0.22	0.25	0.78
1.10	0.99	41.30	0.70	38.40	1.22	0.24	0.28	0.76
1.20	1.14	49.40	0.77	46.00	1.26	0.27	0.31	0.73
1.30	1.27	57.10	0.83	53.60	1.30	0.30	0.35	0.70
1.40	1.42	66.00	0.89	62.80	1.33	0.33	0.41	0.67
1.50	1.56	74.70	0.94	72.00	1.37	0.37	0.46	0.63
1.60	1.71	84.50	0.98	81.10	1.41	0.40	0.51	0.60
1.70	1.86	94.30	1.02	91.30	1.44	0.43	0.57	0.57
1.80	1.96	104.40	1.04	101.90	1.48	0.45	0.60	0.55
1.90	2.12	115.30	1.05	112.60	1.51	0.49	0.67	0.51
2.00	2.26	126.50	1.06	124.10	1.54	0.52	0.73	0.48
2.20	2.55	149.10	1.07	145.70	1.61	0.57	0.84	0.43
2.40	2.85	172.50	1.06	169.20	1.67	0.62	0.96	0.38
2.60	3.15	196.40	1.05	191.70	1.73	0.66	1.07	0.34
2.80	3.45	221.00	1.04	214.00	1.78	0.69	1.16	0.31
3.00	3.75	245.00	1.02	231.00	1.84	0.71	1.23	0.29
3.50	4.51	308.00	1.00	292.00	1.97	0.76	1.44	0.24
4.00	5.28	377.00	0.99	346.00	2.09	0.79	1.58	0.21
4.50	6.01	446.00	1.00	398.00	2.21	0.81	1.67	0.19
5.00	6.68	519.00	1.04	450.00	2.32	0.82	1.71	0.18
6.00	8.01	678.00	1.17	552.00	2.53	0.82	1.71	0.18
7.00	9.36	851.00	1.39	659.00	2.72	0.81	1.65	0.19
8.00	10.92	1032.00	1.71	774.00	2.89	0.79	1.56	0.21
9.00	12.81	1211.00	2.23	895.00	3.06	0.76	1.44	0.24
10.00	15.07	1381.00	3.17	1027.00	3.22	0.71	1.26	0.29

表 1 直接测量实验数据

5 思考题

5.1 ZQI-0.1/1.3 型充氩闸流管的阴极是旁热式氧化物阴极，灯丝的正常电压为 6.3V，在实验中应降压使用，试说明原因

这是为了减小空间电荷的影响，因为阴极温度较低时电子的热动能也较小。我们希望的是电子能量通过加速电压 E_a 来反映，灯丝电压过高会使电子的初动能过大，影响实验结果。

5.2 如果灯丝电压保持不变，为什么阴极在室温下的温度比管子在液氮中时要低？如何使两种情况下阴极的发射情况基本一致？

在灯丝电压保持不变的情况下，室温下由于灯丝的电阻较小，电流较大，从而使灯丝发热温度升高，阴极温度也随之升高。

为了使两种情况下阴极的发射情况基本一致，在液氮环境下，需要通过降低灯丝电压来减少灯丝的热负荷。