



论文

脉冲调制参数对微波Ar/CF₄等离子体射流特性的影响研究

陈思乐^{1*}, 王春龙¹, 王超¹, 王玉英¹, 陈兆权¹, 李平²

1. 安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山 243032

2. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 淮南 232001

*联系人, E-mail: silechen@ahut.edu.cn

收稿日期: 2025-07-06; 接受日期: 2025-08-11; 网络出版日期: 2025-11-10

国家自然科学基金(编号: 52207147, 12475253, 52407156, 52177126)资助项目

摘要 等离子体表面氟化是提升绝缘材料沿面耐电强度的有效方法之一, 而脉冲调制微波放电是产生高性能碳氟等离子体的一种重要途径. 为了更好地实现碳氟等离子体的参数调控与性能提升, 本文利用脉冲调制微波放电产生大气压Ar/CF₄等离子体射流, 对其放电形貌、活性成分、气体温度和电子密度等光电特性进行诊断, 重点探究脉冲调制参数(脉冲调制频率和占空比)对Ar/CF₄等离子体射流特性的影响. 结果表明, 脉冲调制频率的增加会使射流长度、活性成分浓度和电子密度均减小, 对气体温度的影响较小, 占空比的影响规律与调制频率相反. 在本文参数下, 可以将气体温度控制在329.22–382.82 K, 电子密度达到 10^{19} m^{-3} 数量级. 研究结果可为等离子体表面氟化应用提供参考.

关键词 脉冲调制微波放电, 等离子体射流, 碳氟等离子体, 等离子体表面处理

PACS: 52.50.Sw, 52.40.Fd, 52.35.Mw, 52.25.Os

1 引言

绝缘材料表面容易因为强电场作用产生的电荷积聚或二次电子发射诱发沿面闪络, 使其沿面耐电强度远低于体击穿场强, 限制绝缘系统的整体性能. 沿面闪络的影响因素众多, 而绝缘材料表面状态是其中的关键因素之一^[1–3]. 近年来, 等离子体中因富含高能电子、离子和自由基等活性粒子被广泛应用于辅助燃烧^[4]、农业生产^[5]和材料处理^[6]等领域. 研究表明, 等

离子体表面氟化可以在绝缘材料表面引入浅陷阱, 加快表面电荷消散, 同时增大表面粗糙度, 减小二次电子发射, 是提升绝缘材料沿面耐电性能的有效方法之一^[7–9].

等离子体表面氟化通常由CF₄等碳氟气体放电产生的碳氟等离子体实现. 由于大气压下CF₄的击穿场强较高, 早期的碳氟等离子体主要在低气压下产生^[10]. 近年来, 研究人员越来越多地关注无需依赖真空设备的大气压碳氟等离子体, 为了降低击穿场强和等离子

引用格式: 陈思乐, 王春龙, 王超, 等. 脉冲调制参数对微波Ar/CF₄等离子体射流特性的影响研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 275211
Chen S, Wang C, Wang C, et al. Study on the influence of pulse modulation parameters on the characteristics of microwave Ar/CF₄ plasma jets (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 275211, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0304](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0304)

体的气体温度, 常用较大比例(通常超过90%)的惰性气体(一般为Ar或He)与CF₄组成混合气体, 基于介质阻挡放电原理产生大气压碳氟等离子体^[11,12].

然而, 大量惰性气体的加入使活性碳氟粒子源的含量降低, 加之常用的介质阻挡均匀放电产生的等离子体密度不高(平均电子密度典型值约 10^{17} m^{-3} ^[13,14]), 导致现有的大气压碳氟等离子体对绝缘材料表面的氟化效率不高. 例如, 等离子体氟化后的绝缘材料表面氟含量大多在10%–20%^[15,16], 而氟气直接氟化后的绝缘材料表面氟化含量可达30%–40%^[17]. 因此, 碳氟等离子体的参数调控与性能提升是促进等离子体表面氟化应用的关键.

在绝缘材料表面氟化应用中, 较高的活性含氟基团密度有利于材料表面氟化反应的进行, 同时, 等离子体的气体温度不能过高, 以防对材料表面造成损伤. 近年来, 微波等离子体因其密度高和活性粒子丰富的优势得到了人们的关注^[18]. 基于谐振原理产生的微波电场具有局域增强效应, 可以有效电离工作气体产生等离子体, 但连续微波激励的放电能量耦合效率较低, 且易产生较高的气体温度, 限制了其对温度敏感作用对象的应用. 在此基础上, 研究人员开发了脉冲调制微波放电的方法, 结合脉冲调制技术降低微波等离子体的气体温度, 提高微波放电的能量效率^[19,20]. 同时, 脉冲调制参数本身对等离子体特性具有重要的影响^[21,22], 在脉冲调制微波放电中, 调制脉冲上下沿时刻产生的电离增强效应可以促进活性粒子产生^[23]. 因此, 脉冲调制技术还可以为微波等离子体的特性调控提供新的维度.

综上所述, 脉冲调制微波放电是产生大气压碳氟等离子体的一种重要途径, 有望实现高密度和低温度的碳氟等离子体产生, 提升碳氟等离子体性能. 本课题组前期在纯CF₄, Ar/CF₄和He/CF₄中优选了Ar/CF₄作为工作气体, 利用脉冲调制微波放电产生大气压碳氟等离子体射流, 并初步研究微波入射功率和气体比例对微波Ar/CF₄等离子体射流特性的影响^[24,25]. 然而, 目前研究还较少涉及脉冲调制参数对微波碳氟等离子体射流特性的影响.

针对上述问题, 本文系统研究了脉冲调制微波Ar/CF₄等离子体射流的放电形貌、活性成分、气体温度和电子密度等光电特性, 重点探究脉冲调制频率和占空比两种参数对Ar/CF₄等离子体射流特性的影响规

律, 分析这些影响的产生机制与调控方法. 研究结果可以促进碳氟等离子体的参数调控与性能提升, 为等离子体表面氟化应用提供参考.

2 实验平台与方法

2.1 等离子体产生

利用脉冲调制微波放电产生Ar/CF₄大气压等离子体射流(Ar/CF₄ Atmospheric Pressure Plasma Jet, Ar/CF₄ APPJ)的实验系统如图1所示, 该系统主要由电源系统、放电装置和供气系统构成.

(1) 电源系统

采用课题组自制的脉冲调制微波电源激励放电. 电源主要由脉冲信号调制器(占空比1%–99%, 频率10 Hz–200 kHz)、微波信号发生器(频率范围2.4–2.5 GHz, 输出功率1 mW)和53 dB功率放大器(输出功率0–200 W, 脉冲上升速率4 W/ns)组成. 在本实验中固定微波信号频率为2.45 GHz, 入射功率为60 W, 脉冲调制占空比的调节范围为30%–70%, 脉冲调制频率的调节范围为10–50 kHz.

(2) 放电装置

气体放电装置选取一端短路, 一端开路的四分之一波长同轴传输线谐振器(Coaxial Transmission Line Resonator, CTRL). CTRL的外径为18 mm, 为了在开口端附近获得更强的电场, 内径设计为锥形腔体结构, 由距短路端15 mm处向开路端逐渐变窄, 最大内径为14 mm, 最小内径为6 mm, 最小内径为CTRL开路端的端口直径. 内电极是一个头部为圆锥体的不锈钢针, 锥体底部半径为2 mm, 锥体高度为6 mm, 正常状态下, 针电极末端距离开口端2 mm. 此外, 在CTRL的短路端存在一个调节旋钮, 用来微调针电极与开口端之间的距离, 使放电处于最佳谐振状态. 微波能量从CTRL侧面的SMA (Sub-Miniature-A)接口馈入, 馈入位置距CTRL的短路端3 mm.

(3) 供气系统

采用高纯度Ar(99.999%)和CF₄(99.99%)混合气体作为工作气体, 通过气体流量显示仪和流量阀配合控制工作气体流量. 气体入口同样位于CTRL侧面, 距短路端3 mm. CTRL的中心对称结构可以使两种气体充分混合均匀. 通过前期实验发现, 较高的气体流量会使放电产生抖动, 变得不稳定. 并且由于CF₄的强电子

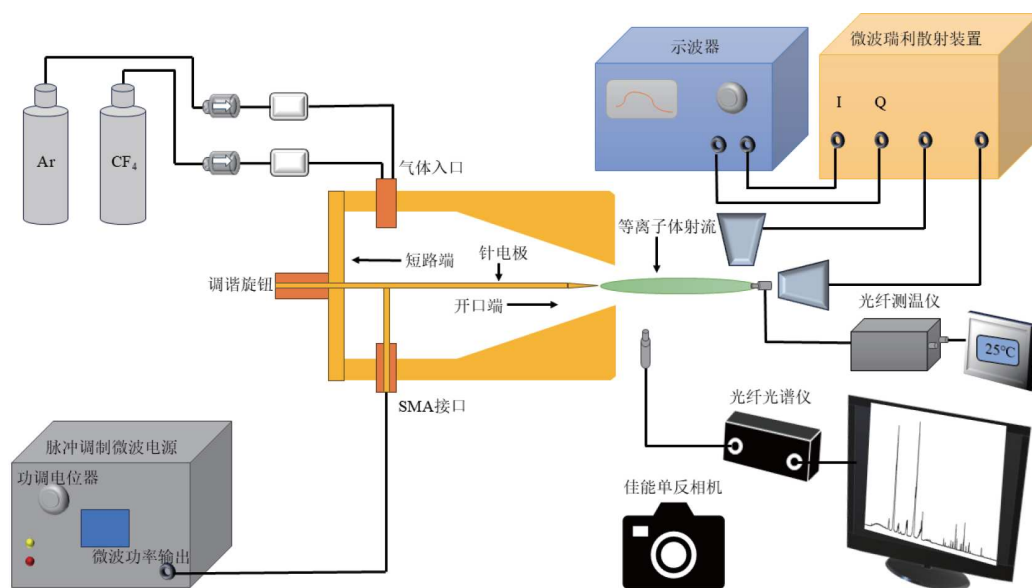


图 1 (网络版彩图)脉冲微波碳氟等离子体射流实验系统示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of pulsed microwave fluorocarbon plasma jet experimental system.

亲和性对放电的发展具有阻碍作用, 体积分数不宜过高. 气体总流量固定为3 L/min, CF₄体积分数固定为0.5%, 此时Ar和CF₄的气体流量分别为2.85和0.15 L/min. 在微波功率馈入后, 微波电源产生的微波能量通过SMA传输至CLTR内, 在装置的内电极和开路端之间形成一个局域增强的微波电场, 使工作气体电离产生等离子体射流.

2.2 等离子体表征

(1) 放电形貌

微波Ar/CF₄ APPJ的放电形貌通过数码单反相机(Canon, EOS60D, 最大像素1800万, 感光度在100–6400范围内可调, 最小曝光时间为1/8000 s)拍摄的放电图像进行表征. 拍摄放电图像时, 将单反相机垂直于等离子体射流放置, 并保持其与等离子体射流的距离为500 mm, 相机曝光时间设置为0.002 s, 光圈和感光度始终保持9.0和100不变. 实验过程中, 在探究某一参数对等离子体射流形貌的影响时, 需要严格保持相机的参数和位置不变, 以便于更严谨地对比参数变化前后射流形貌的变化.

(2) 活性成分

使用发射光谱仪(Avantes, 分辨率为1 nm, 光谱采集范围为200–1100 nm)对微波Ar/CF₄ APPJ的发射光

谱进行测量. 实验时, 将光纤探头一端垂直于等离子体射流放置, 与等离子体射流的距离固定为5 mm. 光纤探头与光谱仪连接, 光谱仪再与控制计算机连接, 通过计算机上的光谱仪专业控制软件(AvaSoft)调节光谱拍摄时的积分时间和积分次数. 根据实际光强, 在对微波Ar/CF₄ APPJ进行测量时, 将积分时间设置为10 ms, 积分次数固定为2次.

(3) 气体温度

微波Ar/CF₄ APPJ的气体温度通过荧光光纤测温仪(福州英诺电子, IF-C2A3F20)测量, 光纤测温仪由测温光纤、温度变送器和显示器组成. 其原理是: 温度传感器在不同温度下发出特定的光信号, 经过光纤传输到温度变送器后, 换算成温度数据通过显示器读取. 实验过程中, 测量气体温度前先记录室温, 然后使温度传感器接触等离子体射流, 显示器上的温度会逐渐增加, 待显示器上的读数稳定后(达到热平衡)记录数据, 作为气体温度的测量结果, 整个过程约20 s. 测量后将温度传感器远离等离子体射流, 待显示器上的温度重新恢复至室温后进行下一次测量. 每组数据测量三次并取平均值, 以减小实验误差.

(4) 电子密度

微波Ar/CF₄ APPJ的电子密度由课题组自制的微波瑞利散射装置测量. 微波瑞利散射装置由接收天

线、发射天线和I/Q混频器组成. 其原理是利用喇叭天线捕获等离子体射流弹性散射微波信号, 从而实现对等离子体射流电子总数的测定. 随后通过等效圆柱体的光学图像法估算微波Ar/CF₄ APPJ的体积, 进而计算出电子密度. 由于获得的总散射信号是随时间变化的, 因此本文测得的电子密度实质上为空间平均时变电子密度, 具体方法可见文献[26,27]. 它与总散射信号和等离子体瞬时体积的比值成正比. 计算公式如式(1)所示:

$$n_e = \frac{m_e \gamma_{en}}{Ae^2} \times \frac{U_{out}}{V_p}, \quad (1)$$

式中, A 为系统参数, 是微波系统的特定性质之一, 可以利用已知物理特性的介质散射体进行标定; e 为基元电荷量; m_e 为电子质量; V_p 为等离子体体积; U_{out} 为总散射电压信号.

测量时, I/Q混频器输出两路时变电压信号, 用示波器分别采集到同相/散射电压信号 $U_I(t)$ 和正交 Q 散射电压信号 $U_Q(t)$, 通过测得的两个电压信号进而得到总散射电压. 两个喇叭天线保持相互垂直, 并放置于距微波碳氟等离子射流10 mm处, 从而保证测得的散射信号与微波等离子体的电子密度线性相关. 装置的I/Q混频器输出端口直接与示波器相连接, 示波器捕捉电压信号波形. 为了减少随机误差, 提高测量精度, 在未放电时分别采集100个 U_I 和 U_Q 的数据计算平均值, 即 $U_{I(0)}$ 和 $U_{Q(0)}$, 再通过作差法分别计算出两个散射电压信号的差值. 最终得到总散射电压信号如式(2)所示:

$$U_{out} = \sqrt{(U_Q(t) - U_Q(0))^2 + (U_I(t) - U_I(0))^2}. \quad (2)$$

将测得的结果拟合到自编的软件程序进行计算处理后, 得到最终数据结果.

3 实验结果与讨论

3.1 放电形貌

放电形貌是研究脉冲调制参数对微波Ar/CF₄ APPJ特性影响中的关键指标之一, 可以直观地反映出各个参数对等离子体的影响. 不同的脉冲调制占空比和频率下微波Ar/CF₄ APPJ放电形貌和长度的变化分别如图2和3所示.

从图2可以看出, 微波Ar/CF₄ APPJ整体以圆柱体

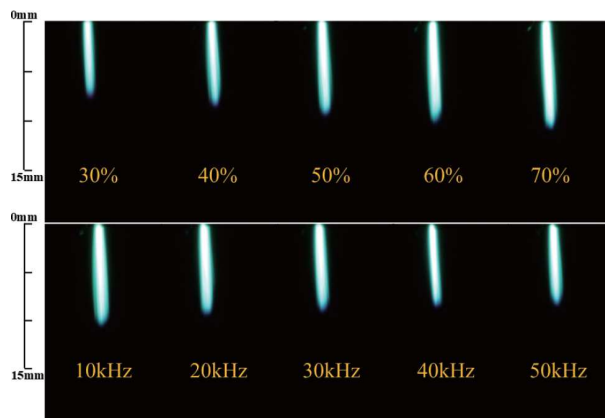


图2 (网络版彩图)不同脉冲调制占空比和频率下Ar/CF₄ APPJ形貌

Figure 2 (Color online) Morphology of Ar/CF₄ APPJ under different pulse modulation duty cycles and frequencies.

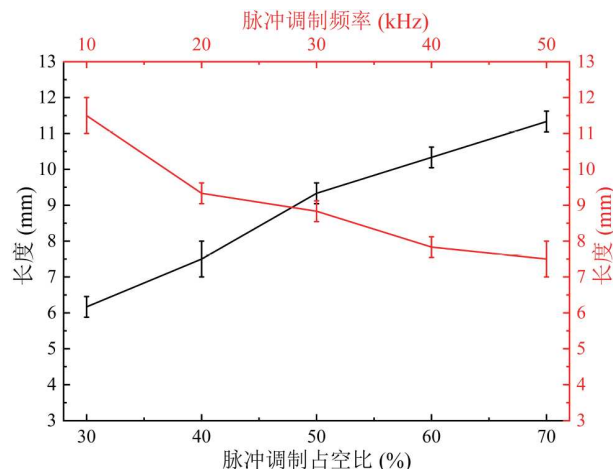


图3 (网络版彩图)不同脉冲调制占空比和频率下Ar/CF₄ APPJ长度

Figure 3 (Color online) Length of Ar/CF₄ APPJ under different pulse modulation duty cycles and frequencies.

的形状存在, 并且呈现较为均匀的结构分布, 仔细观察可知, Ar/CF₄ APPJ中间位置处亮度较高, 放电强度较强, 在其四周包裹着强度较低的放电. 探究30%–70%范围内的脉冲调制占空比对放电形貌的影响. 此时固定微波入射功率为60 W, 微波电源的脉冲调制频率为20 kHz, CF₄体积分数为0.5%, 总气体流量保持3 L/min. 当脉冲调制占空比由30%增加至70%, Ar/CF₄ APPJ的长度由6 mm增大至11 mm左右, 且随着脉冲调制占空比的增加, 微波Ar/CF₄ APPJ中间位置明亮的主放电通道逐渐增大. 脉冲调制占空比是指脉冲调制中“开”的时间与整个周期时间的比例, 在其他条件不变

的情况下, 增大占空比意味着在单位周期内, 脉冲“开”的时间增加. 微波能量在每个脉冲内的持续时间延长, 装置开口端强电场的作用时间增加, 输送到等离子体的微波能量增加, 等离子体射流的发展得以提升, 有利于形成更为稳定和高能量的等离子体射流, 因此等离子体射流的长度变长. 随着脉冲调制频率由 10 kHz 增加到 50 kHz (脉冲调制占空比: 50%, 微波入射功率: 60 W, CF_4 体积分数为 0.5%, 总气体流量: 3 L/min), 微波 Ar/ CF_4 APPJ 的长度整体呈现减小的趋势. 10 kHz 时, 等离子体射流的长度约为 11.5 mm, 而当脉冲调制频率增加至 60 kHz 时, 长度则减小到 7 mm 左右. 此外, 从图 3 可以看到, 射流形貌的变化并不局限于长度, 其宽度大体上随着脉冲调制频率的增加而变窄. 脉冲调制频率决定脉冲放电周期, 在其他参数不变的情况下, 增大脉冲调制频率意味着单个周期时间缩短, 微波能量在短时间内难以有效积累, 输入到等离子体中的微波能量减少^[28]. 等离子体的电离程度难以达到较高的水平, 从而导致射流长度减小. 此外, 脉冲调制频率增加会使电场强度的周期性变化更加频繁, 这使得等离子体射流的形成和发展变得不稳定, 使其向外延伸的能力被抑制.

3.2 活性成分

3.2.1 活性粒子总体情况

活性粒子是等离子体与材料表面产生直接作用的主要成分, 活性粒子的种类和含量决定等离子体实际应用的场景. 通过微波 Ar/ CF_4 APPJ 的发射光谱可以获得放电过程中主要活性粒子种类和含量的变化规律. Ar/ CF_4 APPJ 的典型发射光谱 (脉冲调制频率 20 kHz、占空比 50%) 如图 4 所示.

结合诊断结果和文献^[29,30], 微波 Ar/ CF_4 APPJ 中主要包含的激发反应物种类有 F, CF_2 , CF_3 , C_2 和 Ar 等粒子. 其中, 在 220–380 nm 范围内出现一个由 CF_2 自由基、 CF_2^+ 离子 [$\text{CF}_2(\text{A}^1\text{B}^1-\text{X}^1\text{A}^1)$ 和 $\text{CF}_2^+(4b^2-6a^1)$] 组成的一个连续光谱, $\text{CF}_3(\text{A}-\text{X})$ 连续谱线位于 590–630 nm 之间的可见光区域; F 粒子谱线出现在 387.8 nm 处; 此外, 还有 3 条较为明显且连续的 C_2 基团谱线; Ar 粒子谱线则集中于 700–920 nm 之间. 根据文献^[31–33], Ar/ CF_4 产生等离子体射流过程中, 在高能电子的碰撞下活性粒子基团主要由电离、解离和电子碰撞激发等反应形成, Ar/ CF_4 APPJ 中主要成分反应以及速率常数相

关信息如表 1 所示.

3.2.2 占空比对活性成分的影响

图 5 给出脉冲调制频率为 20 kHz 时不同脉冲调制占空比下的微波 Ar/ CF_4 APPJ 发射光谱. 观察可知, 位

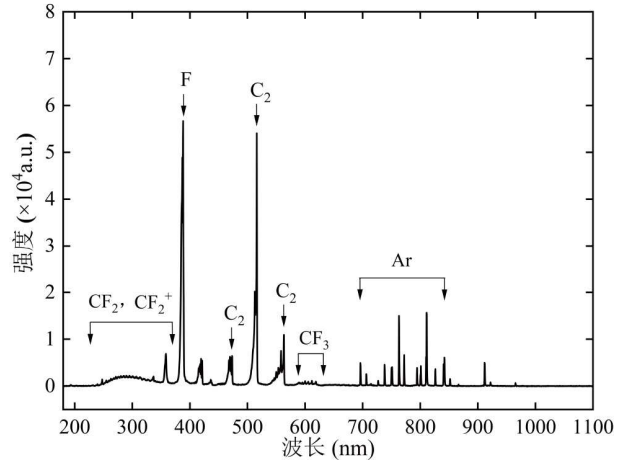


图 4 脉冲调制频率 20 kHz、占空比 50% 时, 微波 Ar/ CF_4 APPJ 的发射光谱

Figure 4 The emission spectrum of microwave Ar/ CF_4 APPJ at a pulse modulation frequency of 20 kHz and a duty cycle of 50%.

表 1 微波 Ar/ CF_4 APPJ 活性粒子相关生成反应^{a)}

Table 1 Microwave Ar/ CF_4 APPJ active particle related generation reactions

相关谱线	反应	速率常数
811.0 nm	$\text{e} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar s}^* + \text{e}$	1×10^{-9}
706.3 nm	$\text{e} + \text{Ar}^+ + \text{CF}_4 \rightarrow \text{Ar s}^* + \text{CF}_4$	1.4×10^{-32}
611.7 nm	$\text{e} + \text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_3 + \text{F} + \text{e}$	$A = 1.38 \times 10^{-14}$, $B = 0$, $C = 16.0$
611.7 nm	$\text{e} + \text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_3 + \text{F}^-$	$A = 5.9 \times 10^{-16}$, $B = -1$, $C = 5.2$
275.7 nm	$\text{e} + \text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_2 + 2\text{F} + \text{e}$	$A = 2.22 \times 10^{-16}$, $B = 0.99$, $C = 14.77$
275.7 nm	$\text{e} + \text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_2 + \text{F} + \text{e}$	$A = 6.48 \times 10^{-14}$, $B = -0.96$, $C = 11.25$
连续谱	$\text{e} + \text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_3^+ + \text{F} + 2\text{e}$	$A = 9.36 \times 10^{-14}$, $B = 0$, $C = 20.4$
连续谱	$\text{e} + \text{CF}_4 \rightarrow \text{CF}_2^+ + 2\text{F} + 2\text{e}$	$A = 1.27 \times 10^{-14}$, $B = 0$, $C = 29.0$
连续谱	$\text{e} + \text{CF}_3 \rightarrow \text{CF}_3^+ + 2\text{e}$	$A = 8 \times 10^{-15}$, $B = 0$, $C = 12.2$
连续谱	$\text{e} + \text{CF}_2 \rightarrow \text{CF}_2^+ + 2\text{e}$	$A = 2.5 \times 10^{-14}$, $B = 0$, $C = 12.2$

a) 双体和三体反应的速率常数单位分别为 $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ 和 $\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$; A , B 和 C 代表速率常数 $k = A T_e^B \exp(-C/T_e)$ 的形式表示, T_e : 电子温度; 单位: K.

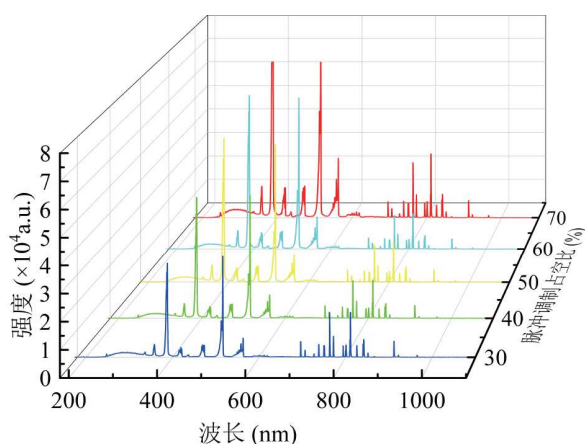


图 5 (网络版彩图)脉冲调制频率为20 kHz时, 不同脉冲调制占空比下Ar/CF₄ APPJ的发射光谱

Figure 5 (Color online) Emission spectra of Ar/CF₄ APPJ at different pulse modulation duty cycles when the pulse modulation frequency is 20 kHz.

于387.8 nm位置处的F原子谱线以及位于516.5 nm位置处的C₂基团谱带强度最大. 由于CF₄电离途径主要是电子碰撞引起的逐级电离, 由此可以推断, Ar的加入可以有效地促进CF₄分子电离. 随着脉冲调制占空比的增加, 微波Ar/CF₄ APPJ的活性粒子谱线强度均呈现增强的趋势, 即脉冲调制占空比的增加会使得活性粒子的含量和浓度逐渐增强. 此外, 光谱结果表明, Ar/CF₄ APPJ中的主要粒子种类并没有发生改变. 值得注意的是, 在脉冲调制占空比为30%时已经出现少量的CF₃基团的连续谱, 可能是此时微波能量在Ar/CF₄ APPJ中较为分散, 导致部分CF₄电离程度较小, 形成少量的CF₃基团.

不同脉冲调制占空比下微波Ar/CF₄ APPJ的典型粒子光谱强度如图6所示. 从图中可以看出, 随着脉冲调制占空比的增加, 所有粒子强度均会增强. 当脉冲调制占空比达到50%时, 继续增大占空比, 主要粒子(F和C₂)强度增加的速率放缓. 结合上文, 当占空比达到50%后, 等离子体射流长度改变的幅度同样变小. 原因是体积更大的等离子体在生成中需要消耗更多的微波能量. 占空比增大意味着在单位时间内, 高能电子数和微波能量增加, 从而电子与气体分子之间的碰撞频率也随之增加. 这些碰撞不仅能够增加气体分子电离的概率, 还能将分子激发到高能级状态, 从而产生更多的激发态粒子, 在较长的脉冲持续时间内, 激发态粒子有更多的时间进行能量的积累和传递, 进一步增强

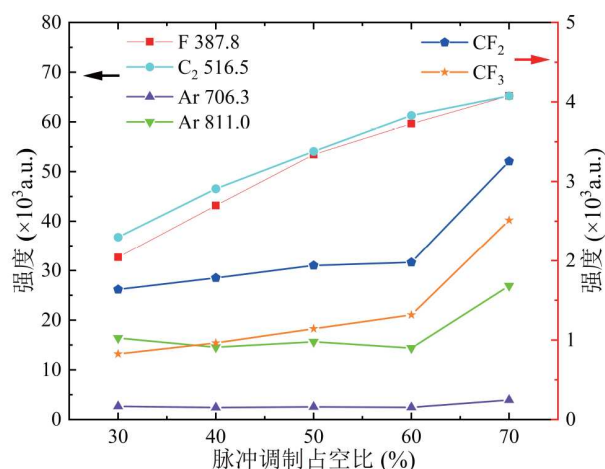


图 6 (网络版彩图)脉冲调制频率为20 kHz时, 不同脉冲调制占空比下Ar/CF₄ APPJ的粒子强度

Figure 6 (Color online) Particle intensity of Ar/CF₄ APPJ at different pulse modulation duty cycles when the pulse modulation frequency is 20 kHz.

了谱线强度.

3.2.3 脉冲调制频率对活性成分的影响

脉冲调制占空比为50%时不同脉冲调制频率下的微波Ar/CF₄ APPJ发射光谱如图7所示. 由图可知, 随着脉冲调制频率的增加, 微波Ar/CF₄ APPJ活性粒子谱线强度均呈现出减弱的趋势. 值得注意的是, 相较于脉冲调制占空比, 脉冲调制频率对活性粒子的影响相对较小. 这与上文所测得的放电形貌中等离子体射流长度的变化趋势相符.

图8给出了不同脉冲调制频率下微波Ar/CF₄ APPJ的典型粒子光谱强度. 图中数据表明, 随着脉冲调制占空比的增加, 相较于其他粒子(如CF₂和CF₃), C₂基团的光谱强度衰减幅度最大. 主要原因是C₂基团形成所需的外加能量阈值高于CF₂基团, 而CF₂基团形成所需的外加能量阈值又高于CF₃基团. 随着脉冲调制频率的增加, 粒子强度呈现减弱趋势. 其原因可能是: 虽然较高的脉冲调制频率增加了单位时间内的脉冲周期数及边沿数量, 但同时显著缩短了单位周期持续时间. 这导致每个周期内微波能量积累时间不足, 且随着脉冲调制频率的增加, 等离子体吸收功率的波动幅度将增大^[34]. 因此, 与单位周期时间较长的低脉冲调制频率相比, 高脉冲调制频率下高能电子数量减少, 微波能量降低, 粒子间有效碰撞时间缩短, 从而导致活性粒子的含量下降. 值得注意的是, 由于C₂基团的形成需

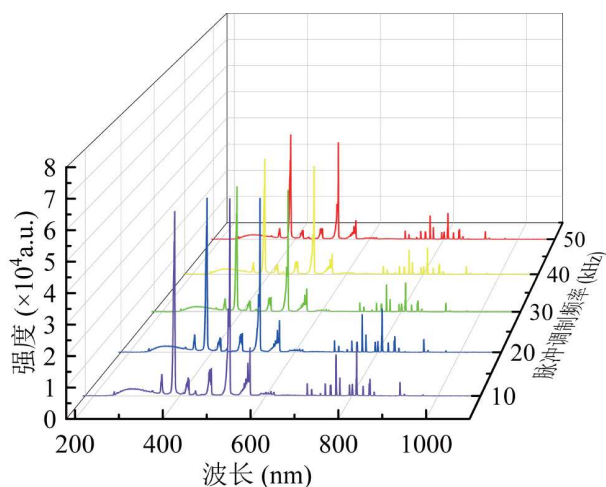


图 7 (网络版彩图)脉冲调制占空比为50%时, 不同脉冲调制频率下Ar/CF₄ APPJ的发射光谱

Figure 7 (Color online) Emission spectra of Ar/CF₄ APPJ at different pulse modulation frequencies when the pulse modulation duty cycle is 50%.

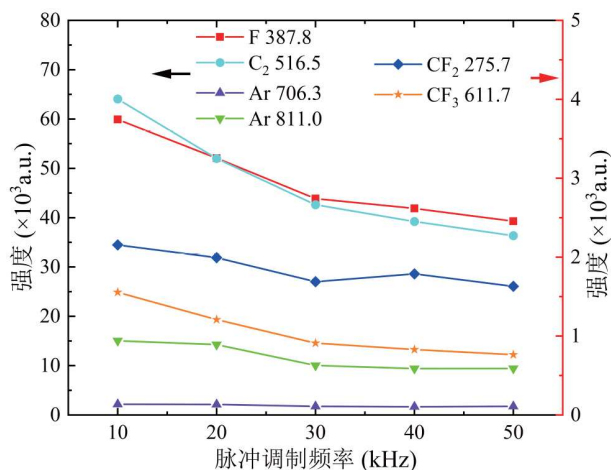


图 8 (网络版彩图)脉冲调制占空比为50%时, 不同脉冲调制频率下Ar/CF₄ APPJ的粒子强度

Figure 8 (Color online) Particle intensity of Ar/CF₄ APPJ at different pulse modulation frequencies when the pulse modulation duty cycle is 50%.

要较高的外加能量阈值, 在微波能量减少的情况下, 其光谱强度的衰减幅度尤为显著。

谱线强度直接反映了微波Ar/CF₄ APPJ活性粒子的浓度。实验结果表明, 随着脉冲调制占空比的增加, Ar/CF₄ APPJ中各类活性粒子含量显著上升, 包括对氟化改性至关重要的含氟基团(F, CF₂和CF₃), 相较于脉冲调制占空比, 脉冲调制频率对活性粒子含量的影响较弱。随着脉冲调制频率的增加, 微波Ar/CF₄ APPJ中

活性粒子的含量总体呈下降趋势。

3.3 气体温度

等离子体射流的气体温度直接决定了其实际应用范围。尤其在表面改性领域, 不同材料的耐热性差异显著。因此, 研究脉冲调制参数对碳氟等离子体射流的气体温度的影响规律, 并据此实现温度的精确调控, 对于拓展其在各类材料表面改性中的应用范围和实现理想的处理效果至关重要。通过光纤测温仪对Ar/CF₄等离子体射流的气体温度进行测量。不同脉冲调制占空比和频率下微波Ar/CF₄ APPJ的气体温度如表2所示。在探究脉冲调制占空比对气体温度的影响时, 固定脉冲调制频率为20 kHz, 脉冲调制占空比在30%–70%范围调节。

从表2中可以看出, 随着脉冲调制占空比的逐渐增加, 等离子体射流的温度呈现线性增长, 在脉冲调制占空比为30%时, 微波Ar/CF₄ APPJ的温度仅为329.15 K左右, 而当脉冲调制占空比增加至70%时, Ar/CF₄ APPJ的温度上升到395.15 K。仔细观察可知, 温度随脉冲调制占空比的增幅有明显规律, 脉冲调制占空比每增加10%, 温度的增幅总保持在283.15–293.15 K之间, 不会出现大幅度的增加。随着占空比的增加, 一个周期内放电时间增加, 更多的微波能量耦合到等离子体中, 能量被带电粒子吸收, 加速粒子间的碰撞, 它们的动能转化为热能, 从而导致射流温度上升。然而, 随着脉冲调制占空比的增加, 等离子体内部电子与中性粒子之间的非弹性碰撞过程会造成微波能量的耗散, 导致能量转化为内能而非动能。此外, 射流的体积也相应增大, 射流与环境气体之间的热量交换速率得以提升, 环境气体对等离子体射流起到了一定的冷却作用。因此, 碳氟等离子体的温度不会随脉冲调制占空比的增加出现大幅度的增加。

表 2 不同脉冲调制占空比和频率下Ar/CF₄ APPJ的温度

Table 2 Temperature of Ar/CF₄ APPJ under different pulse modulation duty cycles and frequencies

脉冲调制占空比 (%)	气体温度 (K)	脉冲调制频率 (kHz)	气体温度 (K)
30	329.22±0.59	10	370.55±0.71
40	341.72±1.79	20	371.85±0.40
50	358.65±0.75	30	362.35±0.61
60	372.25±1.51	40	375.35±0.84
70	382.82±0.74	50	378.25±1.04

在探究脉冲调制频率对微波Ar/CF₄ APPJ气体温度的影响时放电参数设置为: 脉冲调制频率在10–50 kHz范围内调节, 脉冲调制占空比固定为50%. 由表2可见, 当脉冲调制频率为10 kHz时, 气体温度约为370.15 K, 脉冲调制频率增加至50 kHz, 气体温度增加到378.15 K左右, 脉冲调制频率增加四倍时, 气体温度仅增加了281.15 K左右. Ar/CF₄ APPJ的温度随着脉冲调制频率的增加变化并不明显, 温度的增加幅度很小. 并且在脉冲调制频率为30 kHz时温度出现小幅度的下降, 继续增加脉冲调制频率, 温度将重新回归正常的增加趋势. 脉冲调制频率的增加缩短了脉冲周期, 进而减少每个脉冲的能量注入时间. 这导致电子与气体分子间的碰撞频率和能量传递效率降低, 注入等离子体的总能量减少, 同时热积累时间缩短. 上述因素共同作用, 致使频率增至30 kHz时气体温度下降. 然而, 当脉冲调制频率继续增加, 等离子体射流逐渐适应高频能量输入模式. 此时, 电子与气体分子的碰撞反应可能达到一种新的动态平衡. 更重要的是, 单位时间内的脉冲数量显著增多, 其累积效应可能导致热累计时间相较30 kHz时略有回升. 这使得气体温度回归至初始(10–20 kHz范围)的上升趋势.

实验结果表明, 相较于脉冲调制频率, 脉冲调制占空比对微波Ar/CF₄ APPJ气体温度的影响更为显著. 因此, 针对具有不同耐热性的材料进行表面氟化时, 可通过调节脉冲调制占空比实现对射流温度的有效控制. 在此基础上, 优化选择脉冲调制参数组合(占空比与频率), 可获得较优的表面处理效果.

3.4 电子密度

电子密度是影响等离子体性质的重要参数之一, 了解电子密度有利于调节等离子体的性能, 优化放电条件和提高反应的效率. 通过微波瑞利散射装置对Ar/CF₄ APPJ的电子密度进行测量, 实验时, 严格控制测量仪器的参数及位置.

在通过等效圆柱体的光学图像法估算不同脉冲调制参数下微波Ar/CF₄ APPJ的体积时, 等离子体射流的等效长度采用相应脉冲调制参数下的射流长度, 由于Ar/CF₄ APPJ的半径随脉冲调制占空比和频率的变化趋势很小, 因此, 通过实际测量, 将射流的等效半径固定为0.9 mm. 与此同时, 利用示波器分别采集得到相应脉冲调制参数下的同相I散射电压信号 $U_I(t)$ 和正交Q散

射电压信号 $U_Q(t)$. 最后将测得的微波瑞利散射信号和等离子体射流等效长度与等效半径实验数据拟合到自制软件中, 得到不同脉冲调制参数下的空间平均时变电子密度.

图9给出了一个周期内微波Ar/CF₄ APPJ电子密度的发展趋势, 放电参数设置为: 脉冲调制频率20 kHz、占空比50%. 从图中可以看出, 在一个放电周期内, 微波Ar/CF₄ APPJ的电子密度整体上随着时间的推进呈现先上升后下降的趋势. 电子密度在一个周期内有两次主导电离, 分别是脉冲上升沿和脉冲下降沿^[35]. 大约在3 μ s时刻, 电子密度迅速增大至 10^{19} m^{-3} 数量级, 说明在3 μ s时刻发生了第一次电离增强效应, 此时为脉冲的上升沿. 从3–25 μ s时刻, 电子密度数呈阶梯式增加, 电子密度从 $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 上升到 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 在脉冲下降沿25 μ s时刻即脉冲消失时, 电子密度并没有瞬时减小到0, 而是存在一个陡然上升的过程, 达到一个周期内的最大值. 随着时间的推移, 大约在32 μ s时刻电子密度降为0, 放电熄灭.

不同脉冲调制占空比和频率下Ar/CF₄ APPJ的电子密度如图10和11所示. 从图中可以看出, 在脉冲调制周期内, 脉冲调制占空比和频率的增加不会对Ar/CF₄ APPJ电子密度峰值产生明显的影响, APPJ中的电子密度峰值始终保持在 $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 的数量级上下, 远高于已报道的DBD等离子体 10^{17} m^{-3} 的电子密度, 这也证实微波等离子体具有高密度的特性. Ar/CF₄ APPJ

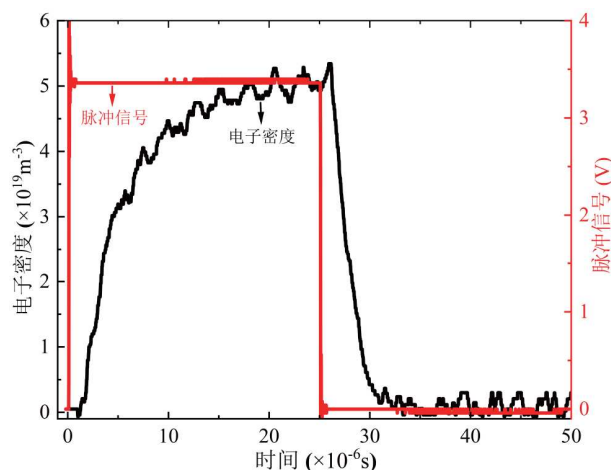


图9 (网络版彩图)脉冲调制频率20 kHz、占空比50%时, Ar/CF₄ APPJ的电子密度

Figure 9 (Color online) Electron density of Ar/CF₄ APPJ at a pulse modulation frequency of 20 kHz and a duty cycle of 50%.

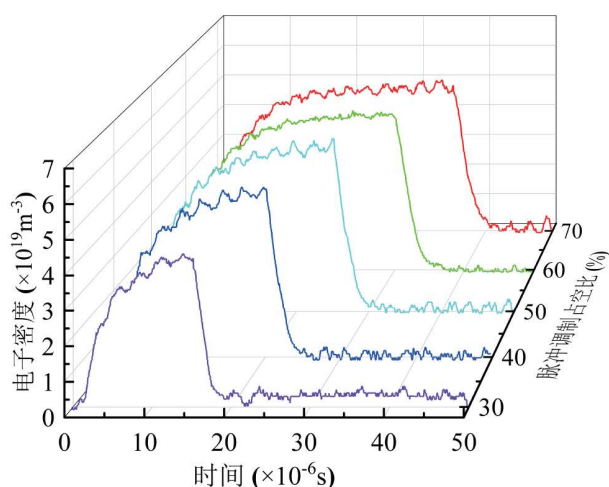


图 10 (网络版彩图)脉冲调制频率为20 kHz时,不同脉冲调制占空比下Ar/CF₄ APPJ的电子密度

Figure 10 (Color online) Electron density of Ar/CF₄ APPJ at different pulse modulation duty cycles when the pulse modulation frequency is 20 kHz.

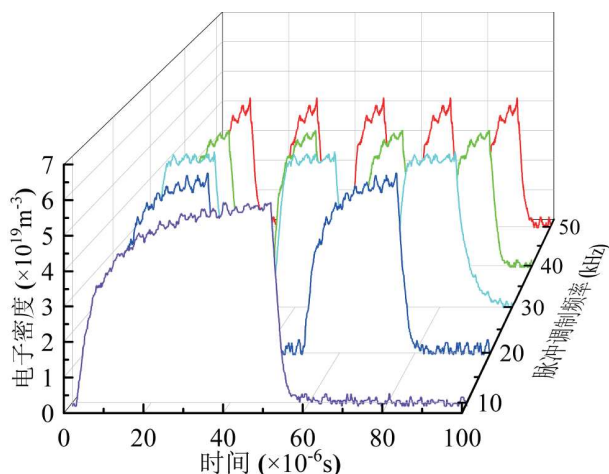


图 11 (网络版彩图)脉冲调制占空比为50%时,不同脉冲调制频率下Ar/CF₄ APPJ的电子密度

Figure 11 (Color online) Electron density of Ar/CF₄ APPJ at different pulse modulation frequencies when the pulse modulation duty cycle is 50%.

电子密度峰值不受占空比的影响原因是: 脉冲调制占空比的增加会使同轴谐振器开口端的局域增强微波电场增大进而促进放电的发展, Ar/CF₄ APPJ中各个粒子之间的碰撞频率增加, 进一步有效电离其他气体分子, 释放出更多电子, 使得Ar/CF₄ APPJ中的电子总数增加。然而, 电子密度还受到等离子体射流体积的影响^[36], 脉冲调制占空比的增加同样会使射流的体积增加。当微波Ar/CF₄ APPJ中的电子数和体积增长率近似

同步时, 电子数的净增量会被体积膨胀效应部分抵消。因此, 脉冲调制占空比变化时, Ar/CF₄ APPJ电子密度峰值不会发生较为明显的变化。同理, 在上文脉冲调制频率对放电形貌的研究中发现频率的增加会使射流长度缩短, 体积减少。与此同时, 电子总数也会随频率的增加而减少, Ar/CF₄ APPJ的电子数和体积随脉冲调制频率的变化同样呈现相同的减少趋势。因此, Ar/CF₄ APPJ电子密度也同样不会随脉冲调制频率的增加出现明显的变化。

但是, 单位周期内Ar/CF₄ APPJ电子密度峰值出现的时间以及单位时间内空间平均电子密度在脉冲调制占空比和频率中均发生了变化。由图10可见, 在固定周期时间内, 随着脉冲调制占空比的增加, 电子密度峰值出现的时间逐渐延迟。具体而言, 当占空比为30%时, 峰值出现在15 μ s; 而当占空比增至70%时, 峰值延迟至35 μ s出现。仔细观察可知, 占空比每增加10%, 峰值出现时间相应延迟5 μ s, 呈现良好的线性相关性。这一规律源于以下机制: 在周期时间不变的前提下, 占空比增大意味着脉冲作用时间延长。受两次电离增强效应的影响, 电子密度峰值始终出现在脉冲的下降沿时刻。因此, 当占空比增加时, 脉冲下降沿相应延迟, 导致电子密度峰值出现的时间必然延长。峰值出现的时间延长也意味着电离增强的总时间增加, 第二次电离增强结束的时间被推迟。由于在第二次电离增强结束前电子密度的数值始终呈现逐渐增加的趋势且维持在较高的数量级。因此, 在单位周期内, 微波Ar/CF₄ APPJ的平均电子密度随脉冲调制占空比的增加逐渐升高。从图11可以看出, 单位周期时间内, 随着脉冲调制频率的增加, 等离子体电子密度峰值出现的时间逐渐提前。例如, 当频率为10 kHz时, 峰值出现在50 μ s; 而当频率增至50 kHz时, 峰值则提前至10 μ s。其原因是: 频率增加导致单个脉冲周期缩短。在其他参数不变的前提下, 周期缩短必然使峰值出现的时间点提前。此外, 频率每增加10 kHz, 单位时间内的脉冲周期数增加一个。由于电离增强主要发生在每个脉冲周期内, 周期数的增加意味着单位时间内电离增强效应发生的次数增多。然而, 脉冲周期的缩短也意味着每个周期内可用于电离增强的有效时间减少。这使得等离子体中的电子难以在更短的时间内充分产生和积累。因此, 尽管单位时间内电离增强的次数增多, 微波Ar/CF₄ APPJ的平均电子密度仍随脉冲调制频率的增加而逐渐降低。

在微波Ar/CF₄ APPJ中, 较高的平均电子密度意味着单位体积内参与反应的高能电子数量增多, 从而提高了电子与含氟离子、分子等粒子的碰撞频率. 这一过程有效促进含氟基团的生成. 实验结果表明, 当脉冲调制占空比较高或脉冲调制频率较低时, 等离子体射流的平均电子密度显著高于其他参数组合下的值. 这与脉冲调制参数对活性成分(含氟基团)的影响规律相吻合. 因此可以推断, 在利用脉冲调制微波碳氟等离子体进行表面氟化时, 依据特定应用需求, 适当提高脉冲调制占空比或降低脉冲调制频率, 有助于提升含氟基团含量, 进而促进氟化反应.

4 结论

本文以Ar和CF₄作为工作气体, 在大气压下产生脉冲调制微波碳氟等离子体射流, 系统地研究了脉冲调制占空比和频率对微波碳氟等离子体射流放电形貌、活性成分、气体温度和电子密度的影响. 研究结果可为脉冲调制微波碳氟等离子体的参数调控与性能提升提供参考, 促进等离子体表面氟化应用. 主要结论如下.

(1) 大气压微波Ar/CF₄等离子体射流中主要包含

激发态Ar原子, F原子, CF₂, CF₃基团和C₂基团等, 且位于387.8 nm位置处的F元素谱线以及位于516.5 nm位置处的C₂粒子谱线强度最大; 电子密度最高可以达到 10^{19} m^{-3} 数量级; 在本文参数下, 通过脉冲调制占空比和频率的共同作用可以将气体温度控制在329.22–382.82 K.

(2) 脉冲调制占空比的增加显著提升了微波Ar/CF₄ APPJ的射流长度、含氟基团含量和气体温度. 同时, 由于脉冲作用时间的延长, 空间平均电子密度也随之升高. 相比之下, 脉冲调制频率对微波Ar/CF₄ APPJ特性的影响显著弱于占空比. 具体表现为: 脉冲调制频率的增加会导致微波Ar/CF₄ APPJ的射流长度缩短、含氟基团含量降低和空间平均电子密度下降, 而气体温度受频率变化的影响则相对较小.

(3) 实验表明, 在本文实验参数下, 当脉冲调制占空比最高(70%)或脉冲调制频率最低(10 kHz)时, 微波Ar/CF₄ APPJ的含氟基团(F, CF₂和CF₃)含量最高, 平均电子密度最大. 由此可以推断, 适当增大脉冲调制占空比、减小脉冲调制频率可以获得密度更高、活性粒子更丰富的微波Ar/CF₄ APPJ, 并且可以通过改变脉冲调制占空比对微波Ar/CF₄ APPJ的气体温度进行有效调控.

参考文献

- Xie Q, Fu K X, Lu L, et al. AFM analysis and fractal feature extraction of surface morphology of epoxy resin after vacuum flashover rans (in Chinese). *China Electrotech Soc*, 2017, 32: 245–255 [谢庆, 付可欣, 陆路, 等. 环氧树脂真空沿面闪络后表面形貌的AFM分析及分形特征提取. *电工技术学报*, 2017, 32: 245–255]
- Hu D, Ren C Y, Kong F, et al. The influence of surface roughness on the vacuum surface flashover characteristics of polymer materials (in Chinese). *China Electrotech Soc*, 2019, 34: 3512–3521 [胡多, 任成燕, 孔飞, 等. 表面粗糙度对聚合物材料真空沿面闪络特性的影响. *电工技术学报*, 2019, 34: 3512–3521]
- Ma C Q, Zhang Q G, Wen T. Research progress on the effect of solid insulation surface on its flashover mechanism (in Chinese). *High Volt Appar*, 2018, 54: 1–8 [马超群, 张乔根, 文韬. 固体绝缘表面状态对其闪络机理影响的研究进展. *高压电器*, 2018, 54: 1–8]
- Li P, Peng C, Tao H Y, et al. Magnetic field enhanced DBD plasma improves the characteristics of coal combustion (in Chinese). *High Volt Eng*, 2023, 49: 4436–4444 [李平, 彭超, 陶华杨, 等. 磁场增强DBD等离子体改善煤炭燃烧的特性. *高电压技术*, 2023, 49: 4436–4444]
- Li P, Tao H Y, Peng C, et al. The effects of DBD plasma and activated water on the growth characteristics and yield of potatoes (in Chinese). *High Volt Eng*, 2024, 50: 1742–1751 [李平, 陶华杨, 彭超, 等. DBD等离子体与活化水对马铃薯生长特性及产量的影响. *高电压技术*, 2024, 50: 1742–1751]
- Qiu Y C, Fang Z. Research on improving the hydrophobicity of glass surface with low temperature plasma in the atmosphere (in Chinese). *J North China Electr Power Univ*, 2004, 31: 5–9 [邱毓昌, 方志. 用大气中低温等离子体提高玻璃表面憎水性的研究. *华北电力大学学报*, 2004, 31: 5–9]
- Chen S, Cheng T, Chen Z, et al. Mechanism on improved surface flashover performances in vacuum of epoxy resin using fluorocarbon plasma treatment. *High Voltage*, 2022, 7: 420–428

- 8 Song Y Z, Liang G S, Ran H J, et al. Research on plasma treatment to regulate surface conductivity and improve the insulation performance of epoxy resin (in Chinese). *China Electrotech Soc*, 2023, 38: 3984–3998 [宋岩泽, 梁贵书, 冉慧娟, 等. 等离子体处理调控表面电导率提高环氧树脂绝缘性能的研究. *电工技术学报*, 2023, 38: 3984–3998]
- 9 Shao T, Yang W, Zhang C, et al. Enhanced surface flashover strength in vacuum of polymethylmethacrylate by surface modification using atmospheric-pressure dielectric barrier discharge. *Appl Phys Lett*, 2014, 105: 071607
- 10 Lieberman M A, Lichtenberg A J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005
- 11 Chen S, Chen X, Yao C, et al. Electrical and spectral characterization of an atmospheric pressure He/CF₄ plasma jet. *Phys Plasmas*, 2018, 25: 083510
- 12 Ding Z F, Fang Z, Xu J. Influences of CF₄ content on discharge characteristics of argon plasma jet under atmospheric pressure (in Chinese). *China Electrotech Soc*, 2016, 31: 159–165 [丁正方, 方志, 许靖. 四氟化碳含量对大气压Ar等离子体射流放电特性的影响. *电工技术学报*, 2016, 31: 159–165]
- 13 Liu J, Wang L, Zhang R, et al. Effect of small amount of CF₄ addition on He and Ar atmospheric pressure plasma jet and influence of relative permittivity of downstream material on plasma–surface interaction. *Phys Plasmas*, 2022, 29: 083502
- 14 Massines F, Gherardi N, Naudé N, et al. Recent advances in the understanding of homogeneous dielectric barrier discharges. *Eur Phys J Appl Phys*, 2009, 47: 22805
- 15 Chen S, Cheng T, Chen Z, et al. Multi-effects of atmospheric He/CF₄ plasma jet treatment on the surface properties of epoxy resin. *Appl Surf Sci*, 2021, 544: 148956
- 16 Wang R, Zhang C, Liu X, et al. Microsecond pulse driven Ar/CF₄ plasma jet for polymethylmethacrylate surface modification at atmospheric pressure. *Appl Surf Sci*, 2015, 328: 509–515
- 17 Zhou R D, Sun G Y, Song B P, et al. Mechanism of F₂/N₂ fluorination mitigating vacuum flashover of polymers. *J Phys D-Appl Phys*, 2019, 52: 375304
- 18 Chen Z Q, Zhang H, Tu Y L, et al. Research progress on atmospheric pressure lower-power microwave plasma sources and their application prospects (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 125201 [陈兆权, 张煌, 涂一焱, 等. 大气压低功率微波等离子体源的研究进展及其应用展望. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48: 125201]
- 19 Hong L, Chen Z, Yang J, et al. Ionization process and distinctive characteristic of atmospheric pressure cold plasma jet driven resonantly by microwave pulses. *Plasma Sci Technol*, 2022, 24: 105401
- 20 Liu P, Li N, Chen T, et al. Numerical simulation of pulse modulated microwave discharge plasma (in Chinese). *J Nanchang Univ (Nat Sci)*, 2022, 46: 136–146 [刘鹏, 李娜, 陈童, 等. 脉冲调制微波放电等离子体的数值模拟. *南昌大学学报(理科版)*, 2022, 46: 136–146]
- 21 Luo Y, Liu M Y, Wang C X, et al. Nitrogen fixation by pulse modulated radio frequency air plasma (in Chinese). *Eng J Wuhan Univ*, 2023, 56: 1405–1412 [罗义, 刘明远, 王承喧, 等. 脉冲调制射频空气等离子体固氮研究. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56: 1405–1412]
- 22 Gao S H, Wang X C, Zhang Y T. Numerical study on discharge characteristics in ultra-high frequency band modulated by pulses with electrodes covered by barriers (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 115204 [高书涵, 王绪成, 张远涛. 脉冲调制条件下介质阻挡高频放电特性的数值模拟. *物理学报*, 2020, 69: 115204]
- 23 Chen Z Q, Wang W Y, Chen S L, et al. Study of spatiotemporal characteristics of atmospheric-pressure pulsed microwave Ar/N₂ plasma jets (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2024, 54: 235211 [陈兆权, 王伟业, 陈思乐, 等. 大气压脉冲微波Ar/N₂等离子体射流的时空特性研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2024, 54: 235211]
- 24 Wang L, Liu C, Wu J, et al. Discharge characteristics of an atmospheric pulsed microwave Ar/CF₄ plasma jet. *AIP Adv*, 2023, 13: 095023
- 25 Chen S, Ren X, Chen Z, et al. Development of an atmospheric fluorocarbon plasma jet generated by pulse modulated microwave discharge. *Plasma Sci Technol*, 2023, 25: 115401
- 26 Wu J F, Chen Z Q, Zhang M, et al. Measurement of time-varying electron density of air spark shock wave plasma jet by the method of microwave Rayleigh scattering. *Acta Phys Sin*, 2020, 69: 075202
- 27 Zhang M, Chen Z, Wu J, et al. Measurement of transient electron density of a pulsed microwave argon plasma jet via microwave Rayleigh scattering. *J Appl Phys*, 2020, 128: 123301
- 28 Wang L, Luo Z, Xia Z, et al. Energy efficiency and performance characteristics of plasma synthetic jet. *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 125207
- 29 Booth J P. Optical and electrical diagnostics of fluorocarbon plasma etching processes. *Plasma Sources Sci Technol*, 1999, 8: 249–257
- 30 Huang S, Xin Y, Ning Z Y. Studies on C₂ radical by optical emission spectroscopy in an inductively-coupled CF₄/CH₄ plasma (in Chinese). *Acta*

- Phys Sin*, 2005, 54: 1653–1658 [黄松, 辛煜, 宁兆元. 使用发射光谱对感应耦合CF₄/CH₄等离子体中C₂基团形成机理的研究. 物理学报, 2005, 54: 1653–1658]
- 31 Christophorou L G, Olthoff J K. Electron interactions with plasma processing gases: An update for CF₄, CHF₃, C₂F₆, and C₃F₈. *J Phys Chem Reference Data*, 1999, 28: 967–982
- 32 Ivanov V V, Kiopovskii K S, Lopaev D V, et al. Production of CF₂ radicals in a gas-discharge plasma through the electron-impact dissociation of CF₄ molecules. *Plasma Phys Rep*, 1999, 25: 657–665
- 33 Mason N J, Newell W R. Total cross sections for metastable excitation in the rare gases. *J Phys B-At Mol Phys*, 1987, 20: 1357–1377
- 34 Chen Z Q, Yang J, Chen S L, et al. Ionization behavior of hairpin argon plasma jets resonantly generated by microwave pulses at atmospheric pressure (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2022, 52: 295211 [陈兆权, 杨洁, 陈思乐, 等. 大气压脉冲调制微波波卡氩等离子体射流的电离行为研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 295211]
- 35 Chen Z, Zhang H, Wu J, et al. Polarity transition and ionization enhancement of atmospheric argon plasma jet plumes generated by repetitive microwave pulses. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2019, 47: 4787–4794
- 36 Wang J Y, Shi Y C. Characteristics of Ar/CF₄ nanosecond pulse discharge plasma under atmospheric pressure (in Chinese). *J Donghua Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 47: 125–130 [王军毅, 施芸城. 大气压下Ar/CF₄纳秒脉冲放电等离子体特性. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47: 125–130]

Study on the influence of pulse modulation parameters on the characteristics of microwave Ar/CF₄ plasma jets

CHEN Sile^{1*}, WANG Chunlong¹, WANG Chao¹, WANG Yuying¹,
CHEN Zhaoquan¹ & LI Ping²

¹ School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China

² School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

*Corresponding author (email: silechen@ahut.edu.cn)

Plasma surface fluorination is one of the effective methods to enhance the surface insulation strength of insulating materials, and pulse-modulated microwave discharge is an important approach to generate high-performance fluorocarbon plasmas. To better achieve parameter control and performance enhancement of fluorocarbon plasmas, in this paper, pulsed microwave discharge is utilized to generate an atmospheric pressure Ar/CF₄ plasma jet. The discharge morphology, reactive species, gas temperature, and electron density of the plasma jet are diagnosed, with a focus on investigating the influences of pulse modulation parameters (pulse modulation frequency and duty cycle) on the characteristics of the Ar/CF₄ plasma jet. The results show that increasing the pulse modulation frequency leads to a decrease in jet length, concentration of reactive species, and electron density, and has little effect on gas temperature. The influence of duty cycle is opposite to that of modulation frequency. Under the parameters in this paper, the gas temperature can be controlled within the range of 329.22–382.82 K, and the electron density can reach the order of 10¹⁹ m⁻³. The research results can provide references for the application of plasma surface fluorination.

pulse modulated microwave discharge, plasma jet, fluorocarbon plasma, plasma surface modification

PACS: 52.50.Sw, 52.40.Fd, 52.35.Mw, 52.25.Os

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0304](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0304)