



实 验 教 学

冉绍尔 - 汤森效应及其电流电压关系

曹钧植, 杨新菊, 姚红英

(复旦大学 物理系, 上海 200433)

摘 要: 电子流在与气体闸流管中稀有气体作用时, 出现经典理论无法解释的冉绍尔-汤森效应, 即气体散射截面和电子速度有关. 研究了此过程中几何因子、散射概率和总散射截面随电子速度的变化规律, 验证了冉绍尔-汤森效应. 探究了实验中出现的阴极电流和加速电压偏离二分之三关系的现象, 利用排除法确定了可能的原因: 经典 Drude 模型无法较好地描述电子和气体的碰撞.

关键词: 冉绍尔-汤森效应; 气体闸流管; 二分之三关系; 总散射截面

中图分类号: O562.5 文献标识码: A 文章编号: 1005-4642(2015)03-0001-05

1 引 言

物理学家冉绍尔和汤森发现在电子和气体的碰撞中, 气体散射截面和电子速度相关^[1], 该现象称之为冉绍尔-汤森效应. 而在经典理论中将气体视为小球, 则气体散射截面和电子速度无关, 因此冉绍尔-汤森效应需要用量子力学解释^[2-3].

实验中采用气体闸流管体系, 加热灯丝产生热电子并且用电场加速电子, 使电子和气体分子碰撞并且通过收集闸流管中不同极板的电流, 分别在常温下和液氮温度下进行实验, 得到各极板电流随加速电压变化关系, 最终计算出闸流管几何因子 f 、气体散射概率 P_s 和总散射截面 Q 随电子速度 v_a 的变化, 验证了冉绍尔-汤森效应. 同时通过总电流和加速电压关系偏离二分之三定律的位置确定气体电离电压.

2 实验原理

2.1 冉绍尔-汤森效应

冉绍尔-汤森效应是指气体散射截面和电子速度相关的现象, 对于稀有气体原子, 其关系如图 1 所示, 气体的总散射截面与电子速度有关. 可以通过量子力学中的分波带法, 求解电子在原子势场中波函数从而得到此结果^[2].

2.2 气体闸流管

ZQI 0.1/1.3 型气体闸流管结构如图 2 所

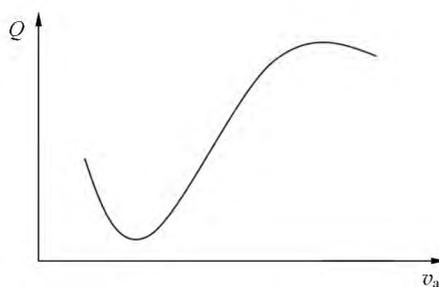
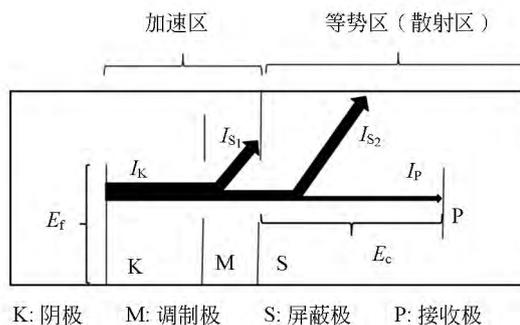


图 1 冉绍尔-汤森效应



K: 阴极 M: 调制极 S: 屏蔽极 P: 接收极

图 2 气体闸流管的结构

示, 其中充有稀薄的 Kr 和 Xe 混合气体, 使用电压 E_f 加热阴极, 溢出热电子形成阴极电流 I_K ; 之后在 K 和 S 之间施加加速电压 E_a 加速电子, 电子经过加速后到达等势区与气体分子碰撞, 未经散射的电子到达 P 极板, 未通过 S 极小孔的电子

收稿日期: 2014-07-25; 修改日期: 2014-10-21

作者简介: 曹钧植(1992-), 男, 上海人, 复旦大学物理系 2011 级本科生.

通讯作者: 姚红英(1966-), 女, 辽宁辽阳人, 复旦大学物理系讲师, 硕士, 从事物理实验教学工作.

形成电流 I_{S_1} , 通过 S 的电子形成电流 I_0 , 一部分未到达 P, 形成 I_{S_2} , 其他的电子打在 P 极板上形成电流 I_P , 为了补偿接触电势差和空间电荷分布造成的电势差, 实验中在 S 和 P 之间施加额外的电压 E_c 进行补偿. 实验中测量出屏蔽极电流 I_S 和收集极电流 I_P , 各部分电流之间有如下关系:

$$I_K = I_{S_1} + I_{S_2} + I_P,$$

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

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

其中只有 I_S 和 I_P 可以测量到.

2.3 计算几何因子 f 、散射概率 P_s 及总散射截面 Q

定义几何因子 f , 刻画 I_0 和 I_{S_1} 的关系:

$$f = I_0 / I_{S_1}, \quad (1)$$

几何因子与气体闸流管结构、空间电荷分布及电子速度均有关系. 定义散射概率 P_s 刻画电子在等势区内的散射

$$P_s = 1 - \frac{I_P}{I_0}, \quad (2)$$

结合式(1)和(2)得到

$$P_s = 1 - \frac{I_P}{f I_{S_1}}. \quad (3)$$

为了计算 P_s , 需要计算几何因子 f . 在低温下认为气体液化, 散射作用忽略不计, 如果低温下测量得到的 I_S 和 I_P 分别记作 I_S^* 和 I_P^* , 那么

$$f = \frac{I_P^*}{I_S^*}.$$

在加速电压 E_a 和灯丝阴极温度相同的条件下, 低温下的几何因子和常温下的几何因子应相同. 实验中 $f \ll 1$, 因此 $I_S \approx I_{S_1}$, 最终可以得到

$$P_s = 1 - \frac{I_P I_S^*}{I_S I_P^*}. \quad (4)$$

假设 L 为出射孔 S 和极板 P 的距离(实验中 $L = 6.5 \text{ mm}$), 那么

$$P_s = 1 - e^{-n\sigma L}, \quad (5)$$

其中, n 是气体薄层的面密度, σ 是单个气体原子的散射截面, 定义 $Q = n\sigma$ 为总的散射截面^[4], 因此有

$$Q = -\frac{1}{L} \ln(1 - P_s). \quad (6)$$

2.4 二分之三关系及电离电压的测量

理想真空二极管工作在空间电荷区时, 阳极电流和阳极电压的 $3/2$ 次方成正比, 即 Child-Langmuir 定律. 如果把气体闸流管视为工作在

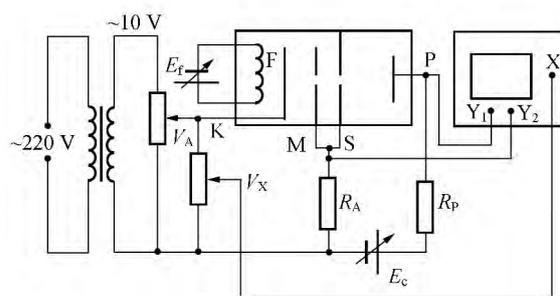
空间电荷区的理想真空二极管, 则有

$$\ln I_K = \frac{3}{2} \ln E_a + \ln k. \quad (7)$$

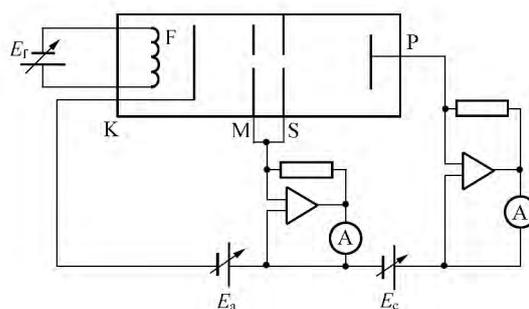
I_K 为 $I_S + I_P$, k 为斜率, 和电极形状有关, 实验中保持不变. 实验中增大电子加速电压 E_a , 如果出现电离, 那么 I_K 会突然增大, 偏离二分之三关系, 以此确定气体原子电离电压. 实验中测量的是 Xe 的电离电压, 公认值为 12.13 V .

3 实验内容

实验线路图如图 3 所示^[3].



(a) 使用交流加速电压接线图



(b) 使用直流加速电压接线图

图 3 直流电路和交流电路接线图

1) 交流电路下观察大致趋势: 常温下观察 I_P 和 I_S 随加速电压变化趋势; 低温下观察 I_P^* 和 I_S^* 随加速电压变化趋势.

2) 直流电路下精确测量: 常温下测量 I_P 和 I_S 与加速电压关系, 调节补偿电压 E_c 使 I_S 和 I_P 同时出现以确定 E_c ; 低温下测量 I_P 和 I_S 与加速电压关系(注意调节 E_c 保证阴极电流和常温相同).

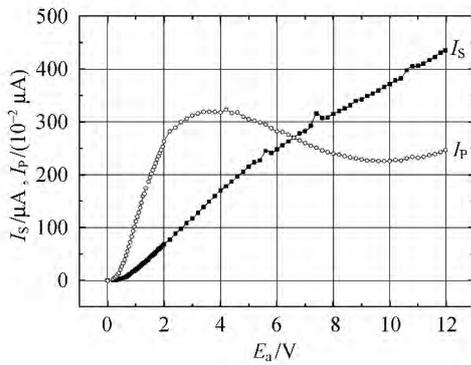
3) 根据直流电路的结果计算几何因子 f 、散射概率 P_s 和散射截面 Q 随加速电压变化趋势, 验证冉绍尔-汤森效应.

4) 通过阴极电流 I_K 和加速电压 E_a 的关系确定 Xe 原子的电离电压.

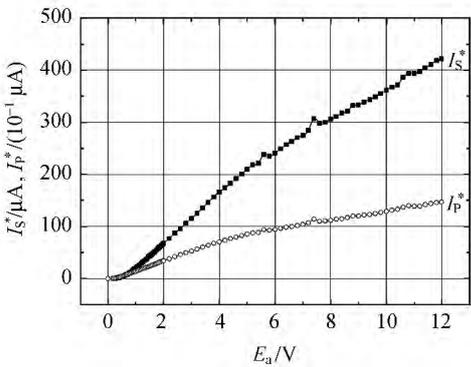
4 实验结果及讨论

4.1 屏蔽极电流 I_S 和收集极电流 I_P 随加速电压 E_a 的变化

在 $E_a = 1 \text{ V}$ 时, 保持灯丝温度不变(方法是调节 E_f 让低温下 I_K^* 等于常温下 I_K , 实验测得常温下灯丝电压为 $E_f = 2.30 \text{ V}$, 低温下灯丝电压为 $E_f = 2.26 \text{ V}$, $E_c = 0.66 \text{ V}$) 得到常温下 I_S, I_P 和低温下 I_S^* 和 I_P^* 随着加速电压 E_a 的变化, 如图 4 所示. 发现无论在常温下还是低温下, $I_P (I_P^*) \ll I_S (I_S^*)$; 常温下 I_S 和 I_P 变化差距很大, 而低温下 I_S^* 和 I_P^* 变化类似, 这是由于低温下气体几乎没有散射.



(a) 常温下 I_P 和 I_S 随 E_a 变化



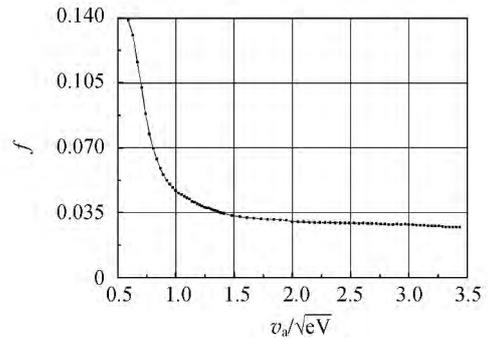
(b) 低温下 I_P^* 和 I_S^* 随 E_a 变化

图 4 板极电流随电子速度 E_a 的变化规律

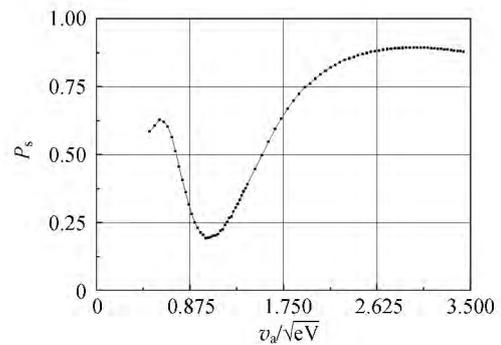
4.2 几何因子 f 、散射概率 P_s 和散射截面 Q 随电子速度 v_a 的变化关系

根据式(1), (4)和(6)计算出的几何因子 f 、散射概率 P_s 和总散射截面 Q 如图 5 所示, 图 5

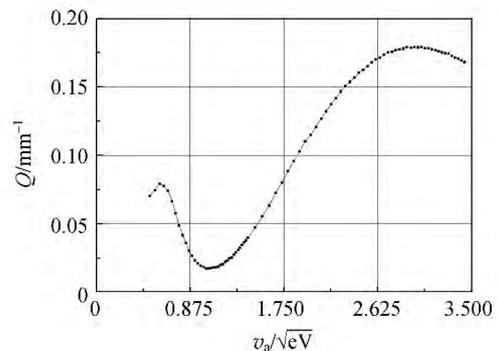
(c)和图 5(b)显示总散射截面和散射概率第一次极小值出现在 $v_a = 1.02 \sqrt{eV}$, 第一次极大值出现在 $v_a = 2.97 \sqrt{eV}$; 同时, 这两者的变化趋势和常温下 I_P 随着电子速度变化的趋势[图 4(a)]恰好相反, 这是因为气体散射越大, 能够被 P 极板收集到的电子越少, I_P 也就越小. 再结合图 4 发现在 E_a 较大时, I_S, I_S^*, I_P^* 和 E_a 的关系大致为线性, 该现象使笔者对二分之三定律在该体系中是否成立发生了兴趣.



(a) f 随 v_a 变化规律



(b) P_s 随 v_a 变化规律

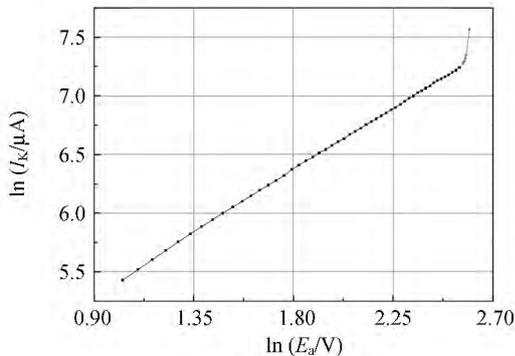


(c) Q 随 v_a 变化规律

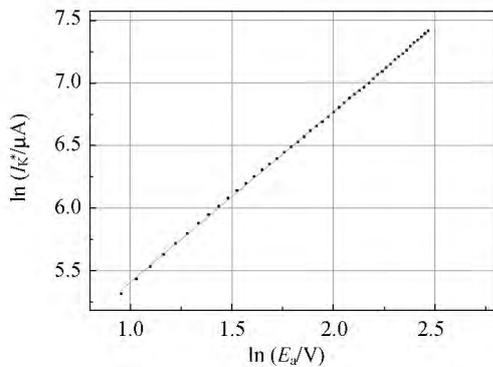
图 5 几何因子 f 、散射概率 P_s 和总散射截面 Q 随电子速度 v_a 的变化

4.3 电离电压测量以及偏离二分之三关系现象的确定

根据 I_K 和 E_a 的关系[图 6(a)]确定 Xe 原子电离电压为 13.0 V(标准值 12.13 V). 从图 6(a)和图 6(b)中 2 条直线的斜率可以看出,无论是低温还是常温, I_K 和 E_a 的关系都偏离二分之三关系,低温下更接近.



(a)常温下 $\ln I_K$ 和 $\ln E_a$ 的关系(直线部分斜率 1.21)



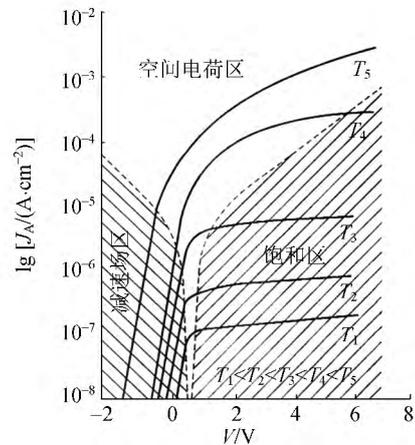
(b)低温下 $\ln I_K^*$ 和 $\ln E_a$ 的关系(直线部分斜率 1.36)

图 6 阴极电流 $\ln I_K$ 和加速电压 $\ln E_a$ 的关系

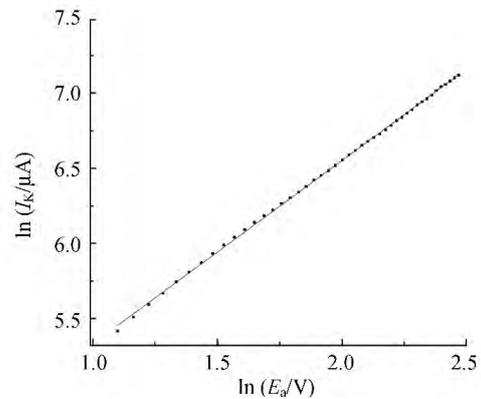
4.4 分析偏离原因

首先考虑二分之三定律成立的条件是否满足. 二分之三定律要求体系为真空理想二极管,并且工作在空间电荷区. 由于体系为充有稀薄气体的气体闸流管,接近真空,参考文献[1]中也认为可以近似为真空理想二极管,所以暂时假设其成立. 同时,工作在空间电荷区的条件也可以满足,如图 7(a)所示,经过计算发现 I_K-E_a 关系位于空间电荷区内,实际上大多数电子管都工作在这个区域. 因此可以判断:如果实验中的气体闸流管能够等效为理想二极管,那么二分之三关系应该成立.

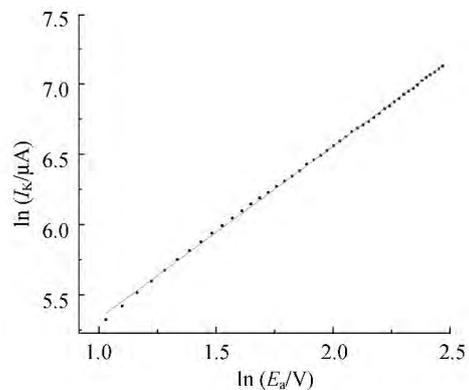
其次,从 E_a 和 I_K 测量准确性的角度考虑. 首先考虑 E_a 的测量,参考气体闸流管的结构(图 2),可以发现因为 S 和 P 的电荷分布不同,可能会引入额外的电势差,这样就会使电子在等势区内被加速,造成偏差,实验中消除该偏差的方法是



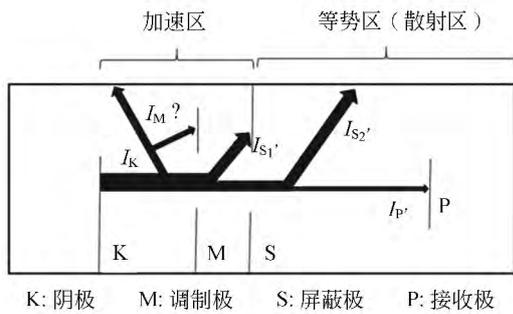
(a)理想二极管工作在空间电荷区的条件



(b) $E_c = 0$ V 时电流电压关系(直线斜率 1.21)



(c) $E_c = 0.66$ V(恰好补偿)时电流电压关系(直线斜率 1.22)



K: 阴极 M: 调制极 S: 屏蔽极 P: 接收极

(d) 假设 I_M 的存在造成电流无法被全部收集

图 7 分析偏离二分之三定律的可能原因

在 S 和 P 之间加入补偿电压 E_c (实验中为 0.66 V), 调节 E_c 大小直到灵敏电流计上 I_s 和 I_p 同时出现. 事实上这个“同步”的判断是通过人眼进行的, 未必可以准确地确定 E_c , 因此, 设计实验探究 E_c 大小对于 I_K-E_a 关系的影响, 如图 7 (b)和(c). 分别固定 $E_c=0$ 和 $E_c=0.66$ V(恰好补偿), 计算得到 2 组数据斜率分别为 1.21 和 1.22, 十分接近而且偏离 1.5 较远. 这说明 E_c 偏离实际值的解释行不通. 同时, 进行理论分析, S 和 P 之间如果存在电势差, 会让记录的 E_a 小于或大于实际加速电压, 可能会导致式(7)中 $\ln E_a$ 项变为 $\ln(E_a - V')$, 不过实验证实, 对于斜率的影响不大, 可以忽略. 对于 K 和 S 之间存在的电势差, 使用类似的分析方法, 也能排除 K 和 S 之间电势差的影响. 参考文献[5]给出这一电势差约为 0.4 V, 其效果与 S 和 P 之间的类似, 而且数值小于 0.66 V, 所以产生的影响应该可以忽略, 因此可以排除 E_a 测量准确性的原因. 分析是否有可能是 I_K 测量不准确造成实验偏差. 参考图 2 的气体闸流管结构, 提出假设: 是否因为存在 I_M 电流[如图 7(d)]或者打到外壳上的电流没有办法被收集, 导致斜率偏小. 将闸流管拆开后发现 M 极板, 外壳和 S 相连, 因此假设不成立.

第三, 在排除了 I_K 和 E_a 测量不准确造成偏离后, 发现开始的假设未必成立, 把气体闸流管近似为真空理想二极管较为粗糙, 与实际偏差很大. 首先利用 Drude 模型分析工作在空间电荷区的理想二极管^[6], 将电子视为小球, 在电场中加速运动直至碰撞到气体原子失去速度信息, 得到

$$I_K = kE_a^{\frac{3}{2}}\lambda, \quad (8)$$

其中 k 和二极管结构有关, λ 为平均自由程,

$$\lambda = 1/Q, \quad (9)$$

只要 λ 不随 v_a 变化, 那么二分之三关系成立. 但是这里使用的 Drude 模型实际上仅仅在电子为自由电子气的情况下成立, 是完全的经典模型, 弛豫时间 τ 由气体原子数密度和气体原子性质决定, 和加速电压没有关系, 根据式(9) 散射截面应该和加速电压也没有关系. 而实验中出现的冉绍尔-汤森效应, 已经说明了散射截面随着加速电压的变化, 经典的模型无法解释. 所以严格地讲, 实验中出现的电子受到气体原子散射, 不可以使用类似于 Drude 模型的方法去解释, 而是要考虑电子在原子周期势场中的波函数行为去解释. 所以, 只有在完全真空的情况下, 2 个模型刻画的 I_K-E_a 关系才相符, 因此会产生 I_K-E_a 关系的偏离. 参考文献[1]认为对于低压的气体闸流管, 电流也能很好地满足二分之三定律, 但实际上偏差很大.

从实验结果图 6(a) 常温下 $\ln I_K$ 和 $\ln E_a$ 关系的直线部分斜率 1.21 和图 6(b) 低温下 $\ln I_K$ 和 $\ln E_a$ 关系的直线部分斜率 1.36, 可以推出结论: 在低温下二分之三关系符合得更好. 因为低温下气体液化, 管内接近真空, 所以更加接近经典模型, 因此二分之三关系符合得更好.

5 结 论

实验观察到了冉绍尔-汤森效应, 测量得到 Xe 和 Kr 混合气体的散射截面在电子速度 $v_a = 1.02 \sqrt{eV}$ 时有一极小值, 此时散射很小, 气体几乎“透明”; 真空二极管假设对于低气压的充气闸流管不是很好的近似. 常温及低温下, 电流均不能很好地满足二分之三关系.

致谢: 感谢乐永康老师对于阴极电流产生机理的点拨!

参考文献:

[1] 戴乐山, 戴道宣. 近代物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 78.
 [2] O'Malley T F. Extrapolation of electron-rare gas atom cross sections to zero energy [J]. Physics Review, 1963, 130(3): 1020.
 [3] 顾恩遥, 白翠琴, 吕景林. 冉绍尔-汤森效应实验仪自动化改进[J]. 物理实验, 2013, 33(11): 11-15.

(下转第 9 页)

Measuring surface tension coefficient based on NI myDAQ

CUI Xin-tu, SHEN Han, FANG Yi-zhong, WANG Gang, LIAO De-ju, FENG Rao-hui
(School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A system of measuring the surface tension of liquid was designed based on NI myDAQ and LabVIEW. A force sensor and a displacement sensor were integrated into the system, therefore, the surface tension and the liquid level could be quickly recorded at the same time. The precisions were 10^{-5} N and 0.01 mm, respectively. By using this system, the surface tensions of water, alcohol, and their mixture were measured. It was found that the surface tension coefficient nonlinear decreased with the volume fraction of alcohol.

Key words: NI myDAQ; surface tension coefficient; strain type force sensor; liquid level sensor; LabVIEW

[责任编辑:任德香]

(上接第5页)

[4] 胡永茂,张桂樯,李汝恒,等. 氙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.

[5] Kukolich S G. Demonstration of the Ramsauer-

Townsend effect in a xenon thyratron [J]. American Journal of Physics, 1968,36(8):701-703.

[6] 陈博贤,刘光治,夏善红,等. 平行平面形真空微电子二极管中的二分之三次方关系式[J]. 真空电子技术,2001(3):7-10.

Ramsauer-Townsend effect and the relation of its current and voltage

CAO Jun-zhi, YANG Xin-ju, YAO Hong-ying
(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: When electrons interact with rare gas in the thyratron, Ramsauer-Townsend effect will appear, which can't be explained by the traditional model. The scattering cross-section will change as the speed of electron varies. The variation of geometric factor, scattering probability and total scattering cross-section were explored when the speed of electrons changed, then the Ramsauer-Townsend effect was demonstrated. Deviation from the Child-Langmuir law was observed, and possible explanation for it was researched. By using exclusive method, a possible explanation was found and demonstrated.

Key words: Ramsauer-Townsend effect; gas thyratron; Child-Langmuir law; total scattering cross-section

[责任编辑:任德香]