

# 《氩气等离子体射流特性:电压、气流、外磁场的综合影响\*》 的补充材料

周雄峰 陈彬 刘坤†

(重庆大学电气工程学院, 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

## S1 放电功率

放电功率计算公式为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{C_m}{T} \int_0^T u(t) \frac{du_c}{dt} dt = \frac{C_m}{T} \int_0^T u(t) du_c = \frac{C_m}{T} \oint u(t) du_c = \frac{C_m S}{T}, \quad (S1)$$

其中  $P$  为放电功率,  $T$  为交流电周期,  $u(t)$  和  $i(t)$  为随时间  $t$  变化的瞬时放电电压和放电电流,  $C_m$  为电容值,  $u_c$  为电容两端电压值,  $S$  为放电电压  $u(t)$  和电容两端电压  $u_c$  所围成的封闭 Lissajour 图面积.

## S2 电子密度

实验中发射光谱没有观测到 H 原子谱线, 因此采用 Ar 原子谱线计算电子密度. 对于类 H 原子的谱线, 一般可以用 Voigt 线性函数表示:

$$y = y_0 + A \frac{2\ln 2}{\pi^{1.5}} \frac{\Delta\lambda_L}{\Delta\lambda_G} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2)}{(\sqrt{\ln 2} \frac{\Delta\lambda_L}{\Delta\lambda_G})^2 + (2\sqrt{\ln 2} \frac{v-v_0}{\Delta\lambda_G})^2} dt, \quad (S2)$$

式中  $\Delta\lambda_G$  和  $\Delta\lambda_L$  表示谱线中高斯线性和洛伦兹线性成份的展宽. 由于 Ar 原子谱线的线性不是标准的 Voigt 线性, 因此需要将其谱线归一化后, 然后从强度-波长的函数  $f(\lambda)$  转化为强度-频率的函数  $g(\nu)$ . 其转换关系为

$$g(\nu) = \frac{c}{\nu^2} f(\lambda) = \frac{\lambda^2}{c} f(\lambda), \quad (S3)$$

式中  $\nu$  表示频率,  $c$  表示光速,  $\lambda$  表示波长. 通过(S2)式—(S3)式计算得到的高斯展宽  $\Delta\lambda_G$  和洛伦兹展宽  $\Delta\lambda_L$  包含以下展宽成分:

$$\Delta\lambda_G = \sqrt{\Delta\lambda_D^2 + \Delta\lambda_I^2}, \quad (S4)$$

$$\Delta\lambda_L = \Delta\lambda_{\text{van}} + \Delta\lambda_s + \Delta\lambda_R, \quad (S5)$$

其中  $\Delta\lambda_D$  表示 Doppler 展宽,  $\Delta\lambda_I$  表示仪器展宽,  $\Delta\lambda_{\text{van}}$  表示 van der Waals 展宽,  $\Delta\lambda_s$  表示 Stark 展宽,  $\Delta\lambda_R$  表示共振展宽. 对于洛伦兹展宽  $\Delta\lambda_L$ , 其成分中的共振展宽  $\Delta\lambda_R$  在大气压下数值很小(约为  $10^{-5}$  nm), 一般忽略不计, 另外两个展宽的表达式为

$$\Delta\lambda_{\text{van}} = \frac{\lambda^2}{c} 1.71 \times 10^{-3} \left(\frac{T_g}{296}\right)^{-0.7}, \quad (\text{S6})$$

$$\Delta\lambda_s = 2 \times [1 + 1.75 \times 10^{-4} \times n_e^{1/4} \alpha \times (1 - 0.068 n_e^{1/6} T_e^{1/2})] \times 10^{-16} \omega n_e, \quad (\text{S7})$$

其中  $n_e$  表示电子密度,  $T_g$  表示气体温度,  $\alpha$  表示碰撞参数,  $T_e$  表示电子温度,  $\omega$  表示电子碰撞半高宽. 在大气压下, 可以将  $\alpha$ ,  $T_e$ ,  $\omega$  视为定值, 分别取 0.032, 1 eV 和  $0.00537 \text{ nm/cm}^3$ . 因此, 联合(S2)式—(S7)式, 就可以计算得到等离子体电子密度.

### S3 电子激发温度

氩气 APPJ 中能观测到丰富的 Ar(4p-4s)谱线, 可以利用这些谱线通过玻尔兹曼斜率法计算等离子体电子激发温度  $T_{\text{exc}}$ , 其表达式为

$$\ln\left(\frac{I_{\text{pk}}\lambda_{\text{pk}}}{g_p A_{\text{pk}}}\right) = \ln\left(\frac{N_a h c}{Q_{\text{exc}}}\right) - \frac{E_p}{K_B T_{\text{exc}}} \quad (\text{S8})$$

式中,  $I_{\text{pk}}$  和  $\lambda_{\text{pk}}$  分别表示电子从原子高能态 p 向低能态 k 辐射跃迁时形成的谱线强度和波长,  $g_p$  为高能态的统计权重,  $A_{\text{pk}}$  为跃迁概率,  $N_a$  表示原子总布居数,  $Q_{\text{exc}}$  表示原子配分函数,  $E_p$  表示高能态能量,  $h$  是普朗克常数,  $K_B$  是玻尔兹曼常数. 实验中选取的计算电子激发温度  $T_{\text{exc}}$  的 Ar(4p-4s)谱线所对应的波长分别为: 738.40 nm, 751.47 nm, 794.82 nm, 800.62 nm, 其相关的谱线参数在表 S1 中给出.

表 S1 计算电子激发温度的 Ar(4p-4s)谱线相关参数

Table S1. Constants of Ar(4p-4s) for calculating electron excitation temperature.

$\lambda_{\text{pk}}/\text{nm}$	$g_p$	$A_{\text{pk}}/\text{s}^{-1}$	$E_p/\text{eV}$
738.40	5	$8.5 \times 10^6$	13.30
751.47	1	$4.0 \times 10^7$	13.27
794.82	3	$1.86 \times 10^7$	13.28
800.62	5	$4.9 \times 10^6$	13.17

### S4 气体温度

在大气压氩气放电等离子体中, 由于与氩 Ar 粒子的碰撞淬灭反应速率较小, OH(A)粒子的有效寿命较长, 大于其转动能量弛豫时间, 在退激发之前能基态粒子进行充分的能量交换达到热平衡状态. 因此, 可以用 OH(A)的转动温度  $T_{\text{rot}}$  来表示等离子体气体温度  $T_g$ . 利用 OH(A-X)的谱线, 可以通过玻尔兹曼斜率法计算 OH(A)的转动温度  $T_{\text{rot}}$ (即气体温度  $T_g$ ), 其具体表达式为

$$\ln\left[\frac{I_{N'N''}\lambda_{N'N''}}{(2N'+1)A_{N'N''}}\right] = \ln\left(\frac{N_b h c}{Q_{\text{rot}}}\right) - \frac{F(N')h c}{k_B T_g}, \quad (\text{S9})$$

其中  $I_{N'N''}$  和  $\lambda_{N'N''}$  分别表示电子由某电子态上的一转动能级  $N'$ (上能级)向另一电子态的一转动能级  $N''$ (下能级)跃迁时形成的谱线强度和波长,  $A_{N'N''}$  为跃迁概率,  $N_b$

表示上能级所处振动态上的粒子布居数,  $F(N')$ 表示上能级的转动项能量,  $Q_{\text{rot}}$  是转动配分函数. 实验中选取的计算气体温度  $T_g$  的 OH(A-X)的谱线所对应的波长分别为: 308.00 nm, 308.33 nm, 308.52 nm, 308.73 nm, 310.32 nm, 其相关的谱线参数在表 S2 中给出.

表 S2 计算气体温度的 OH(A-X)谱线相关参数  
Table S2. Constants of OH(A-X) for calculating gas temperature.

$\lambda_{N'N''}/\text{nm}$	$N'$	$A_{N'N''}/\text{s}^{-1}$	$F(N')/\text{cm}^{-1}$
308.00	2	$5.16 \times 10^5$	101.77
308.33	4	$6.04 \times 10^5$	339.22
308.52	5	$6.24 \times 10^5$	508.83
308.73	6	$6.35 \times 10^5$	712.36
310.32	3	$3.82 \times 10^5$	203.53

## S5 基态·OH 粒子数

实验中利用基态·OH 粒子对 309 nm 附近处紫外光的吸收特性进行吸收光谱原位测量, 可以得到吸光度, 其具体计算公式如下:

$$A(\lambda) = (I_L + I_P - I_{L+P})/I_L, \quad (\text{S10})$$

其中  $A(\lambda)$ 表示在波长  $\lambda$  处的吸光度,  $I_L$  表示打开紫外光源、关闭放电时的信号,  $I_P$  表示启动放电、关闭紫外光源时的信号,  $I_{L+P}$  表示打开紫外光源、启动放电时的信号. 根据朗伯-比尔定律有如下关系:

$$A(\lambda) = 1 - \exp[-h\lambda B\varphi(\lambda)n_J L], \quad (\text{S11})$$

其中  $B$  是吸收常数,  $n_J$ 是在波长  $\lambda$  处对应的特定转动能级  $J$  上的基态·OH 粒子数密度,  $L$ 是吸收光程,  $\varphi(\lambda)$ 是归一化线性函数, 由 Doppler 展宽和 van der Waals 展宽构成. Doppler 展宽  $\Delta\lambda_D$  由如下公式计算:

$$\Delta\lambda_D = 7.16 \times 10^{-7} \lambda \sqrt{\frac{T_g}{M}}, \quad (\text{S12})$$

其中  $M$  表示·OH 的相对原子质量, van der Waals 展宽  $\Delta\lambda_{\text{van}}$  计算表达式见(S6)式. 对于特定能级  $J$  上的基态·OH 粒子数密度  $n_J$  与总粒子数密度  $n_{\text{tot}}$ , 有如下关系:

$$n_J = f_J n_{\text{tot}}, \quad (\text{S13})$$

其中  $f_J$  是玻尔兹曼因子, 表达形式为

$$f_J = \frac{2(2J+1)}{Q_{\text{rot}}} \exp\left(-\frac{E_J}{K_B T_g}\right), \quad (\text{S14})$$

其中  $E_J$  是能级  $J$  的能量. 这样, 可以选取 OH(A-X) 的一支谱线(本研究选取  $P_1(2)$ ), 然后联合以上各公式, 就可以根据吸光度计算得到基态·OH 粒子数密度.