

Ramsauer-Townsend 效应中的几何因子

庄旨玄 08300720109

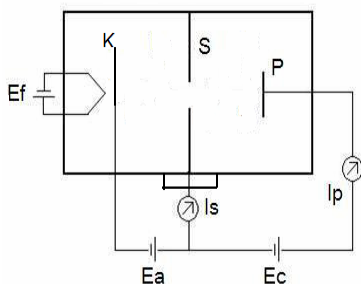
Abstract: we probed the influence of accelerating voltage and cathode voltage on the geometrical factor in Ramsauer-Townsend experiment, and give a plausible explanation for accelerating voltage's contribution.

I. 引言

Ramsauer-Townsend 效应由德国物理学家 Carl Ramsauer 及英国物理学家 J.S.Townsend 于 1921 年左右独立发现。他们观察到电子在与稀有气体碰撞时, 散射截面在低能 (1eV 左右) 区域有一个极小值。该极小值只有用量子力学才能给予解释, 从而该实验是对量子力学的有力证明。在实验中, 我们通过测量极板的电流来计算散射截面, 而在此过程中引入了几何因子 f , 其主要是对阴极管几何结构的度量, 但实验中它还和阴极的电荷分布有关。因此, 为了搞清几何因子具体的变化规律, 我们通过改变加速电压和阴极电压, 来观察其对几何因子的影响, 并试图对结果给出合理的解释。

II. 实验原理

实验原理图如下图所示



其中 E_f 为阴极电压, E_a 为加速电压, E_c 为补偿电压, S 为栅极, P 为极板。K, S 间为一加速区, S, P 间为等势碰撞区。设阴极电流为 I_k , 穿越栅极的电流为 I_o , 被栅极屏蔽的电流为 I_{s1} , I_o 中一部分达到 P 极板, 形成 I_p ; 另一部分受到散射, 形成 I_{s2} 。电流间有如下关系

$$I_K = I_o + I_{s1} \quad (1)$$

$$I_S = I_{s1} + I_{s2} \quad (2)$$

$$I_o = I_p + I_{s2} \quad (3)$$

电子在等势区内的散射概率为

$$P_S = 1 - \frac{I_p}{I_o} \quad (4)$$

我们设 $f = \frac{I_o}{I_{s1}}$, 则可得到 $P_S = 1 - \frac{1}{f} \frac{I_p}{I_{s1}}$, 其中 f 叫作几何因子。为了测量 f , 我们用液氮使阴极管内的氩气凝结, 使等势碰撞区的散射可以忽略, 这时可认为 $I_{s2} = 0$, 从而有

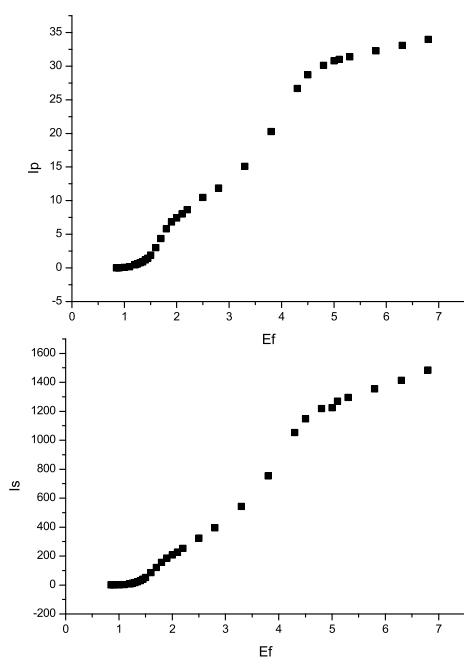
$$f = \frac{I_p^*}{I_{s1}^*} \quad (5)$$

其中 I_p^* , I_{s1}^* 分别为加液氮下两电流表的读数。实验中我们通过改变 E_a 和 E_f 来考察其对几何因子的影响。

III. 实验结果

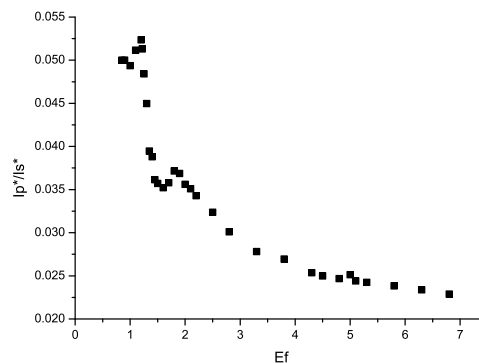
i. Ef 对几何因子 f 的影响

我们首先考察不同 Ef 下, 几何因子 f 的取值。此时取 $Ea = 4.0V$, $Ec = 2.6V$ 下图为 I_p^* , I_s^* 随 Ef 的变化



由图中可以看出, I_p^* , I_s^* 随 Ef 的变化刚开始相当不规则, 而当电压大于某个范围时 (图中是 $4.5V$ 左右), 电流和电压开始呈现线性关系。

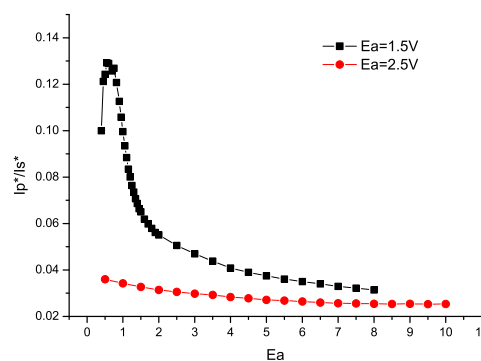
几何因子随 Ef 的变化如下图



由图可知, f 变化的整体趋势是随 Ef 的增大而减小; 而在局部上讲, 图像在 $1V$ 和 $2V$ 处各有一个峰。

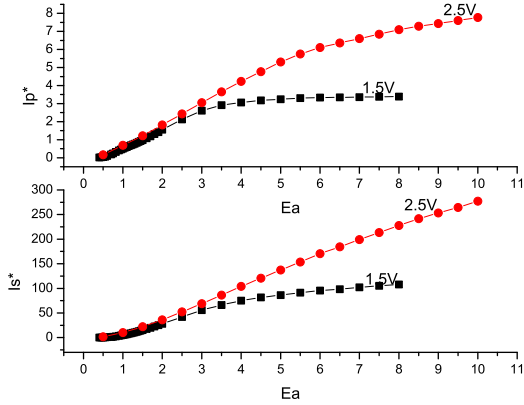
ii. Ea 对几何因子 f 的影响

我们取 $Ef = 1.5V$ 和 $Ef = 2.5V$ 两种情况下, 改变 Ea , 观察几何因子 f 的改变 (仍有 $Ec = 2.6V$)。如下图



从图中可以看出, 当 $Ef = 1.5V$ 时, 几何因子在 $0.5V$ 左右有一个极大值, 之后开始随 Ea 的增大而减小, 最后逐渐趋于某一非零常值。而当 $Ef = 2.5V$ 时, 没有测量到峰, 几何因子在此电压范围内只是随 Ea 增大而递减, 并逐渐趋于常值。

为了更具体地考察 f 变化的原因,我们要分析 Ea 对 I_p^* , I_s^* 的影响,如下图



有图可知,当 $Ef = 1.5V$ 时, I_p^* , I_s^* 在开始时都与 Ea 呈类似线性的关系,而之后都开始趋于平缓。对于 $Ef = 2.5V$ 的情况,在所测范围内仅能看到 I_p^* 有趋于平缓的趋势,而 I_s^* 在此范围内仍保持一定的线性性。

IV. 实验分析

由以上实验结果,我们希望得到 Ea 和 Ef 对几何因子的影响的物理诠释。对于 Ea 的作用机制,我想我们得到了一些初步的结果。然而对于 Ef 的影响,我们仍然没有找到合理的解释。对于这一点,我想其原因有以下两点:

1. Ef 改变几何因子主要是通过改变阴极温度,从而由温度的改变来影响阴极的总电流和空间电荷分布。但是 Ef 与阴极温度的关系却是不清楚的,所以从根本上来讲, Ef 与几何因子的关系很难确定。
2. 实验中 I_p^* , I_s^* 的示数是在不断上下波动的,并且波动的幅度有时会超过测量值的 1/10,在这种情况下, I_p^* , I_s^* 都会有很大的不确定度,而作为其比值的几何因子 f 的不确定度就更加巨大。因此所得到的几何因

子的关系图在何种程度上是可靠的就值得怀疑了。

综上,我们下面不准备讨论 Ef 对几何因子的影响,而是着重分析 Ea 所起的作用。

我们知道对于真空管,在低压段,其阳极的接收电流服从 Child 定律

$$J = kV^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

其中 V 为阳极与阴极间的电势差, k 为一与管的几何结构以及管内温度有关的参数。而在实验中,管内氩气已经凝结,可以将其近似看作真空管,并且考虑到阴极的接触电势差,我们可以得到 P 极板电流密度的表达式

$$J_P = k(V_a - V_{co})^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

另一方面,无外场情况,阴极的发射电流服从 Richardson 定律,即

$$J = -\frac{4em\pi}{h^3}(K_B T)^2 e^{-\frac{\varphi}{K_B T}} \quad (8)$$

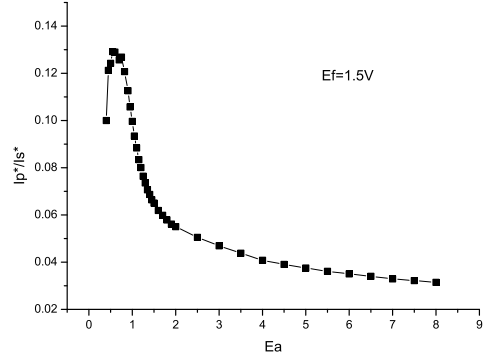
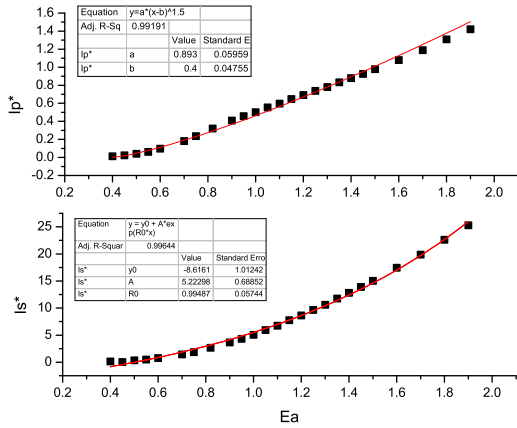
其中 φ 为阴极金属的功函数。考虑到外场和阴极的接触电压,则实验中阴极的发射电流可写为

$$J_t = -\frac{4em\pi}{h^3}(K_B T)^2 e^{-\frac{\varphi}{K_B T}} e^{\frac{e(V_a - V_{co})}{K_B T}} \quad (9)$$

J_S 即为 J_t 与 J_P 的差值 $J_t - J_P$, 因而几何因子便可表达为

$$f = \frac{J_P}{J_t - J_P} \quad (10)$$

在该式中,除去常数,我们通过测量只知道接触电压 V_{co} , 其值为 0.4V。而几何参量 k , 功函数 φ , 温度 T 都是未知的。为了对函数赋予恰当的参数值,我们对 I_p^* , $I_s^* \sim V_a$ 图,在低压区做拟合,以获得参数值

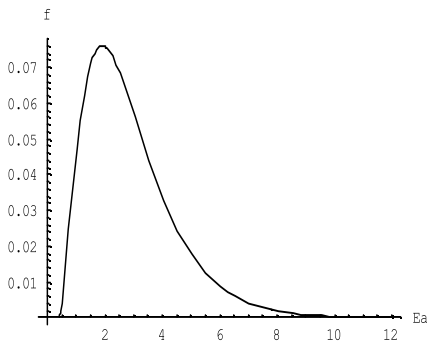


由此可得到 f 关于 V_a 的函数式

$$f = \frac{0.89342(V_a - 0.4)^{1.5}}{5.2229e^{0.99487(V_a - 0.4)} - 0.89342(V_a - 0.4)^{1.5}}$$

我们看到该式与理论上有一很大的不同点，即 e 指数上的 V_a 的系数比理论的预言值小很多，理论上其值为 $\frac{e}{K_B T}$ ，其量级为 10^4 ，而实际约为 1。其主要原因应该还是没有考虑到空间电荷对阴极的屏蔽，当 V_a 越大，管中空间电荷也越多，从而使阴极感受到的电势并不等于 $V_a - V_{co}$ ，而是 $\alpha(V_a - V_{co})$ ，其中 α 为一小于 1 的参数。因而， V_a 的系数为 $\frac{\alpha e}{K_B T}$ 从拟合结果来看， α 大致为 10^{-4} 。

根据得到的 f 的函数式，我们可以画出 f V_a 理论上应符合的曲线，如下图



实验结果如图

可以看出在低压段，实验曲线和理论曲线的变化趋势还是很相近的，但之后两者就有很多出入。尤其是当 V_a 较大时，实验 f 值逐渐趋于一非零常数，而理论 f 值趋于 0。关于这一点主要原因是，在低温下，在较高电压时真空管会出现 cold emission 效应，即 J_t, J_P 此时只与温度 T 和功函数 φ 有关，而与加速电压 V_a 无关，从而 f 为两常数之比，通常情况其不为零。而在低电压和高电压间的过渡区，电流即不满足 Child 定律和 Richardson 定律，也不服从 cold emission 的规律，因而在这一段，理论与实验间有较大出入。

V. 结论

综上所述，我们对 V_a 影响 f 的物理机制作了初步的探讨，在低压区有较好的吻合。在高压区，可用 cold emission 效应解释。而在中间段，理论与实验有一定出入。

参考文献

- [1] 戴道宣, 戴乐山: 近代物理实验, 高等教育出版社, 2006