

直流辉光等离子体的温度测量

马少杰 08300190055

(复旦大学 物理系 200433)

摘要: 等离子体的参数如温度, 等离子体密度等, 决定着等离子体大部分的性质, 探究其测量方法, 以及参数随电压, 气压等控制条件之间的变化关系对实际应用具有重要的意义。本文分别通过 Langmuir 双探针技术和光谱技术对等离子体的参数进行测量, 并初步研究了电压, 气压等因素对等离子体参数的影响。

关键词: 等离子体 Langmuir 双探针技术 光谱测量 电子温度 等离子体密度

一、Langmuir 双探针技术

1、实验原理:

在电中性的等离子体空间, 探针表面会产生一定的随机电流, 其大小随其所处电势, 表面积以及电子温度而变化, 在面积相等的两个探针上分别加上不同的电压, 两探针随机电流不等从而在电路中产生定向的电流。理论分析可知, 等离子体 I-V 曲线与其电子温度的关系满足:

$$T_e = \frac{eI_i}{2k \frac{dI}{dV}(I=0, V=0)} \quad (1)$$

其中 I_i 为等离子体的饱和电流。

同时, 也可以知道等离子体的密度, 有:

$$n = \frac{I_i}{\sqrt{\frac{kT_e}{m}}} \quad (2)$$

2、实验中分别就气压和功率恒定的情况进行了测量, 其结果如图 1:

取 I_i 为拐点后拟合直线的 y 轴截距。

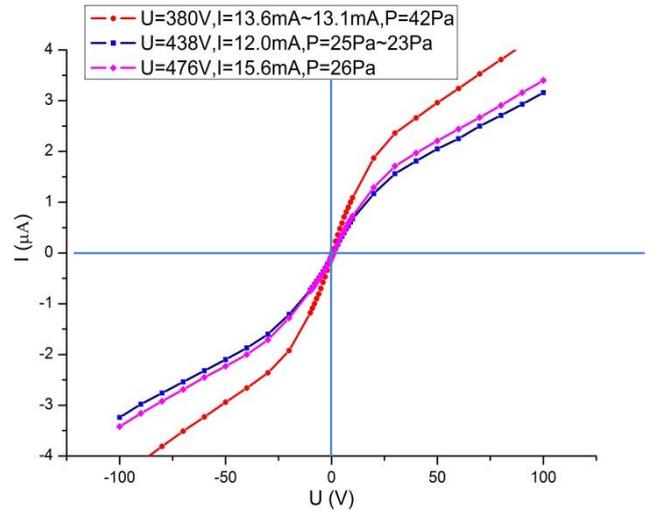


图 1、Langmuir 双探针实验测量结果

理论上, 电流 I-V 曲线关于原点中心对称, 但实际上发现:

- 实验中 I-V 曲线并不通过坐标轴原点。
- 以曲线与 V 轴交点为调整后的原点 V_0 , 曲线并不中心对称。(即对 $V_1 - V_0 \neq V_0 - V_2$, $\Delta I_1 \neq \Delta I_2$)

为了直观说明这种不对称, 对中心区附

近 I-V 曲线做示意图如图 2:

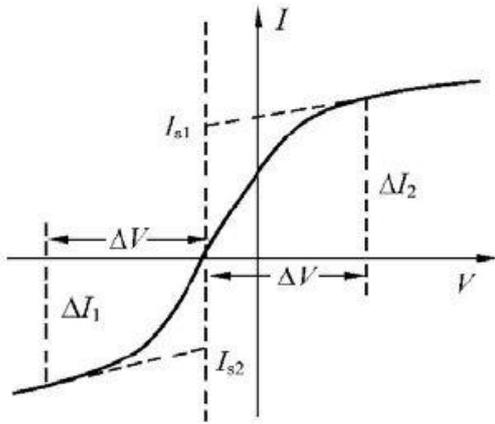


图 2、Langmuir 探针测量实际曲线示意图

分别就两种方式的不对称分析其原因:

- i. 探针所处等离子体空间电位不同, 属于探针制作中的误差。可以将曲线与 V 轴交点作为等效原点。
- ii. 双探针表面积不相同, 有细微差别。为减少误差, 可以考虑将 I_i 取为第一和第三象限内拐点后曲线直线拟合后与等效原点 I 轴交点的绝对值平均。

3、依据上述讨论对实验数据进行处理, 结果如下:

	曲线1		曲线2		曲线3	
电压U/V	380		438		476	
电流I/mA	13.6		12		15.6	
气压P/Pa	42		23~25		26	
功率P/W	5.168		5.256		7.4256	
探针直线拟合数据 $I=a+bV$	a	b	a	b	a	b
中心区	-0.059	0.123	-0.057	0.122	-0.066	0.074
第一象限	1.509	0.029	1.526	0.029	1.015	0.024
第三象限	-1.486	0.029	-1.486	0.029	-1.026	0.024
中心平衡电压 V_0/V	-0.4803		-0.4664		-0.8931	
悬浮电位电流 $I/\mu A$	1.49	-1.50	1.51	-1.50	0.99	-1.05
平均悬浮电流 $I/\mu A$	1.4976		1.5063		1.0205	
平衡温度 T_e/eV	6.10		6.16		6.90	
热运动速率 m/s	1.035E+06		1.041E+06		1.102E+06	
电子浓度/cm ⁻³	4.606E+09		4.606E+09		2.948E+09	

表 1、Langmuir 探针实验数据处理结果

由以上结果可知:

- i. 在功率恒定时, 改变气压对等离子体的温度以及电子浓度的影响并不明显。
- ii. 在气压恒定时, 随着气体放电管功率的增加, 等离子体的电子浓度及温度均有明显的变化。其中温度变高, 电子浓度变低。

考虑其原因: 可以认为放电管消耗的功率主要有发热功率和发光功率两部分组成。

其中发热功率决定于等离子体的温度, 外界温度以及两者的接触方式和接触面积。在实验中, 可以认为外界温度几乎不变, 则发热功率仅取决于等离子体的温度 T_e 。而对于发光, 主要由等离子体密度和能级布居数决定, 实验中直观的发现是随着气压的增大, 发光强度明显变大, 而等离子体密度随气压增大反而变小, 因此温度的变化朝向易于使气体发光的方向, 即温度变高。

在误差范围内, 可以认为气压变化对温度和等离子体密度的影响可以忽略, 甚至认为其温度的微小差别也可以视为功率调整中的微小差别造成的。由于数据中功率的影响远大于气压, 因此难以判断前两组数据的温度差别究竟来自于气压的变化还是功率调整的微小差别。

其实, 实验中由于测量过程要求采集大量的数据, 又缺少方便的扫描方法, 只能手动记录, 效率很低, 仅测得的少许数据难以全面的说明问题, 要得出参数随电压或功率的变化规律需要更多的数据支持。

二、光谱测量技术

1、实验原理:

采用统计力学可以证明,在不同的温度下,处于热平衡或局域平衡状态的等离子体拥有不同的能级布居数分布,从而体现出不同的发光光谱。在较高温度下,不同能级上粒子数满足玻耳兹曼分布,有:

$$\frac{n_m}{n_n} = \frac{I_m \lambda_m A_n}{I_n \lambda_n A_m} = \frac{g_m}{g_n} * \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{kT_e}\right) \quad (3)$$

其中 n_i 为 E_i 能级上的粒子布居数, A_i 为此能级向下的跃迁几率, λ_i 和 I_i 分布为跃迁发光的波长和强度。

易知,仅需测量得到特定的几条谱线的强度比例,即可通过计算得到对应等离子体的温度。

2、定标:

一般的光谱测量多是通过特征谱线来判断元素种类,因此必须对波长有较准确的测定。本实验中采用的元素已知,通过对特征谱线的强度比较得到体系温度,因此除波长定标外,还要进行能量的定标,即光谱仪对不同的波长入射光的吸收比率的测定。本实验采用的为复想光电科技公司的 PG-4000 型光栅光谱仪,采集元件为 CCD。

i. 先通过汞灯的特征谱线来对光谱仪波长定标,建立波长和 CCD 道址的函数关系,结果如图 3。

考虑到 CCD 上道址 n 的范围为 1 到 3648,因此仅需将曲线取到 n 的平方项,即:

$$\lambda = 346.5 + 0.1994n - 6.573 * 10^{-7} * n^2 \quad (4)$$

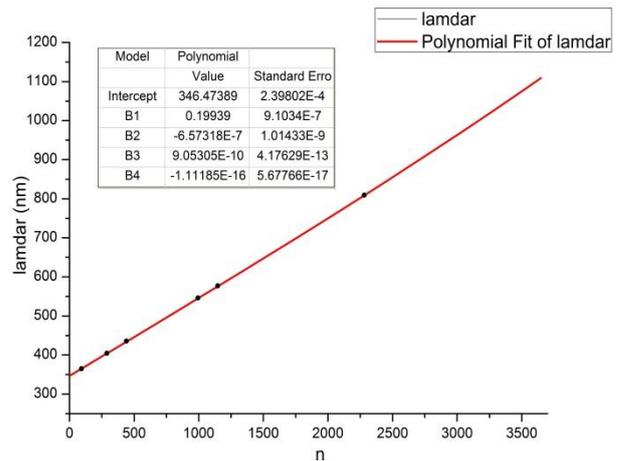


图 3、PG-4000 型光谱仪波长定标

ii. 参比数据来自于 3000K 的标准灯, (其发光强度规律可以用普朗克黑体辐射公式描述), 仅记录其相对值, 其结果如图 4。

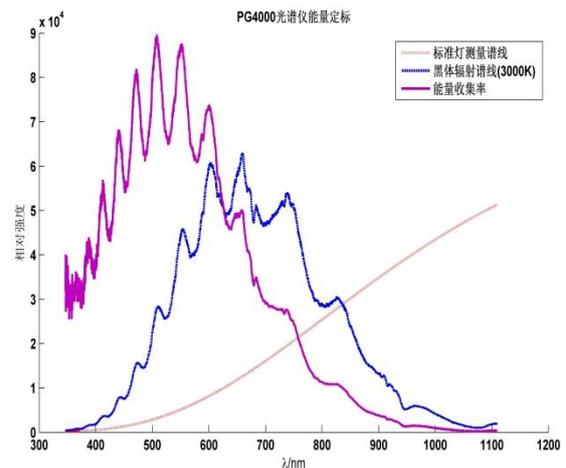


图 4、PG-4000 型光谱仪能量定标

观察发现 CCD 的能量响应率随波长有层类周期性的波动。查询资料发现, GP-4000 型光谱仪中 CCD 元件表面涂有一层增透膜, 同时, 为了防止二次衍射的影响, 在长波一侧表面涂有 500nm 一下短波长光的截止膜。由于薄膜干涉的影响, 透光率产生一个随波长变化的调制, 这在一般的 CCD 元件中均有反应。

在实验中, Ar 等离子体的光谱线主要集

中在 600~900nm 的波段，为了提高能量透过以增大信噪比，一般选取的特征波长不高于 900nm。

3、数据处理：

实验中得到的典型谱线如图 5：

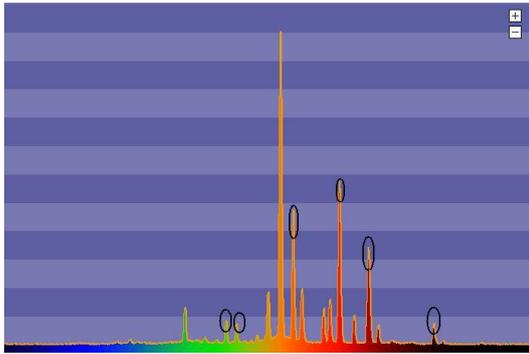


图 5、Ar 等离子体光谱

选取的六条特征谱线在图中由黑色圆圈标出，选取标准为：

- i. 容易辨认
- ii. 能量不太低，以增加信噪比
- iii. 易于找到其相应参数

由左向右，其谱线参数如下：

编号	波长λ/nm	能级E/ev	A	g
1	696.54	13.3631	6.39E+06	3
2	706.72	13.3375	3.80E+06	5
3	763.51	13.2067	2.45E+07	5
4	811.53	13.1103	3.31E+07	7
5	842.46	13.1295	2.15E+07	5
6	912.30	12.9412	1.89E+07	3

表 2、Ar 等离子特征谱线参数

对于一组数据“恒定气压 18Pa，极板间隔 100mm，阴极极板附近，电压 323V”，测量其各特征波长处的光强依次为：（相对值）

0.2281 0.2348 2.3191

5.5236 3.9380 3.0134

以上数据已经经过图 4 中得到的能量转

化率转换为真实的入射光。（相对值）

由光谱理论知：

$$\ln\left(\frac{n_i}{g_i}\right) = -\frac{1}{kT_e} E_i + C$$

即分别以 E_i 和 $\ln\left(\frac{n_i}{g_i}\right)$ 为 x 轴和 y 轴数

据进行直线拟合，斜率倒数的负值即为对应等离子体的电子温度。

对应于上述数据，结果如图 6：

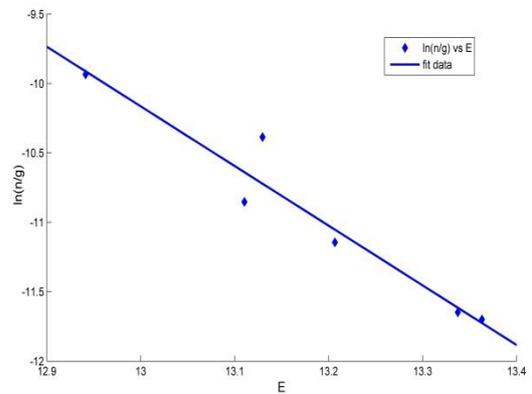


图 6、电子温度的直线拟合

其拟合结果为： $y = -4.297x + 45.69$ ；

$$R^2 = 0.931$$

因而可以求得对应温度为 $KT = 0.2327\text{ev}$ 。

对本组数据进行两点说明：

i. 光谱法测量的依据是体系热平衡。但是，等离子体系中存在大量非平衡的能级，可以通过上图对这些非平衡的能级进行定性判断。如图 6 可知，对应 763.51nm 波长的激发态能级可能含有多于平衡态的粒子数。

ii. 光谱的测量还可以通过双谱线法。图 6 可以看出若使双谱线测量具有较大的准确性，需尽量选取能量间隔较大的谱线。可以看到，若选取编号为 2 和 3 的两条谱线做对比，不仅得到温度值（斜率的负倒数）差别

较大，即使是温度的正负都会得到错误的结果。

4、 等离子体参数影响因素的测量

依据上述计算方法，分别对恒定气压，恒定电压和恒定功率的测量数据进行计算。

i. 保持气压恒定为 18Pa，极板间隔维持 100mm，测定 Ar 等离子体温度随极板电压的变化。结果如图 7:

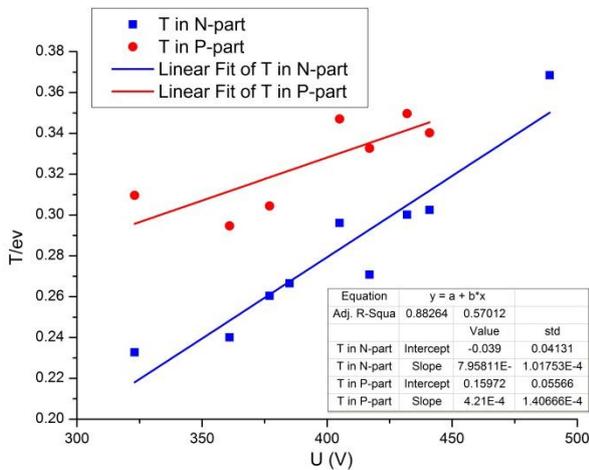


图 7、恒定气压下等离子体温度随电压的变化
恒定气压下，温度随电压呈正相关的增长。

ii. 保持电压恒定为 450V，改变放电管内气压，测定阴极极板附近 Ar 等离子体温度随气压的变化。结果如图 8:

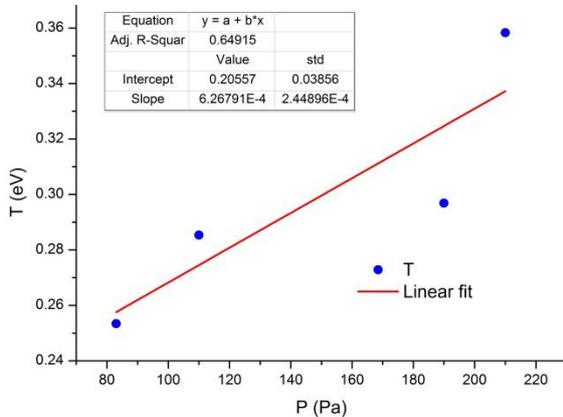


图 8、恒定电压下等离子体温度随气压的变化

恒定电压下，放电管内等离子体温度随气压变化也基本上为正相关的关系。

iii. 保持放电管功率一定，约 3.5W，极板间隔维持 100mm，改变气压，测定阴极极板附近 Ar 等离子体温度随气压的变化。结果如图 9:

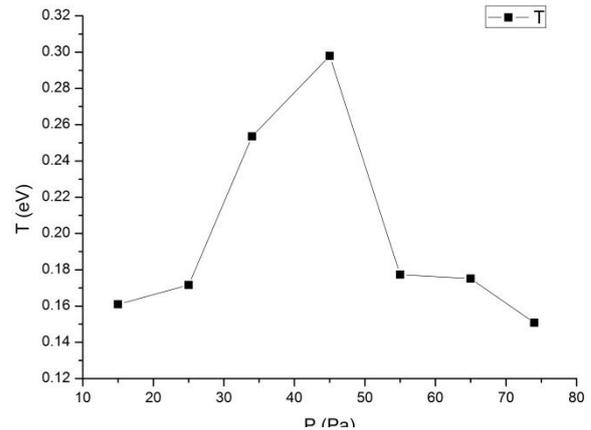


图 9、恒定功率下等离子体温度随气压的变化

恒定功率下，等离子体电子温度随气压的变化比较复杂，可以看出在一定气压范围内，电子温度随气压增大而增大，气压过大时，电子温度又减小直到大致稳定在某个范围。

5、 误差分析

上述数据显示的参数与变量间的函数关系并不是很好，可以肯定光谱法的数据存在较大的误差，分析其原因:

i. 实验中由于不同的实验条件光强不同，需要不断的移动 CCD 的探头位置，在移动中测量数据会影响其稳定性。

ii. 在部分的数据中，进入光谱仪的光过强，从而引起 CCD 采集参数的电信号和光强间线性变差，或者出现无响应的情况。

iii. 放电管内有很多不同的放电区，各部分的发光强度和温度都不相同，从而在远距离的探测时可能使结果包含各部分的光谱，从而表现出一定的平均效应，而影响数据的准确性。

减少实验误差，提出两点建议：

- i. 采用黑色卡纸遮住大部分的放电管区域，仅露出部分测量通道，减少杂光。
- ii. 采用衰减器（入射光和出射光间含透光面积可调圆孔的装置）调节入射光强，是光纤探头位置尽量保持定点。

三、实验总结：

在 Langmuir 探针测量中，等离子体的温度一般在 6~8eV，光谱测量结果一般为 0.2~0.4eV，两者有将近 20 倍的差距，查询资料发现，对 langmuir 探针法，其电子温度定义为平均的电子速度对应的温度，即 $KT_e \sim \frac{1}{2}mv^2$ ，而光谱法测量的温度则为平常我们所用的温度，即体系真实的热运动强度。此处，就其准确性不做考虑，仅就测量方法作评：

	Langmuir 探针方法	光谱测量法
优点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 结果可靠（主要指稳定） 2. 原理清楚，操作简便 3. 易于集成与等离子体系统中 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 非接触式测量，不影响待测物体性质 2. 易于扩展到其他发光体系统中 3. 在选取适当谱线后，可以通过计算机程序直接由 CCD 结果返回温度，快速
缺点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 仅能测量固定点性质 2. 接触测量，可能会对结果有影响 3. 对于探针材料，表面积，安装位置有较严格要求 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 结果可能不太稳定 2. 仅能测量中等强度光 3. 计算过程较探针法复杂 4. 无法得到电子密度的绝对值

可见，无论是光谱法还是探针法，都各有其优缺点，实践中应就要达到的目的，适当的选择实验方法。

致谢：

首先非常感谢乐永康老师，在实验中给了我很多的指导，对数据处理部分也提出了很好的建议。其次，感谢复想光电科技公式提供的标准灯。

参考文献：

1. 万润来，Langmuir 探针在等离子体实验中的应用问题，2009 年近代物理

实验期末论文

2. 符斯列、陈俊芳, Langmuir 探针测量低温等离子体参数特性实验, 实验室研究与探索, 2010(3)
3. 陆胜勇等, 大气压直流氩等离子体光谱诊断研究, 光谱学与光谱分析, 2006(10)
4. 吴蓉等, 等离子体电子温度的发射光谱法诊断, 光谱学与光谱分析, 2008(4)
5. 过增元、赵文华, 电弧与热等离子体, 科学出版社, 1986