# 等离子体物理实验

#### 实验者: 张枫 10300190024

一、 引言

等离子体(Plasma)是一种由自由电子和带电离子为主要成分的物质形态, 广泛存在于宇宙中,常被视为是物质的第四态,被称为等离子态,或者"超气态"。 等离子体具有很高的电导率,与电磁场存在极强的耦合作用。等离子体是由克鲁 克斯在 1879 年发现的,1928 年美国科学家欧文•朗缪尔和汤克斯(Tonks)首 次将"等离子体(plasma)"一词引入物理学,用来描述气体放电管里的物质形 态。严格来说,等离子是具有高位能动能的气体团,等离子的总带电量仍是中性, 借由电场或磁场的高动能将外层的电子击出,结果电子已不再被束缚于原子核, 而成为高位能高动能的的自由电子。本实验以直流辉光等离子体为例,分析气压、 电势差等参数对等离子体的影响,并基于此验证帕邢定律。

二、 实验原理

1、等离子体:由电子、离子和中性粒子组成的,宏观上呈现准中性,且具有集体效应的混合气体。

等离子体必须满足三个条件:

- 1) λ<sub>D</sub> » n<sup>-1/3</sup>, 等离子体的德拜长度大于粒子间平均距离;
- 2)  $\lambda_{\rm D} \ll L$ ,德拜长度远小于等离子体的特征长度;
- 3)  $\omega_{\rm p} > \nu_{\rm c}$ , 等离子体震荡频率大于碰撞频率。
- 2、德拜长度:等离子体内电荷被屏蔽的半径,表示等离子体能保持的最小尺度。 当正负电荷置于等离子体内部时就会在其周围形成一个异号电的"鞘层", 其厚度可用德拜长度λ<sub>0</sub>来描述,

$$\lambda_{\rm D} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_0 e^2}}, n_0$$
: 等离子体密度,  $T_e$ : 电子温度。(式1)

德拜势:

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} e^{-\mathbf{r}/\lambda_D} \quad ( \not \exists 2 )$$

- 3、 电子温度:  $T_e = \frac{eI_s}{2k \frac{dI}{dv}|_{I=0,V=0}}$ ,  $I_s$ 饱和离子电流。(式3)
- 4、 帕邢定律:  $U = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right)}\right)}$ 。 (式 4)

A、B为常数, p为压强, d为极板间距, γ为二次电子发生电离系数。

#### 5、 实验仪器

DH2005型直流辉光等离子体实验装置。



## 三、 实验内容

- 1) 等离子体的 I-V 特性测量
- 2) 气体击穿电压与电极间距的关系
- 3) 双探针法测电子温度
- 4) 德拜屏蔽现象观察
- 保持放电电压、压强不变,将万用表正极接探针,负极分别接阳极板和阴极 板,记录电压示数;
- 保持极板间距不变,改变探针与极板的相对距离,记录万用表示数;
- 保持基板间距不变,分别改变放电电压与压强,记录万用表示数。

### 四、 数据处理

1) 等离子体的 I-V 特性测量(见图 1)

当放电管极板间距保持 69mm 不变时,可以观察到气压变大,辉光电流随极 板间电压升高而增长更快。(但是在压强、电压升高后,阴极极板周围出现了径 向放电,直接导致辉光电流不再稳定,使得扫参区域受到限制,故只在 10Pa 压 强附近扫描参数。)

解释:

这是由于气体放电时电子的平均自由程λ与压强P成反比,因此极板间距不变 而增大压强,意味着电子行进λ所获得的能量将降低,所以发生激发和电离的几 率也随之降低,更多的电子得以到达阳极板。

2) 气体击穿电压与电极间距的关系/帕邢定律(见图 2)

如图 2 所示,极板间距一定时,击穿电压随着压强的增大而增大。同时压强 一定时,击穿电压随极板间距的增大而增大。但是 d=112m, P=33Pam 观测到的 数据出现了很大的波动。

解释:

这有可能是仪器精密度造成的误差,由于实验所用的真空计并不是直接连通 放电管,中间由一根螺旋状的细管连通,其示数并不能反映放电管内实际压强, 现有实验条件也无法确定该示数与管内实际压强是否是线性对应关系,而整个实 验是基于该假设而操作的。

其次真空计精度有限,无法很灵敏地反映出 1Pa 压强区间内的变化,实验过程中发现往往真空计示数不变时,电流计示数仍在持续地增大(减小),几分钟后真空计示数也开始相应增大(减小)。而由实验部分 1)可以知道,电流随压强的响应灵敏度达到了 0.1Pa 量级,此处测得的击穿电压很有可能对应的是低于33Pa 的压强。

保持压强与极板间距乘积不变,如下表发现击穿电压大致稳定在400V左右, 符合帕邢定律。

P/Pa	d/mm	Pd/Pa*m	V/V
50	75	3.75	403
42	89	3.74	399
38	99	3.76	433
33	112	3.70	381

3) 双探针法测电子温度

d=75mm

P/Pa	V <sub>放电</sub> /V	P/W	Is/μA	dI/dV(I=0,V=0)	Te/K
20	320	0.176	1.32	0.27	28341
20	370	0.459	3	0.35	49689
20	500	1.180	8	0.7	66253
40	252	0.176	0.36	0.1	20870

如图 3 可知压强一定时,放电功率越大,相同电压下探针测得的电流值就越大,通过计算得到的电子温度也随着功率的增加而增加。放电功率一定时,压强越大,相同电压下探针测得的电流值就越来越小。 解释:

由于实验过程中主要是通过调节放电管两端电压来控制放电功率,因此可以 认为放电电压对电子温度的影响是主要的。电压越大(功率越大),两极间的电 场强度越大,相同路程(相同压强)中电子获得的能量也就越大,使得发生激发 和电离的概率增大,电子温度升高。而放电功率相同时,并不意味着相同的电子 温度,随着压强的升高,电子温度是降低的。原因是等离子体工作气压增大时, 电子的平均自由程减小,同时放电管两端所加电压降低,都使得电子被加速增加 的能量减小,电子温度因而减小,电子密度也有微弱减小。压强越高,电子温度 减小的幅度越小。

4) 德拜屏蔽

P/Pa	d <sub>1</sub> /mm	D/mm	l/mm	V <sub>1</sub> /V	V <sub>2</sub> /V	V <sub>放电</sub> /V
25	12	90	2	-5	/	400
25	15	90	5	-14	/	401
25	21	90	11	-21	257	401
25	21	90	11	-24	411	500
22	21	90	11	-23	205	401
25	25	90	15	-21	268	400
25	30	90	20	-20	259	400

d<sub>1</sub>:阴极板位置, D: 极板间距, I: 探针与阴极板间距, V<sub>1</sub>: 万用表负极接阳极板时万用表示数, V<sub>2</sub>: 万用表负极接阴极板时万用表示数。(阳极板接地)

将万用表负极接阳极板(接地),发现探针在距离阴极板较近的区域内,万用 表示数较小,且随着与阴极板距离越远,探针电压越大,当相对距离大于11mm 时,探针电压趋于稳定。保持其他参数不变,增大放电电压,发现探针电压增大; 保持其他参数不变,减小压强(等离子体密度),发现探针电压增大。鉴于前两 部分实验经验,这次根据辉光电流示数是否稳定判断压强的稳定性,此时反复测 量探针电压,具有很好的重复性与稳定性。说明万用表示数的变化不是由误差引 起,而是反映了某种物理机制。同样情况下,将万用表负极接阴极板,发现该示 数 V<sub>2</sub>与 V<sub>1</sub>之差不是 400V。

解释:

由于等离子体的德拜屏蔽效应,探针周围将形成一层电荷鞘层,来保持等离 子体宏观电中性的特性。放电管中等离子体主要集中在远离阴极板的正电柱区域 内,在放电管内形成了正电柱区域以内稳定,以外衰减的密度分布。当探针离阴 极板较近时,由于等离子体密度很低,屏蔽效应不明显,探针电压较小,当探针 进入正电柱区域时,由于明显的屏蔽效应,产生了稳定的不受探针与阴极板相对 距离变化影响的探针电压(德拜势)。

由 3) 知道增大放电电压,相当于提高电子温度,由式 1 知道德拜长度增大, 通过对式 2 固定 r,可以知道离探针距离一定的鞘层内某点的德拜势随着德拜长 度的增大而增大,因此探针电压随着放电电压增大而增大。同样降低压强也相当 于提高电子温度,对德拜势有相同的增益作用。

当万用表负极接地时,初始探针表面电势高于等离子体电势(虽然实验室条件下难以测量,但等离子体电势应当在 0~-400V内),探针表面将形成厚度约为一个德拜长度的电子鞘层,以保证一个的德拜长度以外的等离子体区域感受不到探针带来的影响。这从探针接电势后辉光放电现象稳定可以看出。电子由探针流向阳极板,形成负电势。探针实际上探测到的就是该鞘层内的德拜势。当万用表

负极接阴极板时,相当于将初始电势为-400V的探针伸入等离子体内,探针附近将形成量级为一个德拜长度的以正离子为主的鞘层,电子由阴极板流向探针,形成正电势。

五、 分析与讨论

 压强一定且放电电压增大时,负极辉光区和正柱区曲率半径变小,向阳极板 延伸。

由于氩气是从极板与放电管壁间宽度约为 1mm 的间隙中流入,极板间内各处 气体流速并非均匀,由下图可以发现,流线在接近轴心处密集,这就导致了轴心 处气体密度比之管壁处更高,放电电压增大后,轴心处发生激发和碰撞电离的几 率更高。因此形成了负极辉光区的变化。此外考虑到极板边界处的电场变化,显 然管壁附近沿轴向的场强也要比轴心处场强小。

2、 等离子体实验稳定条件讨论

等离子体实验中影响实验的现象经观测后有等离子体温度过高,径向局部放 电、径向各项同性放电。

- 等离子体温度过高:由于放电管中只在局部区域能产生碰撞激发和电离,电子温度过高会导致放电管受热不均匀而破裂。由实验3)知道电子温度受到放电电压与压强的影响,然而实验需要扫参必然导致要增大放电电压,因此需要扫描放电电压时,最好保证压强较大(由帕邢定律知道过大压强也会导致击穿电压过高,扫参范围会受到一起负载的限制),同时在高电压区域停留时间不能过长,可以用手触摸管壁判断温度是否过高。
- 径向局部放电:这是由于管壁的污渍与阴极板边缘处的金属屑造成的,但是局部放电很可能会导致管壁受热不均而破裂,同时出现径向局部放电时,辉光电流会变得很不稳定,影响实验结果。所以出现径向的局部放电时,需要视情况清洁仪器表面。
- 径向各项同性放电:实验过程中,为了减少管内气体密度不均匀曹成的影响,将极板直径磨小了 2mm,相当于增大了进气通道面积,然而发现电压较高时阴极板径向出现了各项同性的辉光放电,这是由于增大了管壁到阴极板的距离使得此区域内的气体密度变小,增大了电子的平均自由程,因此激发和碰撞电离变得更为容易。这个时候电子温度与辉光电流示数也都收到影响。
- 3、 仪器改进建议

之所以存在阴极板径向放电是因为阳极板接地,相当于在阴极板上加了-400V 的高压,由于管壁接地,因此极板与管壁间形成了 400 的电势差,且管壁是高电 势点,电子因此由阴极板发出向管壁加速。如果让阴极板接地,相当于在阳极板 上加 400V 的的正高压,阴极板与管壁等势,由此阳极板与阴极板边缘都不会发 生径向放电现象。然而实际改进中,发现接地的不是极板本身而是阳极导线,需 要对电路进行改进,无法简单实现。

- 4、 双探针测得 I-V 曲线不对称
- 整体偏移:测量过程中,发现 I=0 与 V=0 不重合,好像整条曲线偏移了一个小量。这是由于此实验时间较长,导致压强变化的影响增大。从初始时刻的 辉光电流值与实验结束时的辉光电流值不同可以知道。因此最好在实验开始 前确定电流值稳定后再进行实验。此外管内压强是个由抽速与进气量决定的 动态平衡,很容易被打破,因此可以通过降低抽速与进气量,时的管内压强 更易于稳定。
- 零点附近呈折线:这是由于双探针表面氧化层的差异,使得接正向与反向电压时得到的电流值不同。因此需要在实验开始前,在探针两头都接负电压,通过阳离子轰去表面化学层。
- 5、 压强与放电电压对辉光放电现象的影响

极板间距和放电电压一定,降低压强(60Pa~10Pa),负辉区和法拉第暗区开始扩展,正柱区会缩短,气压足够低时正柱区可以完全消失。降低压强相当于增大电子平均自由程,电子获得能量升高,起初电子以激发正离子为主,所以正电柱与负辉区辉光现象明显,随着电子能量升高,更过的电子与正离子碰撞电离,激发离子的区域开始整体向阳极板偏移,使得可以肉眼观察到的负辉区延伸,正电柱缩短。

极板间距和压强一定时,增大放电电压(0~600V),负辉区和法拉第暗区开始 扩展,正柱区会缩短,电压进一步升高,正电柱开始延伸。增大放电电压相当于 增加电子能量,起初电子能量不高,激发占主导,可以观察到正电柱与负辉区, 此后电子能量升高,电离占主导,但电离后的电子能量不足以立即激发电子,因 此观察到正电柱缩短,负辉区延伸。当电子能量继续升高,电离后的电子剩余能 量足以激发离子,因此又看到了延伸的正电柱。

六、 实验结论

- 1、极板间距和放电电压一定时,辉光电流随着压强的升高而增大。
- 2、极板间距一定时,击穿电压随着压强升高而增大;压强一定时,击穿电压随着极板间距的增大而增大;极板间距和压强乘积一定时,击穿电压基本不变。符合帕邢定律期望。
- 3、极板间距和压强一定时,等离子体的电子温度也随着功率的增加而升高。极板间距和放电功率一定时,等离子体的电子温度也随着压强的增加而降低。
- 4、万用表负极接地时,探针测得等离子体鞘层德拜势约为-21V,万用表负极接-400V时,探针测得等离子体鞘层德拜势约为-141V。
- 七、 实验感想

等离子体物理实验看似简单,实际上具体操作过程中面临很多问题,比如为 了解决径向放电带来的问题,先磨小了极板,随后发现现象没有消除甚至更为严 重,又不得不重新制作极板。十分考验耐心和分析现象的能力。此次实验要特别 感谢吴老师和乐老师的指导帮助,让我从最开始单纯按照操作手册重复实验步骤, 到后来逐渐记住了整台仪器的各个细节,并且有机会看到很多操作手册以外的实 验现象。正是在此基础上,我才有了独自思考研究新的实验内容的能力。

## 八、 参考文献

- 1、 宫文英.直流辉光放电电离特性的 PIC/MCC 模拟.电子科技大学硕士学位论文集.2009.05.
- 2、姚红冉,李明. 直流辉光放电等离子体鞘层流体动力学模拟.第八届真空冶金与表面工程 学术会议.2007.
- 3、茅卫红.低压直流辉光等离子体的放电特性.第六届全国高等学校物理实验教学研讨会论 文集.2010.
- 4、严伟,刘文正,李成柳.探针法在直流辉光放电等离子体测量中的应用.第十三届全国等离子体科学技术会议.2007.



图 1. 等离子体 I-V 特性曲线



图 2. 不同极板间距下气体击穿电压与气体压强关系



图 3. 等离子体双探针曲线