

《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 ν 表示频率, c 表示光速, λ 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, α 表示碰撞参数, T_e 表示电子温度, ω 表示电子碰撞半高宽. 在大气压下, 可以将 α , T_e , ω 视为定值, 分别取 0.032, 1 eV 和 0.00537 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_{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_{pk} 和 λ_{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_{pk} 为跃迁概率, N_a 表示原子总布居数, Q_{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_{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/eV
738.40	5	8.5×10^6	13.30
751.47	1	4.0×10^7	13.27
794.82	3	1.86×10^7	13.28
800.62	5	4.9×10^6	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_{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_{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_{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	5.16×10^5	101.77
308.33	4	6.04×10^5	339.22
308.52	5	6.24×10^5	508.83
308.73	6	6.35×10^5	712.36
310.32	3	3.82×10^5	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 λ 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 λ 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_{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.