

射频感性耦合Ar/O₂等离子体放电特性模拟研究

刘勇君, 李金睿, 梁英爽*

辽宁科技大学理学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年2月18日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月17日

摘要

感性耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)处理是半导体及相关领域的重要支撑技术, 本研究针对实际工艺中常用的感性耦合Ar/O₂放电建立二维流体模型, 研究不同气压(10~50 mTorr)和线圈功率(300~1200 W)下的放电特性。结果表明, 随着气压的升高, 各活性粒子的密度峰值从腔室中心逐渐向线圈方向移动, 其中电子与O原子密度都显著提升, 但O₂⁺密度先上升后下降。线圈功率增大推动电子密度与角向电场协同增长, 导致Ar⁺、O₂⁺密度持续上升, 而亚稳态O₂^s密度峰值呈现先不变后缓慢变化的趋势, 并且其密度峰值从腔室中心向腔室边缘移动。本研究揭示了气压与功率对等离子体粒子密度及空间分布的调控机制, 为工业大面积ICP应用的参数优化提供了理论依据。

关键词

感性耦合等离子体, 放电特性, 气压, 线圈功率

Study on Discharge Characteristics of Radio-Frequency Inductively Coupled Ar/O₂ Plasma

Yongjun Liu, Jinrui Li, Yingshuang Liang*

School of Science, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: February 18, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 17, 2026

Abstract

Inductively Coupled Plasma (ICP) processing is a key enabling technology in the semiconductor industry and related fields. In this study, a two-dimensional fluid model is developed for Ar/O₂ ICP

*通讯作者。

discharges under typical industrial process conditions to investigate the discharge characteristics at varying gas pressures (10–50 mTorr) and coil powers (300~1200 W). The results show that as the gas pressure increases, the peak densities of all active species gradually shift from the chamber center toward the coil region. Specifically, the densities of electrons and oxygen atoms increase significantly, whereas the O_2^+ density first rises and then declines. Increasing the coil power promotes the synergistic growth of electron density and azimuthal electric field, leading to a continuous increase in the densities of Ar^+ and O_2^+ . In contrast, the peak density of metastable O_2^a remains nearly unchanged at lower powers and then varies slowly at higher powers, while its peak position shifts from the chamber center toward the chamber edge. This study elucidates the regulatory mechanisms of gas pressure and coil power on the densities and spatial distributions of plasma species, providing a theoretical foundation for parameter optimization in large-area industrial ICP applications.

Keywords

Inductively Coupled Plasma, Discharge Characteristics, Pressure, Coil Power

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

感性耦合等离子体(ICP)放电由于能够在低气压下产生高密度等离子体等优势,已成为半导体刻蚀、薄膜沉积、材料表面改性等高端制造领域的核心支撑技术。ICP 放电的核心原理是:射频电源驱动感应线圈产生交变磁场,该磁场在放电腔室内产生感应电场,自由电子被电场加速使其与背景气体分子发生非弹性碰撞,引发电离雪崩效应;随着等离子体密度升高,其感应电流与外部磁场进一步耦合,最终形成高电子密度、低电子温度的稳定放电模式。不同放电气体产生的各种粒子的种类和密度不同,具有不同的应用价值。

研究人员对 ICP 放电进行了一系列研究。在放电特性方面,赵欣茜等人通过建模仿真研究了感性耦合 Ar/O_2 等离子体放电中不同 Ar 含量对带电粒子密度的影响,结果表明:当 Ar 含量为 95%时,电子密度峰值主要集中在反应腔室中心附近,而当 Ar 仅为 10%时,其密度峰值减半且移向线圈附近[1]。随后,他们又对比了腔室材质(不锈钢、阳极氧化铝和铜)下的等离子体放电特性,发现由于中性粒子在不同材料表面的黏附系数的差异,使得各活性粒子的密度大小和空间分布都有着不同程度的变化[2]。袁艳乐采用实验诊断方法探究了不同外界工作条件下,柱面线圈 ICP 放电中电子特性参数(如密度、温度、能量分布函数等)的变化规律[3]。佟磊等人建立了一个混合模型,模拟了感性耦合 $Ar/O_2/Cl_2$ 放电中,偏压幅值和频率对等离子体特性及离子能量角度分布的影响,结果表明:随着偏压频率的增加,离子能量分布中的高能峰和低能峰彼此靠近,离子能峰间距变窄,并最终变成单峰结构[4]。

在等离子体均匀性调控方面,Ventzek 等人在针对 ICP 刻蚀机的研究中发现,通过调整线圈的位置和线圈数量可以对离子通量的均匀性进行调控[5]。赵洋等人采用二维流体模型研究了线圈结构及腔室长宽比对 ICP 等离子体均匀性的影响,结果发现:优化线圈结构是提升等离子体均匀性的有效手段,可将电子密度的均匀度从 56%提升至 96%;并且,减小腔室的长宽比也有利于等离子体均匀性的改善[6]。王鹏宇等人也利用二维流体模型考查了外部参数对双圆柱形电感耦合等离子体特性,发现远程功率可以控制等离子体均匀性并提高等离子体密度[7]。孙晓艳等人对平面线圈 ICP 腔室中的四个线圈分布进行设计,

发现：当固定放电参数为 13.56 MHz、400 W、20 mTorr 时，采用垂直排列线圈情况得到的等离子体密度低于采用水平分布线圈和阶梯型分布线圈两种情况，均匀性也较差[8]。

Ar/O₂ 等离子体在半导体制造工业中广泛应用于刻蚀、清洗等重要工序。然而，由于 Ar/O₂ 等离子体的复杂性，现有研究仍不够充分，还需要对不同工作参数下的放电特性进行深入细致的研究。本研究主要针对感性耦合 Ar/O₂ 等离子体放电，考查多种重要活性粒子对放电气压和线圈功率的响应机制。

2. 仿真模型

2.1. 流体模型

本项研究对 Ar/O₂ ICP 的放电过程建立二维轴对称的流体模型。对于电子，求解漂移扩散近似的连续性方程和能量守恒方程来获得等离子体的特性参数(如密度、温度、通量等)：

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = S_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e + \mathbf{E}_s \cdot \Gamma_e = S_e + P_i \quad (2)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E}_s) n_e - \nabla (D_e n_e) \quad (3)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E}_s) n_e - \nabla (D_e n_e) \quad (4)$$

其中以 e 和 ε 为下标的 n 、 Γ 、 S 、 μ 和 D 分别代表电子的密度、通量、源相、迁移率和扩散系数。 \mathbf{E}_s 代表静电场， P_i 表示感应沉积功率，来自于角向电场 \mathbf{E}_i 和角向电流。

在 Ar/O₂ 的放电体系中，放电过程中会产生多种离子和中性粒子，如 Ar⁺、O⁻、O₂⁺ 等离子，Ar、O 和 O₂ 的多种激发态中性粒子。模型中将离子和中性粒子统一看成重物质，借助简化的麦克斯韦方程来进行求解：

$$\rho \frac{\partial \omega_i}{\partial t} = \nabla \cdot \Gamma_i + R_i, \quad (5)$$

其中 ρ 代表混合气体的质量密度， ω_i 和 R_i 分别代表粒子 i 的质量分数和源项， Γ_i 为粒子的扩散通量。本模型中各活性粒子涉及的气相化学反应及表面反应由表 1 和表 2 列出，相应的系数也在表中给出。其中

Table 1. Relevant chemical reactions of Ar and O₂ considered in the model

表 1. 模型中考虑的 Ar 和 O₂ 的相关气相化学反应

反应编号	化学反应	反应速率常数(m ⁻³ ·s ⁻¹)	参考文献
R1	e + Ar → e + Ar	来自截面	[9]
R2	e + Ar → e + Ar _m	5.0 × 10 ⁻¹⁵ exp(-12.64/T _e)	[1]
R3	e + Ar → e + Ar _r	1.9 × 10 ⁻¹⁵ exp(-12.6/T _e)	[1]
R4	e + Ar → e + Ar(4p)	2.1 × 10 ⁻¹⁴ exp(-13.13/T _e)	[1]
R5	e + Ar _m → 2e + Ar ⁺	1.0 × 10 ⁻¹³ exp(-4.2/T _e)	[1]
R6	e + Ar _r → 2e + Ar ⁺	1.0 × 10 ⁻¹³ exp(-4.2/T _e)	[1]
R7	e + Ar(4p) → 2e + Ar ⁺	1.8 × 10 ⁻¹³ T _e ^{0.61} exp(-2.61/T _e)	[1]
R8	e + Ar _m → e + Ar _r	3.7 × 10 ⁻¹³	[1]
R9	e + Ar _m → e + Ar(4p)	8.9 × 10 ⁻¹³ T _e ^{0.51} exp(-1.59/T _e)	[1]
R10	e + Ar _r → e + Ar(4p)	8.9 × 10 ⁻¹³ T _e ^{0.51} exp(-1.59/T _e)	[1]

续表

R11	$e + Ar_r \rightarrow e + Ar_m$	9.1×10^{-13}	[1]
R12	$e + Ar \rightarrow 2e + Ar^+$	$1.235 \times 10^{-13} \exp(-18.69/T_e)$	[1]
R13	$Ar_m + Ar_m \rightarrow e + Ar + Ar^+$	6.0×10^{-16}	[1]
R14	$Ar_m + Ar_r \rightarrow e + Ar + Ar^+$	2.1×10^{-15}	[1]
R15	$Ar_r \rightarrow Ar + h\nu$	1.0×10^5	[1]
R16	$Ar(4p) \rightarrow Ar_r + h\nu$	3.0×10^7	[1]
R17	$Ar(4p) \rightarrow Ar_m + h\nu$	3.0×10^7	[1]
R18	$e + O_2 \rightarrow e + O_2$	来自截面	[9]
R19	$e + O_2 \rightarrow e + 2O$	$7.1 \times 10^{-15} \exp(-8.6/T_e)$	[1]
R20	$e + O_2 \rightarrow O + O^-$	$8.8 \times 10^{-17} \exp(-4.4/T_e)$	[1]
R21	$e + O_2 \rightarrow 2e + O_2^+$	$2.34 \times 10^{-15} T_e^{1.03} \exp(-12.29/T_e)$	[1]
R22	$e + O_2 \rightarrow 2e + O + O^+$	$5.3 \times 10^{-16} T_e^{0.9} \exp(-20/T_e)$	[1]
R23	$e + O_2 \rightarrow e + O^- + O^+$	$7.1 \times 10^{-17} T_e^{0.5} \exp(-17/T_e)$	[1]
R24	$e + O \rightarrow 2e + O^+$	$9.0 \times 10^{-15} T_e^{0.7} \exp(-13.6/T_e)$	[1]
R25	$e + O^- \rightarrow 2e + O$	$2.0 \times 10^{-13} \exp(-5.5/T_e)$	[1]
R26	$e + O_2^+ \rightarrow 2O$	2.2×10^{-13}	[1]
R27	$e + O_2 \rightarrow e + O_2^a$	$1.7 \times 10^{-15} \exp(-3.1/T_e)$	[1]
R28	$e + O_2 \rightarrow e + O_2^b$	$3.24 \times 10^{-16} \exp(-2.2/T_e)$	[1]
R29	$e + O_2 \rightarrow e + O + O(^1D)$	$2.04 \times 10^{-14} \exp(-8.18/T_e)$	[1]
R30	$e + O \rightarrow e + O(^1D)$	$4.47 \times 10^{-15} \exp(-2.29/T_e)$	[1]
R31	$e + O(^1D) \rightarrow 2e + O^+$	$9.0 \times 10^{-15} T_e^{0.7} \exp(-11.6/T_e)$	[1]
R32	$e + O_2^+ \rightarrow O + O(^1D)$	$2.11 \times 10^{-13} \times (300.0/T)^{0.7}$	[1]
R33	$e + O_2 + O \rightarrow O_2 + O^-$	1.0×10^{-43}	[1]
R34	$O + O + O \rightarrow O_2 + O$	$6.2 \times 10^{-44} \exp(-750/T_e)$	[1]
R35	$O + O + O_2 \rightarrow 2O_2$	$2.45 \times 10^{-43} T_e^{-0.63}$	[1]
R36	$O_2 + O^+ \rightarrow O + O_2^+$	2.1×10^{-17}	[1]
R37	$O^- + O^+ \rightarrow 2O$	$4.0 \times 10^{-14} \times (300.0/T)^{0.43}$	[1]
R38	$O^- + O_2^+ \rightarrow O + O_2$	$2.6 \times 10^{-14} \times (300.0/T)^{0.44}$	[1]
R39	$O + O^- \rightarrow e + O_2$	5.0×10^{-16}	[1]
R40	$O^- + O_2^+ \rightarrow 3O$	$2.6 \times 10^{-14} \times (300.0/T)^{0.44}$	[1]
R41	$O_2 + O^- + O^+ \rightarrow 2O_2$	$2.1 \times 10^{-37} \times (300/T)^{2.5}$	[1]
R42	$O_2^b + O^- \rightarrow e + O + O_2$	6.9×10^{-16}	[1]
R43	$O_2 + O(^1D) \rightarrow O + O_2$	3.0×10^{-17}	[1]
R44	$O + O(^1D) \rightarrow 2O$	8.0×10^{-18}	[1]

续表

R45	$O(^1D) + O_2^+ \rightarrow O_2^a + O^+$	$1.0 \times 10^{-18} \times (300/T)^{0.5}$	[1]
R46	$e + O_2^b \rightarrow 2O + e$	$4.2 \times 10^{-15} \exp(-4.0/T_e)$	[1]
R47	$e + O_2^b \rightarrow O + O^-$	$2.28 \times 10^{-16} \exp(-1.64/T_e)$	[1]
R48	$e + O_2^b \rightarrow 2e + O_2^+$	$9.0 \times 10^{-16} T_e^2 \exp(-10.9/T_e)$	[1]
R49	$e + O_2^b \rightarrow e + O_2$	$5.6 \times 10^{-15} \exp(-1.55/T_e)$	[1]
R50	$e + O_2^b \rightarrow e + O + O(^1D)$	$2.04 \times 10^{-14} \exp(-6.77/T_e)$	[1]
R51	$e + O_2^b \rightarrow 2e + O + O^+$	$5.3 \times 10^{-16} T_e^{0.9} \exp(-18.4/T_e)$	[1]
R52	$e + O_2^a \rightarrow e + 2O$	$4.2 \times 10^{-15} \exp(-4.6/T_e)$	[1]
R53	$e + O_2^a \rightarrow 2e + O_2^+$	$9.0 \times 10^{-16} T_e^2 \exp(-11.6/T_e)$	[1]
R54	$e + O_2^a \rightarrow e + O_2$	$5.6 \times 10^{-15} \exp(-2.2/T_e)$	[1]
R55	$e + O_2^a \rightarrow O + O^-$	$2.28 \times 10^{-16} \exp(-2.29/T_e)$	[1]
R56	$e + O_2^a \rightarrow e + O + O(^1D)$	$2.04 \times 10^{-14} \exp(-7.4/T_e)$	[1]
R57	$e + O_2^a \rightarrow 2e + O + O^+$	$5.3 \times 10^{-16} T_e^{0.9} \exp(-19.0/T_e)$	[1]
R58	$e + O_2^a \rightarrow e + O_2^b$	$3.24 \times 10^{-16} \exp(-1.55/T_e)$	[1]
R59	$O(^1D) + Ar^+ \rightarrow Ar + O^+$	1.1×10^{-16}	[1]
R60	$O_2 + Ar^+ \rightarrow Ar + O_2^+$	1.1×10^{-16}	[1]
R61	$O + Ar^+ \rightarrow Ar + O^+$	1.1×10^{-16}	[1]
R62	$O^- + Ar^+ \rightarrow O + Ar$	$4.0 \times 10^{-14} \times (300/T)^{0.43}$	[1]
R63	$O_2^a + Ar^+ \rightarrow Ar + O_2^+$	1.1×10^{-16}	[1]
R64	$O_2^b + Ar^+ \rightarrow Ar + O_2^+$	1.1×10^{-16}	[1]

Table 2. Surface reactions considered in the model
表 2. 模型中考虑的表面反应

编号	表面反应	黏附系数	参考文献
S1	$Ar_r \rightarrow Ar$	1.0	[1]
S2	$Ar_m \rightarrow Ar$	1.0	[1]
S3	$Ar(4p) \rightarrow Ar$	1.0	[1]
S4	$O \rightarrow 1/2O_2$	0.163	[1]
S5	$O(^1D) \rightarrow 1/2O_2$	0.163	[1]
S6	$O_2^a \rightarrow O_2$	0.007	[1]
S7	$O_2^b \rightarrow O_2$	0.1	[1]

T_e 代表电子温度, 单位为 eV; T 代表背景气体温度, 模型中设定为 293 K; O_2^a 和 O_2^b 分别代表 $O_2(a^1\Delta_g)$ 和 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 。模型中通过给定各粒子在壁处的取值来确定上述方程的边值关系:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{\Gamma}_k = \begin{cases} \frac{1-\gamma_k}{1+\gamma_k} \left(\frac{1}{2} v_{k,th} n_k \right) & (k = \text{电子}) \\ M_k c_k Z_k \mu_k (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_s) & (k = \text{离子}) \\ \frac{\beta_k}{2(2-\beta_k)} \rho w_k v_{k,th} & (k = \text{中性粒子}) \end{cases}, \quad (6)$$

其中, γ_k 、 c_k 、 Z_k 、 β_k 和 $v_{k,th}$ 分别为粒子的反射系数、摩尔分数、电荷数、粘附系数和热速度。

ICP 放电产生的电场包括由磁线圈产生的感应电场 \mathbf{E}_i , 以及由自由电荷分离引起的静电场 \mathbf{E}_s 。感应电场通过引入具有简谐形式的磁矢式 \mathbf{A} 来求解麦克斯韦方程组中电场 \mathbf{E}_i 和磁场 \mathbf{B} 的旋度方程获得, 静电场通过其满足的泊松方程求解:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}_i = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \mu_r} \right) = \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_\alpha - \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}_i}{\partial t}, \\ \nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}_s) = \rho_v \end{cases} \quad (7)$$

其中 ε_0 、 ε_r 、 μ_0 和 μ_r 分别代表真空和介质的介电常数和磁导率, ρ_v 是空间电荷密度。关于电磁场的边界条件如下: 对于磁场和感应电场, 采用 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{0}$ 作为边界条件; 对于接地的金属侧壁和电极板表面, 设定电势为零; 在介质窗与等离子体的交界面, 通过计算表面电荷密度来确定静电场。

2.2. 腔室参数

本研究采用的圆柱形平面线圈 ICP 放电腔室结构如图 1 所示, 由于对称性, 图中所示为腔室的一半。整个腔室半径为 15 cm、高度为 11 cm, 放电区域高度为 7.5 cm, 放电区上方为石英介质窗, 在 $R = 8.5$ cm 和 11 cm 处放置两个线圈, 施加一个频率为 13.56 MHz 的射频功率源, 功率范围为 300~1200 W。一个半径为 12 cm, 厚度为 1 cm 的基片台放置在腔室底部中心。Ar/O₂ 比例为 1/9, 气压变化范围为 10~50 mTorr。后续的模拟过程均参照以下腔室参数。

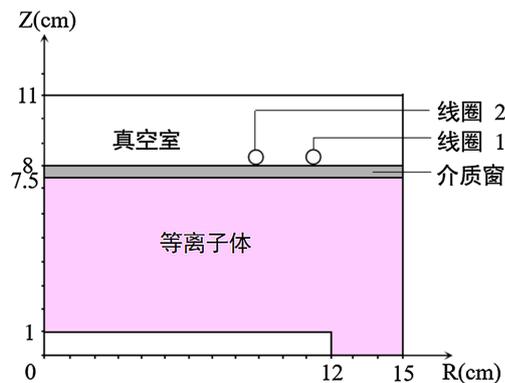


Figure 1. Schematic diagram of the ICP reactor
图 1. ICP 腔室结构示意图

3. 结果讨论

3.1. 气压影响

图 2 展示了气压在 10 mTorr、20 mTorr、40 mTorr 和 50 mTorr 时电子密度的空间分布。从图中观察

到, 电子密度随着气压的增长显著提高, 这与孙等人[8]研究中的变化趋势一致。具体来说, 当放电气压从 10 mTorr 升高到 50 mTorr, 电子密度峰值从 $7.18 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 升高到 $4.82 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 并且从腔室中心区域逐渐向线圈方向移动。为了解释电子密度随气压的变化, 图 3 给出气压为 10 mTorr 和 50 mTorr 时电子源项的空间分布, 图中的数据是通过对所有产生电子的反应源项进行求和得到的。在 10 mTorr 时, 电子在腔室中心沿径向区域广泛产生, 并且由于气压较低, 背景气体粒子稀少, 所以产生的电子较少, 并且最大值出现在腔室中心区域。当气压增加到 50 mTorr, 电子与大量的背景气体粒子在线圈下方发生碰撞电离, 产生更多的电子; 而且由于气压的增加, 电子的扩散被限制, 因此电子主要集中在其产生的区域。

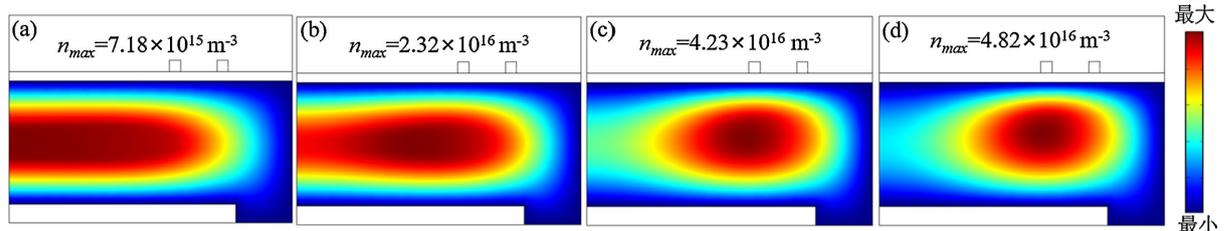


Figure 2. Spatial distributions of electron density at different pressures: (a) 10 mTorr, (b) 20 mTorr, (c) 40 mTorr, (d) 50 mTorr
图 2. 不同气压下电子密度空间分布: (a) 10 mTorr, (b) 20 mTorr, (c) 40 mTorr, (d) 50 mTorr

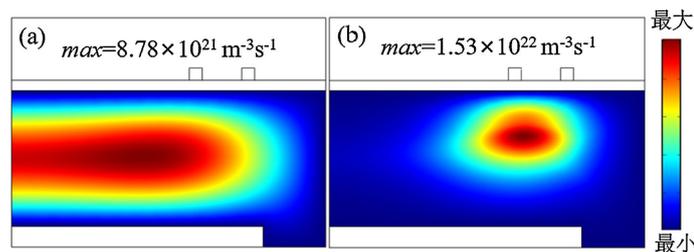


Figure 3. Spatial distributions of contribution rate to the electron generation at different pressure: (a) 10 mTorr, (b) 50 mTorr
图 3. 不同气压下电子生成反应贡献率空间分布: (a) 10 mTorr, (b) 50 mTorr

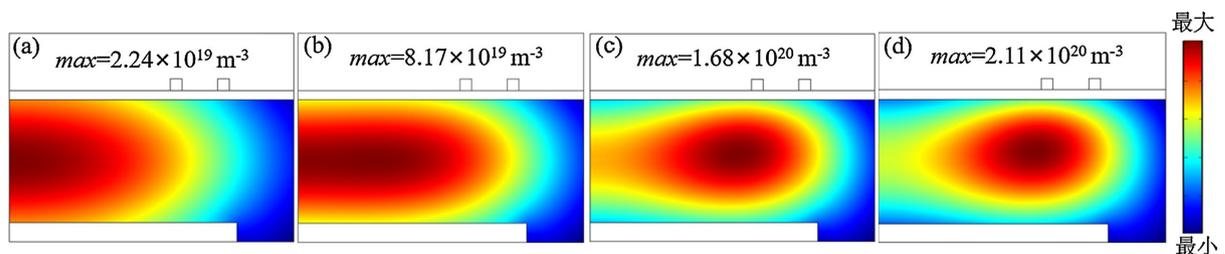


Figure 4. Spatial distributions of O density at different pressures: (a) 10 mTorr, (b) 20 mTorr, (c) 40 mTorr, (d) 50 mTorr
图 4. 不同气压下 O 原子数密度空间分布: (a) 10 mTorr, (b) 20 mTorr, (c) 40 mTorr, (d) 50 mTorr

图 4 给出不同气压下 O 原子密度的空间分布。随着气压从 10 mTorr 增加到 50 mTorr, 其数密度从 $2.24 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 增至 $2.11 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, 提高了约一个量级; 而且与电子类似, 在低气压时, O 原子密度最大值出现在腔室中心, 随着气压的增加, 大量的 O 原子聚集在线圈下方区域。当气压仅有 10 mTorr 时, 通过 O_2 分解反应产生的 O 原子很少; 当气压提高到 20 mTorr 时, 气压的增加促进了 O 原子的扩散, 使得其径向均匀性变好; 而当气压继续增加时, 大部分 O 原子也在线圈下方产生, 但是气压的进一步增加抑制了粒子的扩散, 使得它们都局域在其产生的地方, 径向均匀性变得很差。

图 5 给出了不同气压下的 O_2^+ 离子密度空间分布。从图 5 可知, 对于 O_2^+ 离子, 其数密度呈现先升高后降低的变化特征: 在 10 mTorr 时, 其密度只有 $6.49 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 当气压提升到 20 mTorr, 密度峰值达

到 $8.82 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$; 而当气压继续提高到 40 mTorr 后, 密度却呈现下降的趋势。在空间分布上, 随着气压的增加, O_2^+ 密度峰值也逐渐向两线圈方向移动, 并且分布区域变得更广泛。 O_2^+ 离子主要通过 O_2 的电离 (R21) 和电荷转移反应 (R60) 产生, 并通过复合分解 (如 R26 和 R32) 损失。 O_2^+ 离子密度随气压的变化源于上述反应的变化。在气压从 10 mTorr 升高到 20 mTorr 阶段, 电子密度的增加使 O_2^+ 的产生增加。而当气压继续增加时, O_2^+ 的损失机制逐渐占据主导, 导致了 O_2^+ 密度的下降趋势。

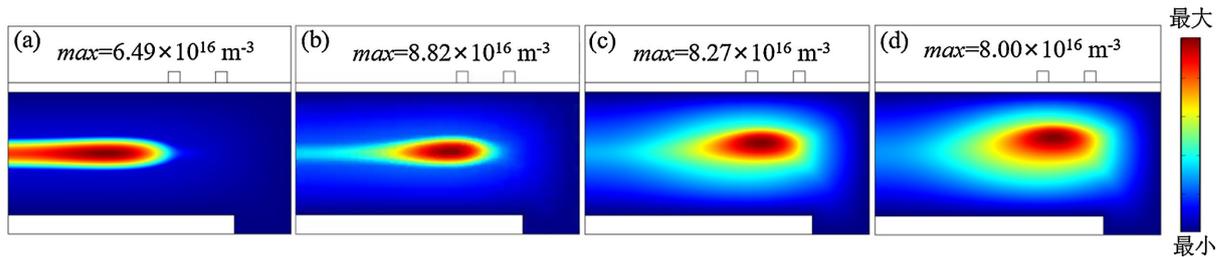


Figure 5. Spatial distributions of O_2^+ density at different pressures: (a) 10 mTorr, (b) 20 mTorr, (c) 40 mTorr, (d) 50 mTorr

图 5. 不同气压下 O_2^+ 密度空间分布: (a) 10 mTorr, (b) 20 mTorr, (c) 40 mTorr, (d) 50 mTorr

3.2. 线圈功率影响

图 6 和图 7 给出了功率分别 300 W、600 W、900 W 及 1200 W 下的电子密度与角向电场空间分布。从图中观察到, 随着射频功率从 300 W 逐渐提升至 1200 W 时, 电子密度的峰值从 $2.52 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 增至 $1.13 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 相应的角向电场强度的峰值也从 33.5 V/m 迅速提高到 83.2 V/m。二者的协同增长源于能量与电离过程的正向耦合机制: 由于电源功率的增加, 直接引起了射频电场的增强, 这就使得有电子能够获得更多的能量和更高的速率, 促进了其与背景气体等中性粒子的碰撞, 从而产生了更高密度的电子。同时注意到, 随着功率的增加, 角向电场的局域效应变得更强, 更多的电离反应发生在线圈下方区域, 因此图 6(d) 中的电子密度分布更加局域, 整体的均匀性变得更差。

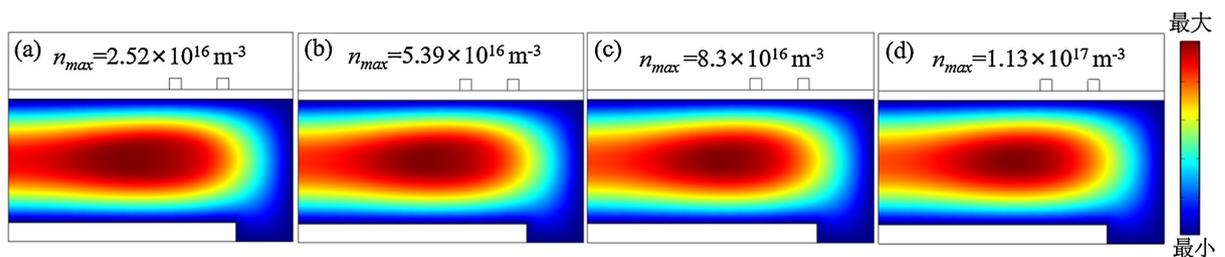


Figure 6. Spatial distributions of electron density at different powers: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

图 6. 不同功率下电子密度空间分布: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

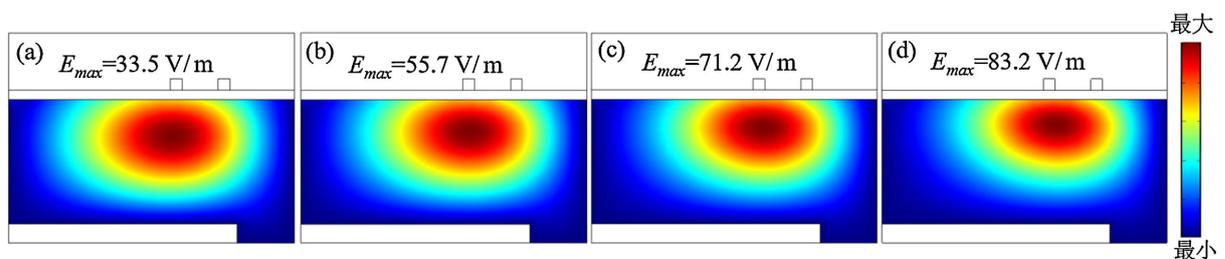


Figure 7. Spatial distributions of E_θ at different powers: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

图 7. 不同功率下角向电场空间分布: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

图 8 给出不同功率下 Ar^+ 离子密度的空间分布。从图中观察到, 随着射频功率的提高, Ar^+ 的密度空间分布呈现出明显的功率依赖特征。当功率为 300 W 时, Ar^+ 的密度峰值仅有 $1.32 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 当功率增加到 1200 W 时, 密度增长了 1.6 倍, 并且其高密度区在空间上的分布范围变得更小。 Ar^+ 离子的主要来源是电子与 Ar 原子的碰撞电离(R12)。在高功率下, 由于 R12 反应速率的提高, 使得产生了更多的 Ar^+ 离子; 并且由于电场的局域效应, 因此 Ar^+ 离子的分布也与电子类似, 高密度区域变得更局域。

图 9 所示为不同功率下激发态 O_2^a 分子的密度空间分布情况。从图中观察到, 随着射频线圈输入功率的提升, O_2^a 密度峰值呈现出先保持不变后下降的变化趋势, 并且逐渐从腔室中心向腔室侧壁移动。 O_2^a 分子主要通过 O_2 的激发反应(R27、R45)产生, 并通过其退激发反应(R52、R53、R54、R55、R56、R57、R58、R63)损耗。图 10 给出功率为 300 W 和 1200 W 时的 O_2^a 分子反应源项的空间分布, 数据由上述反应对产生 O_2^a 的贡献进行求和获得。从图 10(a)可以看出, 在 300 W 的低功率条件下, O_2^a 主要在线圈下方区域产生, 并且由于扩散, 使得 O_2^a 主要集中在腔室中心附近。当功率提升至 1200 W 时, 虽然大量的 O_2^a 仍然在线圈下方产生, 但是由于损耗反应的增强, 使得此处的 O_2^a 被大量损耗, 导致 O_2^a 的密度峰值出现在腔室边缘, 由于扩散效应, 小部分 O_2^a 向线圈方向扩散, 密度峰值也有一定程度的下降。

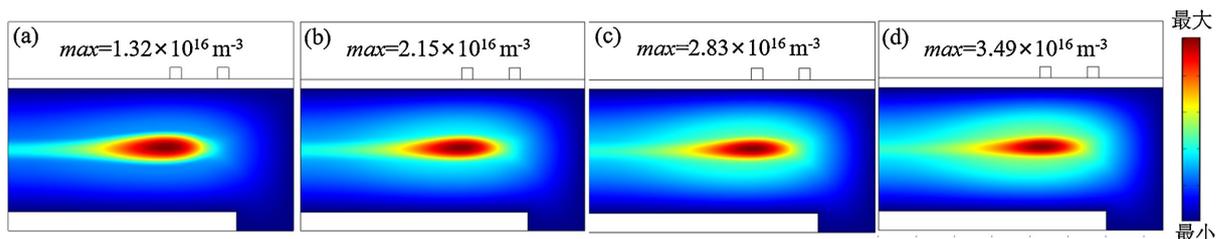


Figure 8. Spatial distributions of Ar^+ density at different powers: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

图 8. 不同功率下 Ar^+ 密度空间分布: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

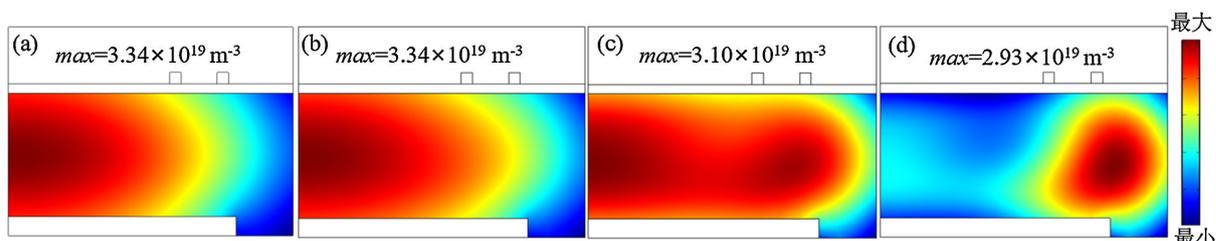


Figure 9. Spatial distributions of O_2^a density at different powers: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

图 9. 不同功率下 O_2^a 密度空间分布: (a) 300 W, (b) 600 W, (c) 900 W, (d) 1200 W

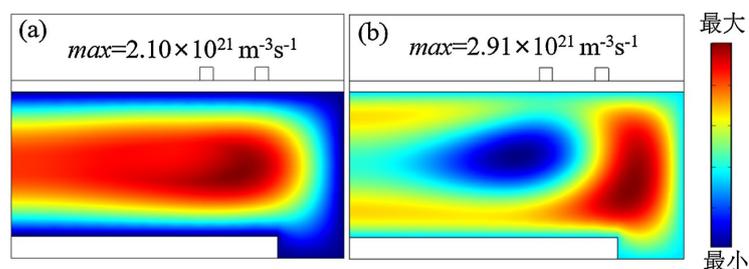


Figure 10. Spatial distributions of main reaction mechanisms of O_2^a at different powers: (a) 300 W, (b) 1200 W

图 10. 不同功率下 O_2^a 分子主要源项的空间分布: (a) 300 W, (b) 1200 W

4. 结论

本研究建立了针对 Ar/O₂ ICP 放电的二维流体模型, 系统探究了气压与线圈功率对其放电特性的调控规律。结果表明, 气压升高可显著提升电子与 O 原子密度, 而 O₂⁺ 密度呈先升后降的特征, 各粒子密度峰值从腔室中心逐渐向线圈方向移动。随着线圈功率的增加, 角向电场增强, 使得电子、Ar⁺、O₂⁺ 密度都持续上升, 但亚稳态 O₂^a 呈现先保持不变后显著下降的变化趋势。本研究揭示了气压与功率对等离子体粒子密度及空间分布的调控作用, 为工业大面积 ICP 应用中的参数优化提供一定的理论支撑。

基金项目

本研究系 2025 年、2026 年辽宁科技大学大学生创新训练计划立项资助成果(项目编号: X202510146425)。

参考文献

- [1] 赵欣茜. 感性耦合 Ar/O₂ 等离子体的放电特性研究[D]: [硕士学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [2] 张雨涵, 赵欣茜, 梁英爽, 郭媛媛. 感性耦合 Ar/O₂ 等离子体放电特性的数值模拟[J]. 物理学报, 2024, 73(13): 216-225.
- [3] 袁艳乐. 柱面线圈射频感性耦合等离子体放电特性的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [4] 佟磊, 赵明亮, 张钰如, 宋远红, 王友年. 带有射频偏压源的感性耦合 Ar/O₂/Cl₂ 等离子体放电的混合模拟研究[J]. 物理学报, 2024, 73(4): 215-229.
- [5] Zhao, Y., Zhou, X.H., Gao, S.R., Song, S.S. and Zhao, Y.Z. (2024) Effect of Coil and Chamber Structure on Plasma Radial Uniformity in Radio Frequency Inductively Coupled Plasma. *Plasma Science and Technology*, **27**, Article ID: 083507.
- [6] Ventzek, P.L.G., Grapperhaus, M. and Kushner, M.J. (1994) Investigation of Electron Source and Ion Flux Uniformity in High Plasma Density Inductively Coupled Etching Tools Using Two-Dimensional Modeling. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, **12**, 3118-3137. <https://doi.org/10.1116/1.587488>
- [7] Wang, P.Y., Xing, S.Y., Han, D.M., Zhang, Y.R., Li, Y., Zhou, C., Gao, F. and Wang, Y.N. (2024) Effects of External Parameters on Plasma Characteristics and Uniformity in a Dual Cylindrical Inductively Coupled Plasma. *Plasma Science and Technology*, **26**, Article ID: 125401. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ad73aa>
- [8] Sun, X., Zhang, Y., Ye, J., Wang, Y. and He, J. (2021) Modulation of the Plasma Uniformity by Coil and Dielectric Window Structures in an Inductively Coupled Plasma. *Plasma Science and Technology*, **23**, Article ID: 095404. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac0c6b>
- [9] <https://www.lxcat.net>