

# 冉绍尔-汤森效应的探究性研究

08300300004 孙通

## 【摘要】

电子与充氙闸流管中的氙原子相互作用时，原子的散射截面与电子能量有关。实验测量了室温和77K下，管的栅极和板极电流，得出三条曲线，即：1. 散射概率 $P_s$ 与电子速度关系；2. 有效散射截面 $Q$ 与电子速度关系；3.  $f$ 因子与电子速度关系。结果表明，当电子能量约为1.19eV时，散射截面最小。通过实验验证了冉绍尔-汤森效应，并对实验结果进行分析和拓展。

## 【Abstract】

Electrons are scattered by xenon atoms in the xenon filled thyatron and the scattering probability is influenced by the energy of the electrons. This experiment is conducted under room temperature and 77 K and the relationship between the energy of the electrons and the scattering probability, the cross section and the character  $f$  are obtained. When the electrons' energy is about 1.19eV, the scattering probability is the smallest. It is in accordance with the Ramsauer-Townsend effect. The results of this experiment are deeply analyzed.

【关键词】冉绍尔-汤森效应 充氙闸流管  $I_s+I_p-V_a$ 曲线 灯丝电压

## 【引言】：

由德国物理学家冉绍尔和英国物理学家汤森的研究表明，电子和气体原子碰撞时，原子的弹性散射截面与电子能量明显相关。电子能量低于10eV左右时，散射截面 $Q$ 随电子的能量 $E$ 的降低而迅速减小； $Q$ 随电子能量 $E$ 降低而增大，即冉绍尔-汤森效应。冉绍尔-汤森效应用经典理论无法解释。因为经典气体分子运动论把电子看成质点，把气体原子看成刚性小球，碰撞的散射截面仅决定于气体原子的尺寸，与电子的运动速度无关。冉绍尔-汤森效应实际上是一种量子效应，电子与原子的碰撞是入射电子波在原子势场中的散射。

通过测量栅极电流和透射极电流，验证冉绍尔-汤森效应的存在，同时探究在 $V_a=1V$ 时，调节 $I_s+I_p=I_s^*+I_p^*$ 的合理性以及实验条件灯丝电压的选择，最后我们对 $f-V_a$ 的关系进行了探究和思考，并提出进一步实验的可能方式。

## 【实验原理】

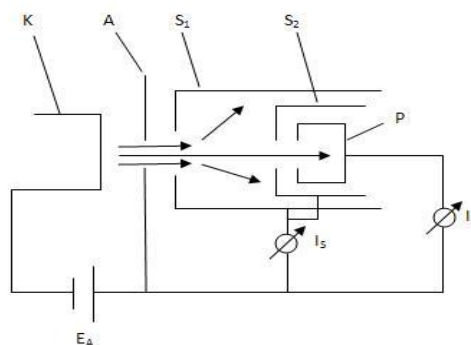
左图为实验装置原理图。电源 $E_f$ 给灯丝加热，电子逸出形成阴极电流 $I_k$ 。加速电子一部分在到达栅极前，被屏蔽级接收，形成电流 $I_{s1}$ ，其余进入S极板和P极板间的等势区。未散射的电子到达P极板形成电流 $I_p$ ，其余返回S极板与 $I_{s1}$ 形成 $I_s$ 。

$$\text{得, } I_k = I_0 + I_{s1}$$

$$I_0 = I_p + I_{s2}$$

$$I_s = I_{s1} + I_{s2}$$

$$\text{电子在等势区内的散射概率为 } P_s = 1 - \frac{I_p}{I_0} \quad (1)$$



图(1) 实验装置原理图

定义几何因子  $f = \frac{I_0}{I_{S_1}}$ 。把充气闸流管的管端部分浸到温度为 77K 的液氮中时，低温状

态下气体原子的密度很小，对电子的散射可忽略不计，即  $I_{S_1} \approx I_S$ ， $\bar{f} = \frac{I_P^*}{I_S^*}$ 。

代入 (1) 得， $P_S = 1 - \frac{I_P I_S^*}{I_{S_1} I_P^*}$ 。

设  $L$  为出射孔  $S$  到板极  $P$  的距离（本实验中  $L=6\text{mm}$ ）。散射截面  $Q = -\frac{1}{L} \ln(1 - P_S) = -\frac{1}{L} \ln \frac{I_P I_S^*}{I_S I_P^*}$ 。

通过测量不同加速电压下的  $S$ ,  $P$  板流，得出散射概率、散射截面、因子  $f$  与加速电压的关系，分析冉绍尔-汤森效应。

### 【实验内容】

#### 1. 交流测量

(a) 图为交流接线法，室温 ( $T=17.8^\circ\text{C}$ ) 时，在交流加速电压下观察  $S$  板和  $P$  板电流。图像如 (2) 所示。将充气闸流管下部二分之一浸入液氮中，观察 77K 时的电流。从零开始调节  $E_c$ ，当  $I_S$  和  $I_P$  的变化与加速电压的变化关系一致时， $E_c=0.09\text{V}$ 。此时碰撞空间的接触电位差得到了初步补偿。图像如 (3) 所示。

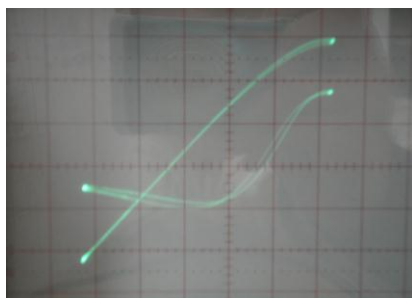


图 (2) 室温下  $I_S$ ,  $I_P$  曲线

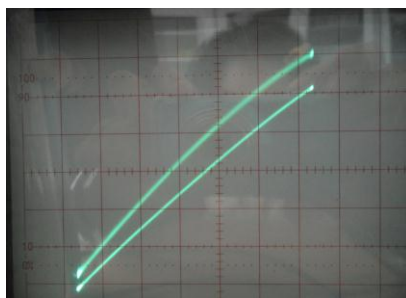


图 (3) 77K 下  $I_S$ ,  $I_P$  补偿后曲线

#### 2. 直流测量

图 (4) 图为直直流接线法。将管子置于室温下，细调  $E_c$  使  $I_S$  和  $I_P$  同时变化， $E_c=0.09\text{V}$ 。测量不同加速电压下的  $I_S$  和  $I_P$  值。此时， $V_f=4.39\text{V}$ 。然后，将管子置于 77K 温度下，在  $V_a=1\text{V}$  时，调节  $V_f$  使  $I_S+I_P=I_S^*+I_P^*$ 。此时  $V_f=4.02\text{V}$ 。记录  $I_S^*$ ,  $I_P^*$  随加速电压变化情况。

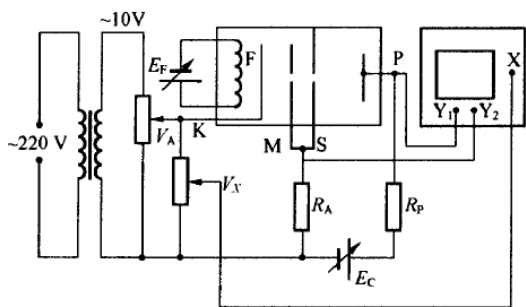


图 (4) 使用交流加速电压的测量线路图

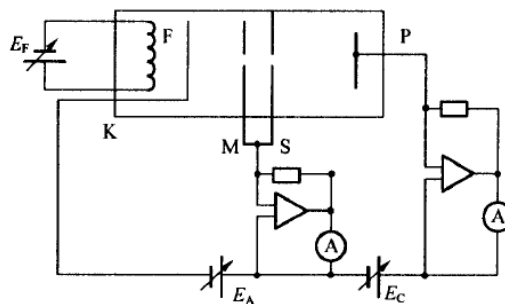


图 (5) 使用直流加速电压的测量线路图

实验一共进行两次，第二次的实验参数如下：液氮条件下  $T=77k$   $E_f=4.01v$   $E_c=0.09v$   
常温  $T=17.8^{\circ}C$   $E_f=4.39v$   $E_c=0.09v$

### 【测量结果】

直流测量

第一次测量：

灯丝电压 3.20v 补偿电压为 0.15v，室温为  $19^{\circ}C$ 和灯丝电压 2.86v 补偿电压为 0.15v 液氮环境条件下测量(此处  $I_s+I_p$  保持恒定是指根据实验指导上的要求通过调整灯丝电压保证在  $V_a=1v$  的情况下  $I_s+I_p$  两组情况下相等，此处后面还会有进一步的分析，以下同)，由数据处理得出的图像如下：

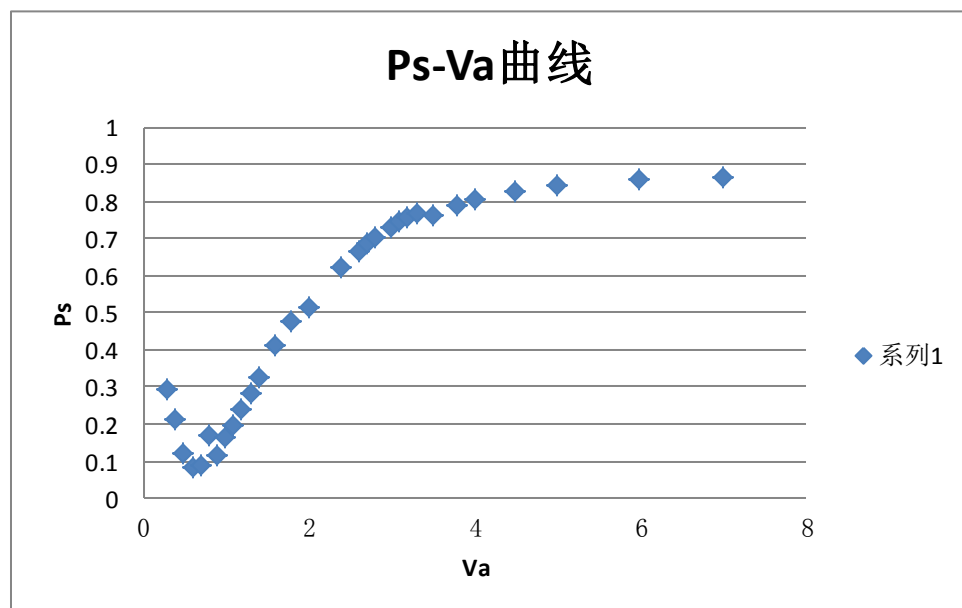


图 (6)：实验测得 Ps-Va 曲线

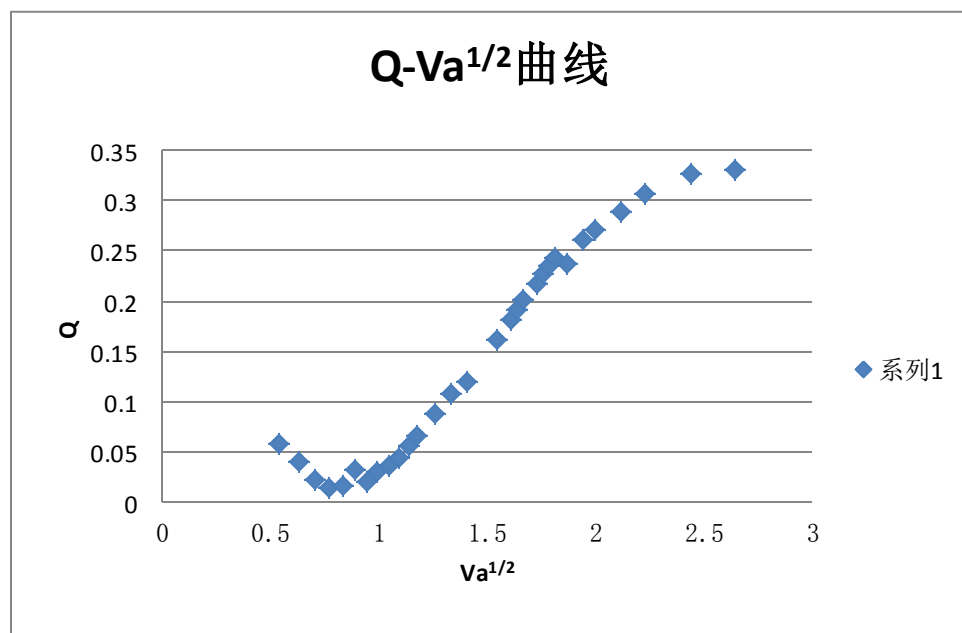


图 (7)：实验测得 Q-Va^{1/2} 曲线

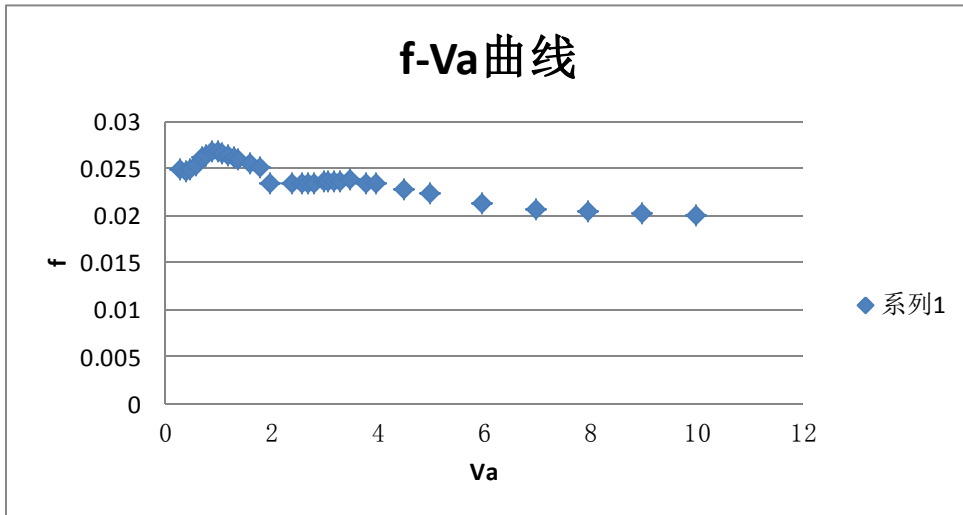


图 (8): 实验测得  $f$ - $V_a$  曲线

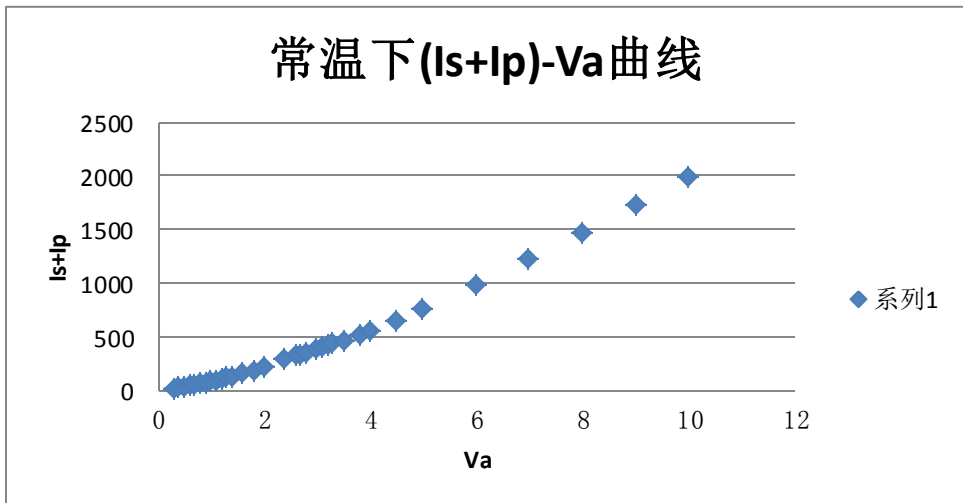


图 (9): 实验测得常温下  $(I_s+I_p)$ - $V_a$  曲线

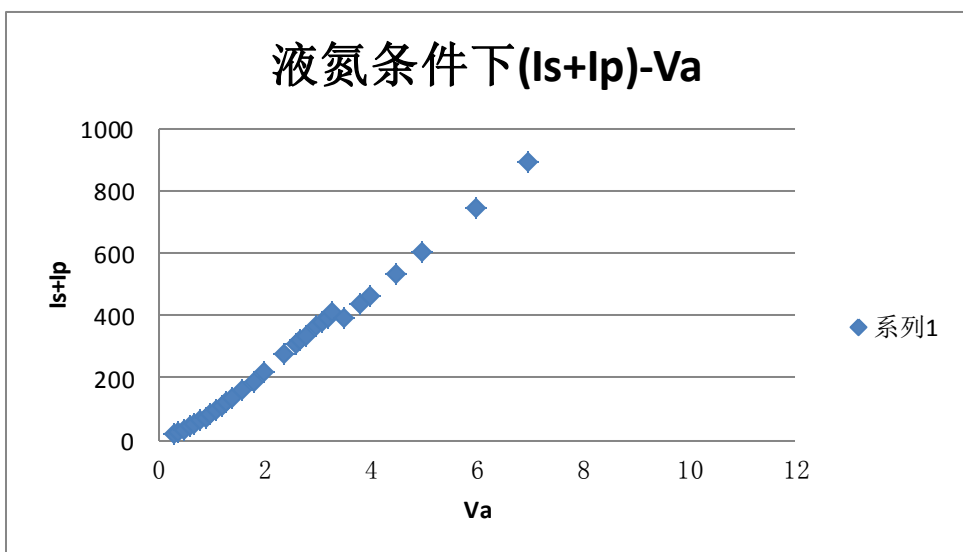


图 (10): 实验测得液氮条件下  $(I_s+I_p)$ - $V_a$  曲线

直流条件下第二次测量:

测量条件: 液氮条件下  $E_f=4.01\text{v}$   $E_c=0.09\text{v}$  常温  $T=19^\circ\text{C}$   $E_f=4.39\text{v}$   $E_c=0.09\text{v}$  分别进行测量, 为了验证  $I_s+I_p$  对整个实验最终结果的影响, 另外测得常温下  $I_s+I_p$  不与液氮条件下相等的一组数据, 根据测的数据进行数据处理并作图得:

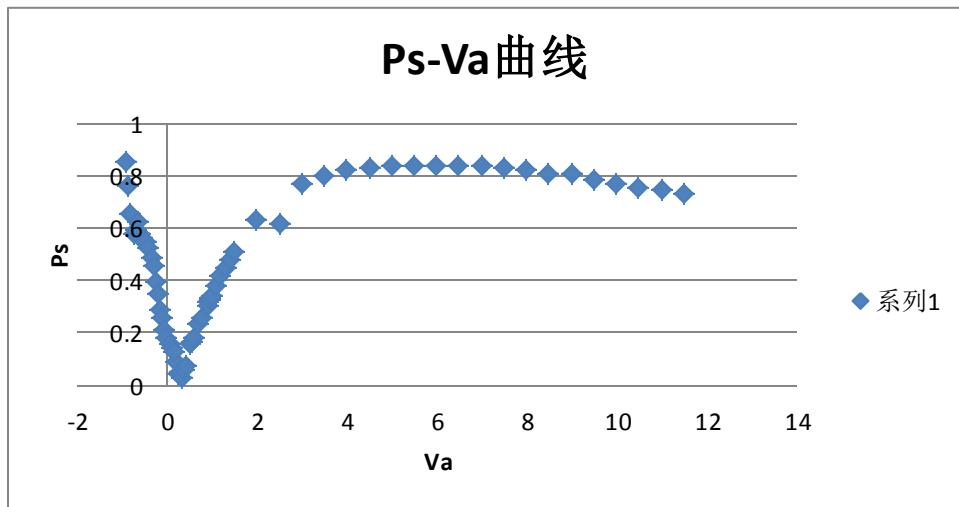


图 (11): 实验测得  $P_s-V_a$  曲线

去除前段不需要的数据点后并将图像向左平移  $v=0.98\text{v}$  得:

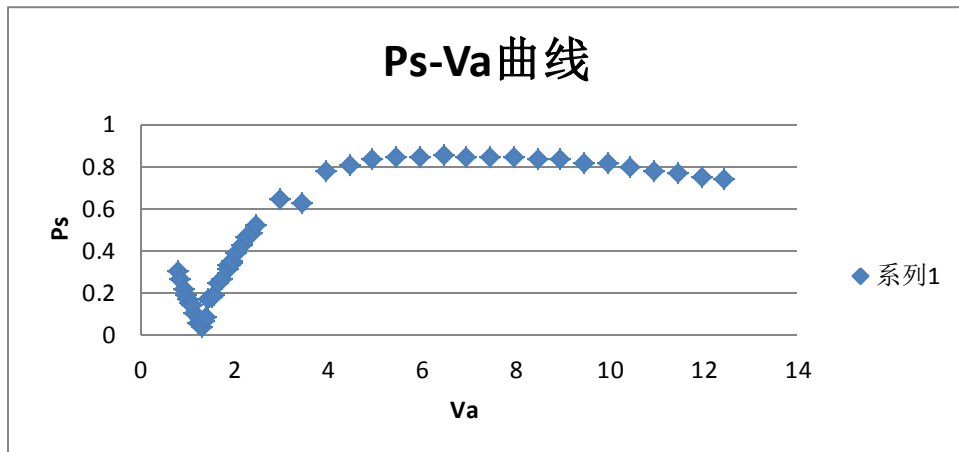


图 (12): 实验测得  $P_s-V_a$  曲线

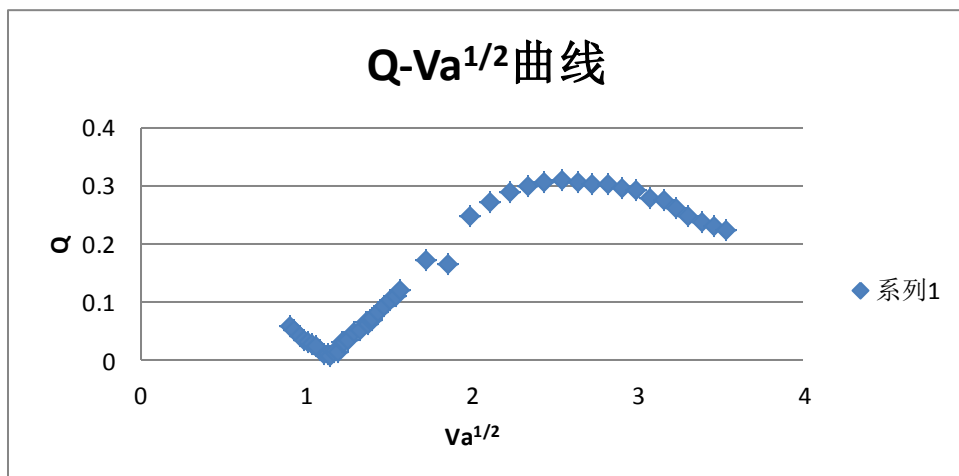


图 (13): 实验测得  $Q-V_a^{1/2}$  曲线

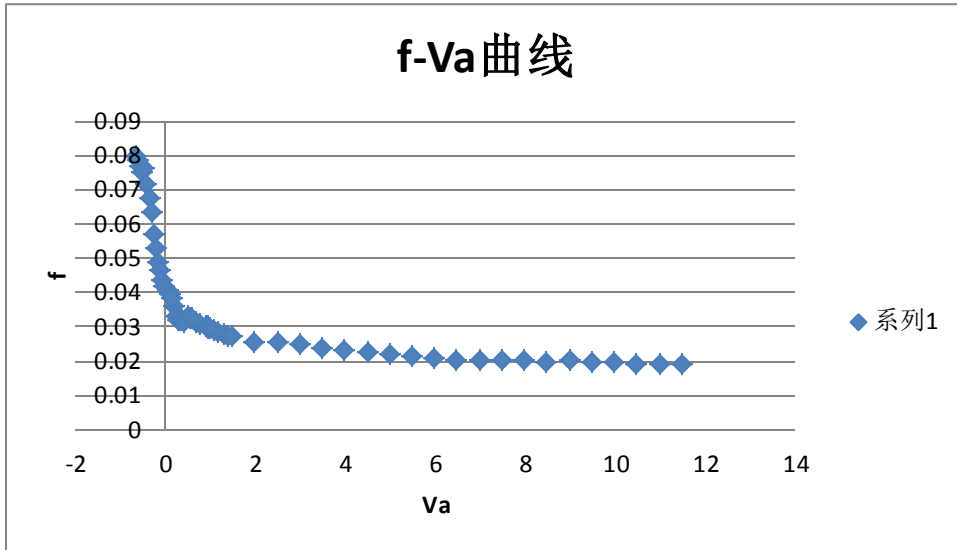


图 (14): 实验测得  $f$ - $V_a$  曲线

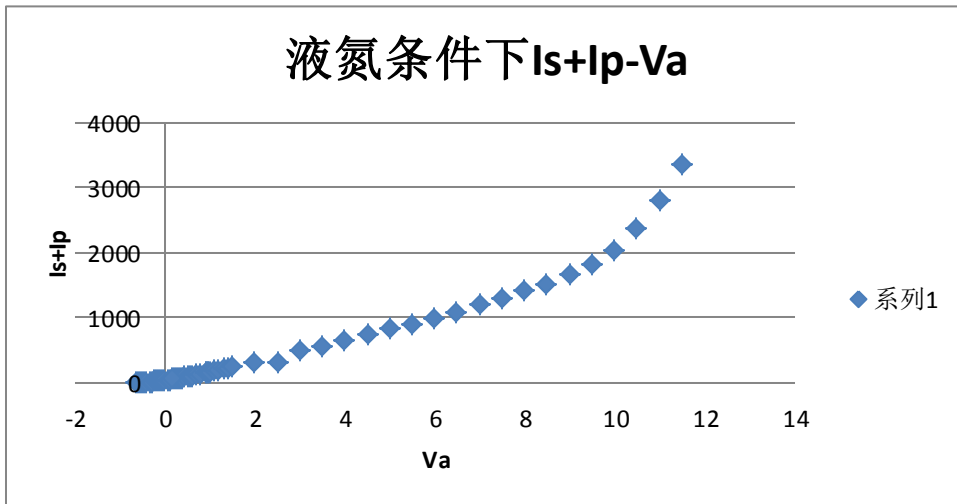


图 (15): 实验测得液氮条件下  $I_s+I_p$ - $V_a$  的曲线

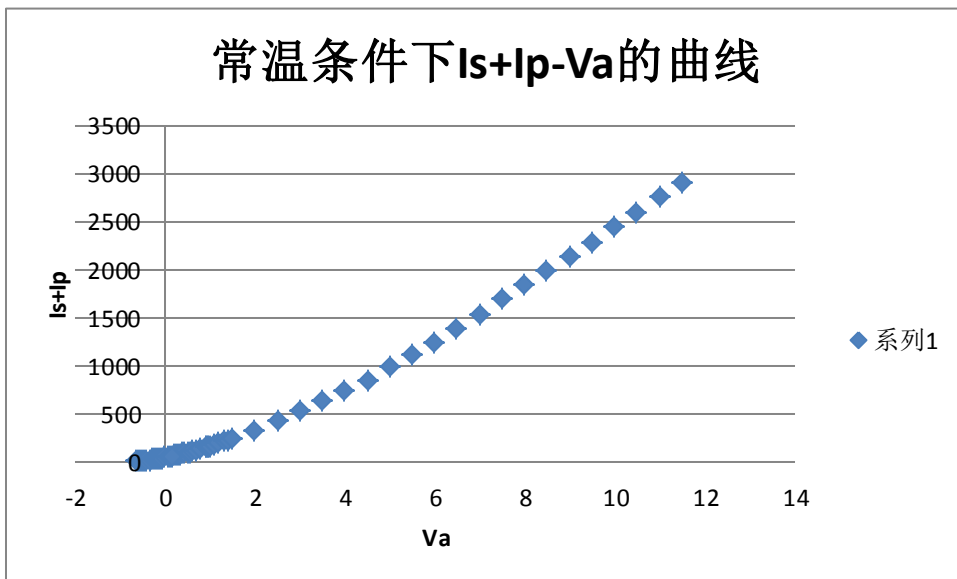


图 (16): 实验测得常温条件下  $I_s+I_p$ - $V_a$  的曲线

## 【实验结果与讨论】

### 1. 调节 $V_a=1V$ 时, $I_s+I_p=I_s^*+I_p^*$ 的合理性探究:

在一些实验手册中经常会在实验过程中要求调节在  $V_a=1v$  时 常温和液氮条件下的  $I_s+I_p$  相同, 对此我们进行如下分析得:

实验结果表明, 当仅保持常温和液氮条件下灯丝电压不变条件下  $P_s$  值与保持在液氮和常温下  $I_s+I_p$  相同时不同, 并且前者  $P_s$  出现了负值。因此实验证明了  $I_s+I_p$  的影响不能忽略, 鉴于  $f$  和空间电荷分布有直接关系, 而  $I_s+I_p$  对于不同情况下的电荷分布不能忽略, 所以  $I_s+I_p$  的不同会影响到前后不同条件下对应相同  $V_a$  值  $f$  是否相同, 进而影响  $P_s$  计算的合理性和准确性。尽管如此, 既然  $I_s+I_p$  对电荷的分布有着较大的影响, 观察实验测得的数据不难发现, 尽管我们在  $V_a=1v$  处进行了调零, 但是在整个  $0-10v$  范围内, 只有在调零处  $I_s+I_p$  近似相等 (因为实验仪器和实验条件的原因我们无法保证  $I_s+I_p$  的恒定不变, 但是可以保证两者相差在  $0.5\%$  之内), 其他处并不相等并且在个别  $V_a$  处存在较大的差异, 远远大于  $0.5\%$  的初始偏差范围, 数据如下:

第二次实验数据 $E_f=4.01$ $E_c=0.09$															
$(V_a+0.9s)^{1/2}$	$V_a$	液氮条件下			常温条件(未保持 $I_s+I_p$ 恒定)			常温条件(保证 $I_s+I_p$ 恒定)			$f$	$P_s$	$Q$	$P_s$	相差百分比
		$I_s$	$I_p$	$I_s+I_p$	$I_s$	$I_p$	$I_s+I_p$	$I_s$	$I_p$	$I_s+I_p$					
1.08627805	0.2	46.74	1.659	48.399	35.33	1.2	36.53	46.4	1.5	47.9	0.035494	0.089216	0.015575	0.043071	-1.04175
1.10905365	0.25	51.41	1.659	53.069	39.55	1.3	40.85	51.9	1.6	53.5	0.03227	0.044669	0.007616	-0.01859	0.805607
1.13137085	0.3	56.84	1.799	58.639	44.79	1.5	46.29	56.4	1.7	58.1	0.03165	0.047658	0.008139	-0.05812	-0.92771
1.15325626	0.35	62.16	1.96	64.12	49.92	1.6	51.52	61.9	1.9	63.8	0.031532	0.026541	0.004493	-0.01649	-0.50157
1.17473401	0.4	67.79	2.11	69.9	55.04	1.7	56.74	68	2	70	0.031126	0.05506	0.009439	0.007676	0.142857
1.19582807	0.45	73.39	2.26	75.65	59.76	1.8	61.56	73.5	2.1	75.6	0.030794	0.072187	0.012488	0.021894	-0.06614
1.21655251	0.5	78.8	2.57	81.37	65.76	2	67.76	80	2.2	82.2	0.032614	0.156809	0.028427	0.067473	1.009732
1.23693169	0.55	85.25	2.74	87.99	71.39	2.1	73.49	85.6	2.3	87.9	0.032141	0.164016	0.029658	0.08478	-0.10239
1.25699051	0.6	90.98	2.9	93.88	76.48	2.2	78.68	91.6	2.4	94	0.031875	0.178015	0.032672	0.097551	0.12766
1.29614814	0.7	103.58	3.22	106.8	88.73	2.4	91.13	104.8	2.5	107.3	0.031087	0.232641	0.044133	0.129917	0.465993
1.33416641	0.8	116.63	3.55	120.18	102	2.5	104.5	118.7	2.7	121.4	0.030438	0.2527	0.048548	0.194767	1.004942
1.37113092	0.9	130.65	3.89	134.54	114.35	2.6	116.95	132.7	2.7	135.4	0.029774	0.316635	0.063454	0.236348	0.635165
1.37840488	0.92	132.64	3.91	136.55	117.47	2.7	120.17	135.5	2.8	138.3	0.029478	0.299002	0.059208	0.220287	1.265365
1.3892444	0.95	137.18	4.04	141.22	121.67	2.7	124.37	140.1	2.8	142.9	0.02945	0.321376	0.064615	0.246489	1.175647
1.4	0.98	141.45	4.13	145.58	125.94	2.7	128.64	143.7	2.8	146.5	0.029198	0.332649	0.067407	0.265738	0.627986
1.40712473	1	143.84	4.19	148.03	129	2.7	131.7	147.4	2.8	150.22	0.02913	0.343224	0.070069	0.281479	1.457862
1.44222051	1.1	158.5	4.53	163.03	142.45	2.8	145.25	161.2	2.8	164.05	0.02858	0.381399	0.080049	0.312256	0.621782
1.47648231	1.2	173.85	4.86	178.71	157.18	2.9	160.08	177.2	2.8	180.09	0.027955	0.416592	0.089611	0.340007	0.768284
1.50996689	1.3	189.26	5.21	194.47	172.21	2.9	175.11	191.9	2.9	194.81	0.027528	0.449143	0.099938	0.388269	0.174529
1.54272486	1.4	207.5	5.56	213.06	187.6	2.9	190.5	207	2.9	209.92	0.026795	0.473552	0.106934	0.423089	-1.49581
1.57480157	1.5	223.3	5.92	229.22	202.3	2.9	205.2	223.6	2.9	226.51	0.026511	0.509105	0.118588	0.459284	-1.19642
1.72626765	2	308.8	7.8	316.6	282.1	2.8	284.9	304.5	2.8	307.32	0.025259	0.633356	0.167227	0.60705	-3.01965
1.86547581	2.5	398.9	9.85	408.75	362.5	2.7	365.2	387.3	2.7	390.01	0.024693	0.618002	0.18039	0.698364	-40.9424
1.99499873	3	494	11.91	505.91	443.2	2.6	445.8	469.8	2.6	472.42	0.024109	0.768685	0.243996	0.758674	-7.08903
2.11660105	3.5	596.7	13.97	610.67	523.6	2.6	526.2	551.8	2.6	554.4	0.023412	0.798743	0.267195	0.787904	-10.1497
2.23159136	4	703.5	16.09	719.59	604.9	2.6	607.5	635.8	2.6	638.41	0.022871	0.820515	0.288277	0.812069	-12.716
2.34093998	4.5	819.1	18.07	837.17	686.4	2.6	689	720.4	2.6	723.08	0.022061	0.831368	0.296673	0.828298	-15.7783
2.44540385	5	945.7	20.3	966	771.6	2.7	774.3	806.1	2.8	808.91	0.021466	0.837604	0.302953	0.836985	-19.42
2.54558441	5.5	1076.7	22.5	1099.2	856.5	2.9	859.4	893.8	3.0	896.81	0.020897	0.838847	0.304234	0.837915	-22.5678
2.64196896	6	1207.4	24.6	1232	942.5	3.1	945.6	984.3	3.2	987.65	0.020374	0.837941	0.3033	0.838565	-24.7532
2.73495887	6.5	1351	26.7	1377.7	1031.2	3.4	1034.6	1080.3	3.6	1083.86	0.019763	0.833256	0.298549	0.833168	-27.1105
2.82488938	7	1491.7	29.8	1521.5	1125.3	3.7	1129	1178.6	3.9	1182.53	0.019977	0.833087	0.29838	0.835412	-28.6648
2.91204396	7.5	1638	32.5	1670.5	1220	4.1	1224.1	1280.2	4.3	1284.56	0.019841	0.828352	0.293718	0.830623	-30.0445
2.99666481	8	1784.5	35.2	1819.7	1319.4	4.5	1323.9	1386.4	4.8	1391.28	0.019725	0.821555	0.287246	0.827094	-30.7932
0.72801099	-0.45	2.82	0.214	3.034	3.26	0.112	3.372	3.26	0.112	3.372	0.075887	0.547274	0.132078	0.547274	10.02372
0.76157731	-0.4	4.21	0.299	4.509	4.43	0.151	4.581	4.43	0.151	4.581	0.071021	0.520063	0.122335	0.520063	1.571709
0.79372539	-0.35	5.81	0.39	6.2	6.06	0.209	6.269	6.06	0.209	6.269	0.067126	0.488211	0.110999	0.488211	1.006554
0.82462113	-0.3	7.65	0.479	8.129	7.85	0.27	8.12	7.85	0.27	8.12	0.062614	0.450687	0.099848	0.450687	-0.11084
0.85440037	-0.25	10.52	0.594	11.114	10.15	0.346	10.496	10.15	0.346	10.496	0.058484	0.396275	0.084106	0.396275	-5.88796
0.88317609	-0.2	13.22	0.69	13.91	13.04	0.445	13.485	13.04	0.445	13.485	0.052194	0.34617	0.070818	0.34617	-3.15165
0.91104336	-0.15	16.74	0.804	17.544	16.19	0.552	16.742	16.19	0.552	16.742	0.048029	0.290109	0.057107	0.290109	-4.79035
0.93805315	-0.1	19.6	0.898	20.498	19.45	0.665	20.115	19.45	0.665	20.115	0.045816	0.253754	0.048783	0.253754	-1.90405
0.96436508	-0.05	23.79	1.028	24.818	22.72	0.775	23.496	22.72	0.775	23.496	0.043211	0.210604	0.039415	0.210604	-5.63099
0.98994949	0	28.05	1.162	29.212	27.6	0.937	28.537	27.6	0.937	28.537	0.041426	0.180484	0.033174	0.180484	-2.36535
1.01488916	0.05	32.54	1.3	33.84	31.59	1.063	32.653	31.59	1.063	32.653	0.039951	0.157711	0.028607	0.157711	-3.63519
1.03923048	0.1	36.92	1.432	38.352	35.95	1.2	37.15	35.95	1.2	37.15	0.038787	0.139401	0.025021	0.139401	-3.23553
1.06301458	0.15	41.8	1.577	43.377	40.82	1.344	42.164	40.82	1.344	42.164	0.037727	0.127288	0.022692	0.127288	-2.87686

比较数据得出:

在个别位置甚至出现了 40% 的偏差, 因此保证  $I_s+I_p$  恒定是否合理, 或者说即便可以保证在  $1v$  时的电荷分布不变, 但是本身的意义是否重要还有待商榷, 和进一步的实验探讨, 毕竟这种关系在其他位置均未得到满足。

### 2. 灯丝电压的选择:

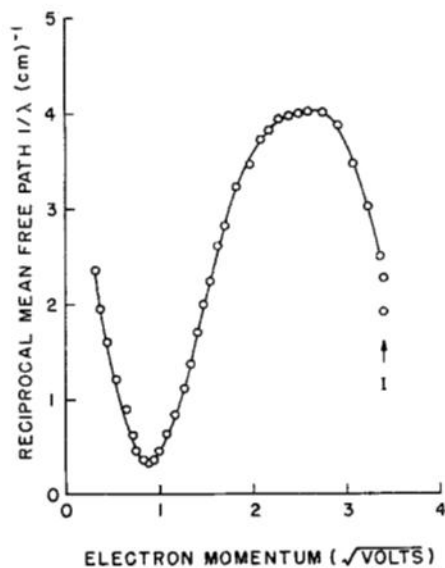


FIG. 5. The cross section times density  $n\sigma=1/\lambda$  as a function of  $(V-V_s)^{1/2}$ , where  $V-V_s$  is the electron energy. Ionization occurs at "I".

比较第一次和第二次测量得到的  $P_s-V_a$  和  $Q-V_a^{1/2}$  图像得:

第一次测量值最小值在 0.92v 出现, 而最大值在测量范围 (0-7v) 内未有明确的点, 可以认为最大值在 7v 以外, 而第二次测量  $P_s$  最小值在 1.3v 附近处出现, 而最大值则在 6.48v 处取得(此处经过左右校正)。

比较前后两次实验参数的不同, 发现实验参数在灯丝电压上存在较大的差异(因为仪器不同所以补偿电压不同), 比较理论值最小值应在 0.9v 出现, 最大值应在 6.5v 出现, 对

此比照前人的数据, 发现在灯丝电压较低时最小值均在 0.9v 左右误差在 10%以内, 而此时测得的  $P_s$  最大值则有较大的偏差, 在 20%左右, 鉴于以往数据均是在较低电压下 ( $E_f < 3v$ ) 测得, 根据第二次测量, 是否可以认为在较高的灯丝电压下, 由于较大的电子数, 会导致散射截面最大值处比较准确。

进一步的分析得, 在较低的灯丝电压下 ( $< 3v$ ),  $P_s$  的最小值所对应的电压较好的符合了书上给出的电压值, 然而  $P_s$  最大值对应的  $V_a$  值则有较大的偏离, 相反在较高的灯丝电压下 ( $> 4v$ ), 在  $P_s$  最小值所对应的  $V_a$  值存在着较大的偏离, 在  $P_s$  最大值对应的  $V_a$  值则和理论值吻合较好. 对此猜测, 查阅相关文献得到:

根据文献中的条件, 灯丝电压为 4v, 整个实验过程中没有对阴极和屏蔽极之间的接触电位差进行修正, 这一值文献中实验条件约为 0.4v, 这个值是通过比较电离时的电位  $V-V_s$  与电离电位的公认值的差值得到的. 因此实际的电子的加速电压应为  $V-V_s+0.4v$  此时与我们所进行的实验测得值较为接近, 但仍然和我们书中给出的理论值有较大误差, 查阅相关文献, 分析理论值的计算过程, 由于相关文献中并未给出具体的理论值, 所以理论值本身是否准确还有待考证. 尽管如此: 但是较高的灯丝电压也会带来一定的负面影响, 如可能会导致空间电荷的影响增大, 因为较低的阴极温度时电子动能较小, 这样电子的动能也较小, 这样电子的能量分布就较窄, 较高的灯丝电压会导致阴极温度较高, 电子的动能较大, 这样电子的能量分布就会较宽, 这就要求在开始测量前要对加速电压比照  $I_s, I_p$  进行调零, 保证电子能量的分布范围在较小的范围内。

### 3. $f-V_a$ 关系的分析:

两次图像存在着较大的差异, 甚至随  $V_a$  变化的趋势也不尽相同, 考虑到其他图像处理的一致性, 无法判断哪个图像更为合理, 此处还需要进一步的实验, 来深入探究  $f-V_a$  的关系。

### 【结论】

通过实验, 利用充气闸流管, 测量了与电子、原子碰撞过程有关的三条曲线, 即  $P_s-V$  曲线、 $Q-V$  曲线、 $f-V$  曲线, 验证了冉绍尔-汤森效应, 并计算出散射截面最小时的电子能量



约为 1.30eV, 实验过程中调节  $V_a=1v$  时,  $I_s+I_p=I_{s*}+I_{p*}$  的合理性还有待进一步实验, 为了测得较准确的  $P_s$  的最小值对应的  $V_a$  应选择灯丝电压小于 3V 为宜, 若想测得较准确的  $P_s$  最大值对应的  $V_a$  应选择灯丝电压 4V 左右为宜, 同时开始测量前要对加速电压比照  $I_s, I_p$  进行调零, 保证电子能量的分布范围在较小的范围内。

#### 【致谢】

感谢复旦大学物理教学实验中心的马世红老师对本次实验所做的指导。

#### 【参考文献】

1. 戴道宣, 戴乐山, 《近代物理实验第二版》, 高等教育出版社, 2006
2. 吴思成, 王祖全, 《近代物理实验》, 北京大学出版社, 2001
3. 曾谨言. 量子力学(第二卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2000
4. 胡永茂, 张桂樵, 李汝恒, 陈丽等, 氙原子散射截面反常现象的观测分析, 物理实验, 2008, 28 (7)
5. FD-RTE-A 型冉绍尔—汤森效应实验仪使用说明, 上海复旦天欣科技仪器有限公司
6. The FranckHertz Experiment and the RamsauerTownsend Effect: Elastic andInelastic Scattering of Electrons by Atoms
7. Kukolich S G. Demonstration of the Ramsauer-Townsend effect in a xenon thyratron, Mott N F, Massey H S W. The theory of atomic collisions. 3rd ed. London:Oxford University Press, 1986
8. O'Malley T F. Extrapolation of electron-rare gas atom cross sections to zero energy, Phys. Rev., 1963, 130:1020-1029