

# 用发射光谱法测量氩气直流辉光放电等离子体的电子温度

## Measurement of Electron Temperature in Argon DC Glow Discharge Plasma by Optical Emission Spectroscopy

陈思

(复旦大学 光科学与工程系, 上海 200433)

**Abstract.** The present paper describes a spectroscopic method of determining electron temperature  $T_e$  in Argon DC glow discharge. The measurement of emission spectrum was performed to obtain the spectral intensities of some Ar lines and the method of diagrammatic view of Boltzmann was adopted to calculate the electron temperature. The results of  $T_e$  obtained by optical emission spectroscopy agreed roughly with those by the probe. The results indicated that the electron temperature rose when the discharge voltage increased, it also rose when gas pressure increased.

**Keywords.** Optical emission spectroscopy; electron temperature; glow discharge; plasma

### 引言

目前, 等离子体技术已经在科学研究和工业生产的众多领域得到了应用。例如利用等离子体的发光特性, 制造出各种各样的电光源; 利用等离子体的高温特性, 在机械加工方面对耐熔金属进行等离子体切割与焊接; 以及利用等离子体物理学研究受控热核聚变、磁流体发电等热点课题。

等离子体的状态参数对其性质具有很大的影响, 尤其是等离子体的温度, 决定着等离子体的基本宏观性质。因此测量等离子体的温度具有十分重要的意义。等离子体的温度包括电子温度  $T_e$ 、离子温度  $T_i$  和中性粒子温度  $T_a$ 。目前常用的测量等离子体参数的方法主要是探针法, 但由于探针对等离子体的干扰、探针污染的存在以及边缘效应等原因, 使得测量结果大多数偏高。发射光谱法是一种非接触式的简便测量方法, 与探针法相比有干扰小、操作简便等优点。利用发射光谱测量等离子体电子温度的方法主要有双线法、玻尔兹曼多线斜率法等。

本文利用发射光谱法测量了直流氩辉光放电等离子体的电子温度, 并对对比分析了不同工作参数下的电子温度。通过对比相同实验条件下探针法和光谱法得出的实验结果, 证明了发射光谱法可以用来进行一些等离子体的定性测量。这对利用发射光谱法进行等离子体的诊断和监控具有重要意义。

# 1 实验系统与发射光谱法测量原理

## 1.1 直流氩辉光放电等离子体的测量系统

本实验的放电装置采用的是 DH2005 直流辉光等离子体实验装置，该装置包括气体放电管、测量系统、真空系统、进气系统和水冷系统。气体放电管采用玻璃烧结而成，内附两组钨丝探针，可以利用探针法测定等离子体的一些工作参数。气体放电管两端所加工作电压调节范围是 0~1000V。由进气口通入氩气，通过转子流量计控制气体的流量，同时通过高真空微调阀调节，达到控制放电管中的工作压强。

发射光谱的采集装置如 Fig.1 所示。采集装置由光纤探头、光纤、上海复想光电科技有限公司生产的 PG4000 型光谱仪组成。光谱仪的分辨率为 2nm，可测量的波长范围为 500nm~1138nm。放电发出的光由光纤探头采集，经探头耦合后进入光纤，光纤将信号传输至光谱仪分光，再由光电倍增管将光信号转化成电信号，计算机采集不同波长处的电信号得到光谱。为使收集到的信号尽量强，谱线数目尽量多，光纤探头应尽量贴近放电管。由于负辉

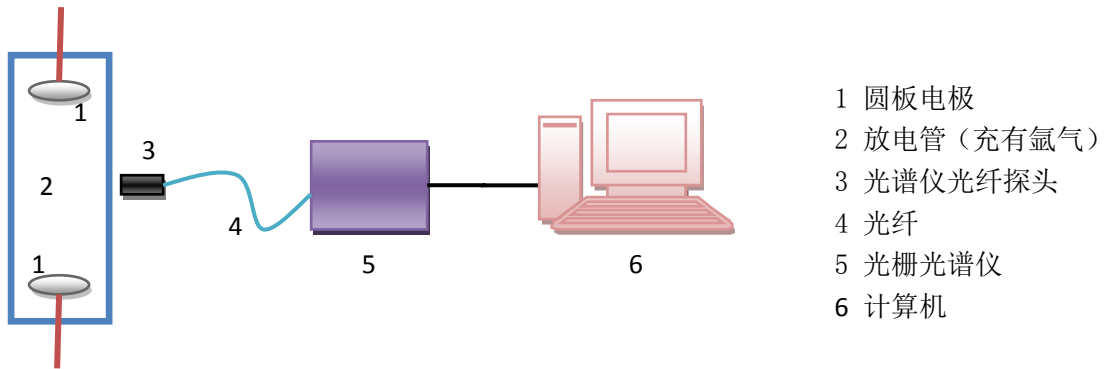


Fig.1 The scheme of the apparatus

区的光强较大，实验中将探头固定在负辉区处的放电管壁处进行光谱采集。

## 1.2 玻尔兹曼多线斜率法测量等离子体电子温度的原理

当等离子体处于热力学平衡或局域热力学平衡时，同种粒子的两个能级上的粒子数满足玻尔兹曼分布

$$\frac{n_n}{n_m} = \frac{g_n}{g_m} \exp\left(-\frac{E_n - E_m}{kT_e}\right) \quad (1)$$

或

$$\frac{n_m}{n} = \frac{g_m}{Z(T_e)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT_e}\right) \quad (2)$$

其中  $n = \sum n_i$ ， $Z(T_e) = \sum g_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT_e}\right)$ ， $n_m$  和  $n_n$  表示相应能级的粒子密

度， $g_m$  和  $g_n$  表示该能级的统计权重， $E_m$  和  $E_n$  表示相应能级的激发能， $n$  和  $Z(T)$  分别表示该原子数总密度和该原子的配分函数， $T_e$  为电子激发温度，本实验中可近似等于电子温度。

由高能级  $E_n$  向低能级  $E_m$  跃迁的谱线强度可以表示为

$$I_{nm} = n_n A_{nm} h\nu \quad (3)$$

其中  $n_n$  是处于上能级的粒子数， $A_{nm}$  是由上能级向下能级跃迁的跃迁几率， $\nu$  是跃迁频率， $h$  是普朗克常数。

由(2)和(3)式可以得到，

$$\ln\left(\frac{I_n \lambda}{A_n g_n}\right) = -\frac{E_n}{kT_e} + C \quad (4)$$

其中， $C$  是和  $n$  和  $Z(T)$  有关的参量，与谱线的选择无关。以  $E_n$  为横坐标，以  $\ln\left(\frac{I_n \lambda}{A_n g_n}\right)$  为纵坐标画出玻尔兹曼曲线，然后对曲线进行线性拟合，拟合直线的斜率就是  $-\frac{1}{kT_e}$ ，从而得到电子温度  $T_e$ 。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 计算工作电压为 600V，工作气压为 4Pa 时的电子温度

实验中，光谱仪测得的光谱信号主要是线状光谱，连续光谱与线状谱信号相比可以忽略不计，同时谱线信号也远大于噪音信号。光谱图中可以观察到许多氩原子的跃迁谱线。计算时应选择具有较大上能级差、较大强度、波长接近的谱线；另外由于光谱仪的分辨率为 2nm，需要考虑邻近 2 nm 区域内有光谱叠加的情况并根据情况舍去叠加后的谱线。根据实际情况，决定选取其中 5 条 Ar I 的激发谱线作玻尔兹曼曲线，这 5 条谱线对应的波长分别为 676.0nm，697.1nm，707.2nm，738.6nm，764.4nm，795.9nm。其他光谱学参数见表 1。

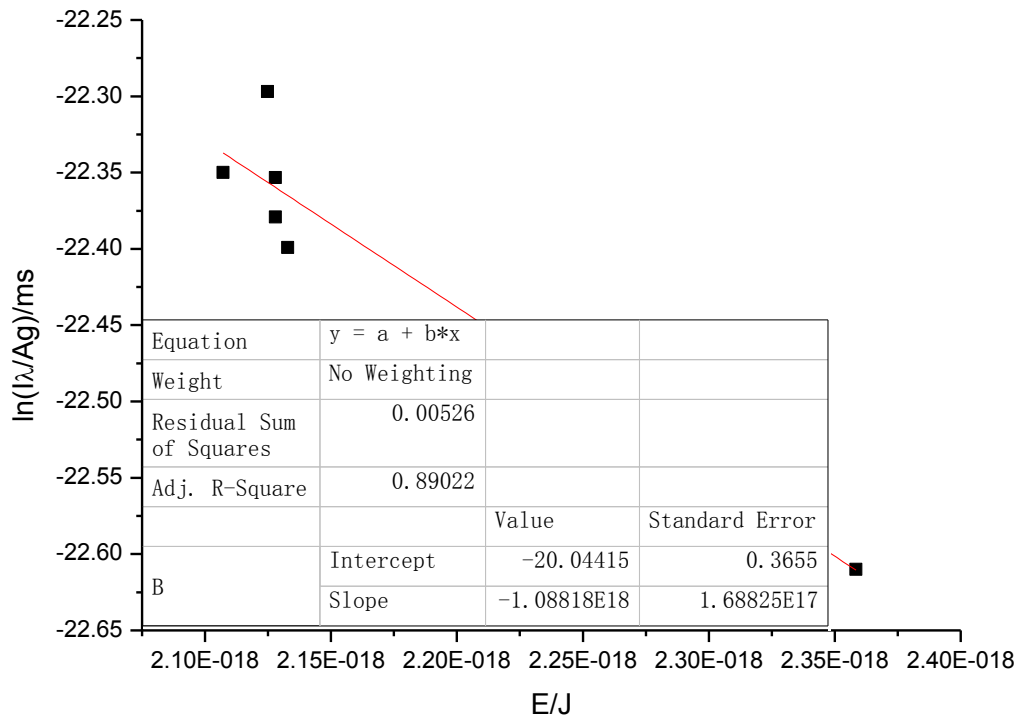
**Table 1 Parameters of selected Ar I lines for Boltzmann temperature measurement**

$\lambda$ /nm	A/s <sup>-1</sup>	g	E <sub>n</sub> /eV	Ref.
676.0	1.96E6	5	14.74	NIST
697.1	6.39E6	3	13.33	NIST
707.2	3.80E6	5	13.3	NIST
738.6	8.47E6	5	13.3	NIST

764.4	2.45E7	5	13.17	NIST
795.9	5.43E6	3	13.28	NIST

\*NIST 全称为 National institute of standards and technology

将直流氩辉光放电管的工作电压和工作气压设置为 600V、4Pa，用光谱仪测量等离子体的光谱。将光谱仪测得的谱线强度结合表 1 的各参数，代入公式(4)，得到各能级  $E_n$  以及对应的  $\ln(\frac{I_n \lambda}{A_n g_n})$ ，从而做出玻尔兹曼曲线，求得等离子体电子温度，拟合结果见 Fig. 2 所示。



**Fig.2 Boltzmann plot for selected Ar I emission lines**

Fig. 2 的玻尔兹曼曲线图是在工作电压为 600V，工作气压为 4Pa 的情况下得到的。由拟合曲线的斜率可求得等离子体的电子温度  $T_e \approx 6.6 \times 10^4 K$ ，换算为能量单位即  $T_e \approx 2.8 eV$ 。相同工作参数下，探针法测得电子温度为 5.07eV。二者的差别一方面来自于探针对等离子体的干扰、探针污染的存在以及边缘效应等因素，使得探针法的测量结果大多数偏高；另一方面由于实验中未能实现完全同步的测量，发射光谱法的测量在探针法之后，因此两种方法测量时的工作参数可能有所变化，尤其是工作压强很有可能变小。综上所述，在合理选择谱线后，使用发射光谱法对等离子体电子温度的测量较为

准确。

## 2.2 工作参数的变化对电子温度的影响

将直流氙辉光放电管的工作电压和工作气压依次设置为：600V、4Pa，450V、20Pa，450V、4Pa，用光谱法和探针法分别测量三种状态下的电子温度。采用光谱法时，为了观察到较为准确的变化趋势，选取不同工作参数下的相同谱线做玻尔兹曼曲线得出电子温度。但由于450V、4Pa工作参数下的谱线强度偏低，一些谱线由于接近噪声强度、不确定度太大而被舍去。最终选取697.1nm，738.6nm，795.9nm，913.7nm和967.0nm处的谱线进行计算。虽然这些谱线波长分布比较分散，可能无法得到合理的电子温度，但鉴于谱线强度较大、玻尔兹曼曲线线性程度较高，可以得到较为灵敏的变化趋势。

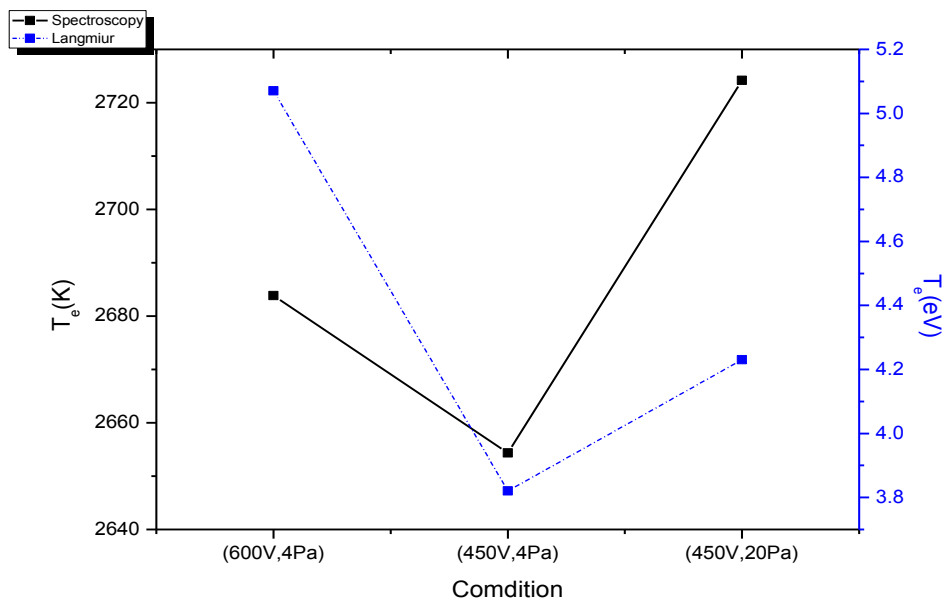
用玻尔兹曼斜率法求得不同工作参数下的等离子体的电子温度：

600V、4Pa时的电子温度  $T_e \approx 2683.8\text{K}$ ；

450V、20Pa时的电子温度  $T_e \approx 2724.20\text{K}$ ；

450V、4Pa时的电子温度  $T_e \approx 2654.35\text{K}$ 。

将光谱法与探针法的实验结果进行对比，如 Fig. 3 所示。



**Fig.3 Electron temperature variation with parameters measured by different methods**

由 Fig. 3 可以看出，利用光谱法测量电子温度的变化趋势与探针法的测量结果比较吻合：固定工作气压为4Pa，当工作电压从600V降至450V，等离子体电子温度也下降；固定工作电压为450V，当工作气压从4Pa上升至20Pa，等离子体电子温度也上升。

直流氩等离子体辉光放电管的伏安特性是上升的，因此当放电管的工作电压升高时，电源的输出功率也升高；这部分增加的电能必然有部分转移到等离子体中，从电子温度的升高就可以看出来。

当放电管的工作气压升高时，根据沙哈定律，等离子体的电离度下降，则工作电流增大；在工作电压不变的情况下，电源的输出功率也会升高，从而导致了电子温度的升高。

### 3 结论

本实验中通过对测得的光谱信号作玻尔兹曼斜率图，计算了等离子体辉光的电子温度；观察和分析了放电管工作参数的变化对等离子体电子温度的影响；并通过比较探针法和光谱法的实验结果，证明了在研究直流氩等离子体辉光放电的实验中，可以利用发射光谱法来进行等离子体电子温度的计算或进行一些定性的研究。另外，通过本次实验还可以看出，选取合适的谱线对于采用发射光谱法测量等离子体电子温度十分重要。

### 参考文献

- [1] 朱士尧. 等离子体物理基础[M]. 北京:科学出版社, 1983.
- [2] 杭州大华科教仪器研究所. DH2005型直流辉光等离子体实验装置使用说明书.
- [3] 上海复想光电科技有限公司. Morpho2009操作说明书.
- [4] 严建华, 潘新潮, 马增益, 屠昕, 岑可法. 直流氩等离子体射流电子温度的测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1):6.
- [5] 吴蓉, 李燕, 朱顺官, 冯红艳, 张琳, 王俊德. 等离子体电子温度的发射光谱法诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(4):731.
- [6] 朱永红, 吴卫东, 陆晓曼, 唐永建, 孙卫国. 采用发射光谱和朗缪尔探针诊断低温低压氩等离子体[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4):601.

