

工作参数对容性耦合O₂等离子体中活性物种空间分布的影响

李金睿, 刘勇君, 毛自钰, 王薛钢, 梁英爽*

辽宁科技大学理学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年2月20日; 录用日期: 2026年3月13日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

容性耦合氧等离子体(CCP)在光刻胶灰化与表面改性中具有重要应用, 其工艺性能高度依赖于活性粒子(如O原子、O₂⁺离子等)密度的空间分布特性。本文基于流体力学思想, 对容性耦合O₂等离子体放电系统建立二维流体模型, 模型的可靠性通过与粒子模拟的结果进行对比得到了验证。本文系统研究了驱动频率(13.56~60 MHz)、施加电压(50~125 V)和工作气压(0.25~1 Torr)对O₂⁺离子与O原子密度空间分布的影响机制。研究发现: 频率升高能够显著提升O原子和O₂⁺离子的密度。值得注意的是, 虽然通过O₂(a¹Δ_g)生成O原子的反应对O原子总产率的贡献相对较小, 但O原子密度的空间分布与O₂(a¹Δ_g)一致。电压增大也能有效提高活性粒子的浓度, 然而随着气压的增加, O原子和O₂⁺离子的密度的变化趋势是相反的。此外, 结果表明: O原子密度随着其在材料表面的黏附系数的增加而降低, 因此通过合理选择腔壁材料或表面涂层以调控该系数, 可以实现对O原子密度的调控。本研究揭示了关键放电参数对O₂等离子体中活性粒子分布的调控规律, 为优化实际工艺中的刻蚀速率、均匀性与材料兼容性提供了理论依据。

关键词

容性耦合等离子体, O₂等离子体, 数值模拟, 放电特性, 空间分布

Influence of Operating Conditions on Spatial Distributions of Reactive Species in Capacitively Coupled O₂ Plasma

Jinrui Li, Yongjun Liu, Ziyu Mao, Xuegang Wang, Yingshuang Liang*

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

*通讯作者。

文章引用: 李金睿, 刘勇君, 毛自钰, 王薛钢, 梁英爽. 工作参数对容性耦合 O₂ 等离子体中活性物种空间分布的影响[J]. 建模与仿真, 2026, 15(3): 83-93. DOI: 10.12677/mos.2026.153045

Abstract

Capacitively coupled oxygen plasma (CCP) is widely used in photoresist ashing and surface modification, and its process performance strongly depends on the spatial distribution characteristics of reactive species, such as O atoms and O_2^+ ions. A two-dimensional fluid model is developed in this paper for the capacitively coupled O_2 plasma discharge system. The validity of the model is first verified by comparing the results from a particle-in-cell/Monte Carlo collision model. This work systematically investigates the influences of driving frequency (13.56~60 MHz), applied voltage (50~125 V), and operating pressure (0.25~1 Torr) on the spatial distribution of O_2^+ ion and O atom density. It is found that increasing the frequency can significantly raise the density of O atoms and O_2^+ ions. Notably, although the contribution of the $O_2(a^1\Delta_g)$ reactions for O atom generation is relatively small, the spatial distribution of O atom density is consistent with that of $O_2(a^1\Delta_g)$. Increasing the applied voltage can also effectively enhance the concentration of reactive species. However, with the rise of pressure, the density of O atoms and O_2^+ ions exhibits opposite trends. In addition, the results show that O atom density decreases with the increase of the sticking coefficient on material surface. Thus, tuning this coefficient by reasonably selecting chamber materials or surface coatings can regulate O atom density. This study reveals the effects of key discharge parameters on the distributions of reactive species in capacitively coupled O_2 plasma, providing a theoretical basis for optimizing the etching rate, uniformity, and material compatibility in practical processes.

Keywords

Capacitively Coupled Plasma, O_2 Plasma, Numerical Simulation, Discharge Characteristics, Spatial Distribution

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

经 O_2 等离子体处理的聚合物表面可能因老化而呈现疏水性[1]。光刻胶的残留厚度与 O_2^+ 离子径向通量呈负相关[2]，将 O_2 作为反应气体引入等离子体放电可有效提升光刻胶去除速率[3]。容性耦合 O_2 等离子体已被广泛应用于聚合物表面改性与光刻胶灰化等工艺中[3] [4]。

研究人员对容性耦合 O_2 等离子体已经开展了大量研究。Gudmundsson 等人采用一维粒子模拟/蒙特卡罗(PIC-MCC)程序对容性耦合 O_2 放电进行了建模，优化了 O_2 等离子体中关键碰撞过程的截面数据，并强调了 O 原子和 O^+ 离子的重要地位[5]。他们也证明，由亚稳态 $O_2(a^1\Delta_g)$ 引发的 O^- 解离会显著影响 O^- 密度分布及电子加热机制[6]。随后，他们再进一步改进了该模型，修正了因亚稳态产率被高估而导致的中性粒子密度异常问题，并指出引入亚稳态 $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 会减弱空间局域的欧姆加热效应并降低有效电子温度[7]。此外，Vass 等人发现，即使在低气压下，欧姆功率吸收仍占主导地位，这归因于低气压下电子密度比高压时低两个数量级，使得等离子体电阻率显著升高[8]。Proto 等人后续观察到，在 0.1 Torr 条件

下, 放电呈现弱电负性, 鞘层膨胀主导功率吸收; 而在 0.01 Torr 时, 则表现为强电负性, 功率吸收主要通过漂移-双极模式在电负性核心区域发生[9]。

系统研究外界工作参数对 O_2 等离子体中多种活性粒子空间分布的影响, 对工业等离子体工艺优化具有重要参考价值。然而, 上述研究多基于一维模型, 主要关注宏观放电特性, 对 O_2^+ 和 O 原子等重要活性粒子的二维空间分布关注较少。本研究基于流体力学基本思想, 针对容性耦合 O_2 放电建立二维模型, 系统研究放电频率、电压和气压等对 O_2^+ 和 O 原子空间分布的影响。

2. 仿真模型

在 O_2 CCP 中, 模型考虑了电子(e), 3 种离子(O_2^+ 、 O^+ 、 O^-)和 8 种中性粒子(O_2 , O 和两种粒子的激发态(O_2 , $O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 和 $O_2(A^3\Sigma_u^+, A^3\Delta_u, c^1\Sigma_u^-)$ 和 $O(^1D)$)。其中使用缩写 O_2^a , O_2^b 和 O_2^c 表示 $O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ 和 $O_2(A^3\Sigma_u^+, A^3\Delta_u, c^1\Sigma_u^-)$ 。所有的粒子被分类为电子和重物质(非电子)。模型假设电子能量分布符合麦克斯韦分布, 重物质温度设为 373 K。

2.1. 流体方程

时空变化的电子密度使用基于漂移扩散近似的连续性方程进行求解:

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

$$\Gamma_e = -(\mu_e \cdot \mathbf{E})n_e - \nabla(D_e n_e) \quad (2)$$

其中 n_e 、 Γ_e 和 R_e 分别表示电子密度、通量和源项。其中 R_e 包含了电子的产生与损失速率。电子迁移率 μ_e 和扩散系数 D_e 通过爱因斯坦关系计算 $D_e = \mu_e T_e$, 其中 T_e 是电子温度, 单位是 eV。电子能量通过求解电子能量守恒方程求解:

$$\frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_\varepsilon + \mathbf{E} \cdot \Gamma_\varepsilon = R_\varepsilon \quad (3)$$

$$\Gamma_\varepsilon = -(\mu_\varepsilon \cdot \mathbf{E})n_\varepsilon - \nabla(D_\varepsilon n_\varepsilon) \quad (4)$$

其中 n_ε 、 Γ_ε 和 R_ε 表示电子能量的密度、通量和源项。 R_ε 包含电子碰撞反应的能量损失。同样, 电子能量迁移率 μ_ε 与扩散系数 D_ε 也应用爱因斯坦关系描述 $D_\varepsilon = \mu_\varepsilon T_e$ 。静电场 \mathbf{E} 通过泊松方程描述:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (5)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_e}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

其中 V 、 ε_0 和 ρ_e 代表电势、真空介电常数和净电荷密度。

时空变化的重物质的质量密度通过重物质守恒方程进行求解:

$$\rho \frac{\partial w_k}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k \quad (7)$$

$$\mathbf{j}_k = \rho w_k \left(D_k \frac{\nabla w_k}{w_k} + D_k \frac{\nabla M_n}{M_n} - Z_k \mu_k \mathbf{E} \right) \quad (8)$$

其中 ρ 代表所有重物质的总质量密度, w_k 、 R_k 和 \mathbf{j}_k 分别代表重物质 k 的质量分数、源项和扩散通量。 \mathbf{j}_k 通过方程(8)计算, 其中 Z_k 、 D_k 和 μ_k 分别表示粒子 k 的电荷数、扩散系数和迁移率。 M_n 代表平均摩尔质量。为了确保唯一解, 总重物质的质量分数和为 1。

电子密度与能量的边界条件定义为：

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Gamma}_e = \frac{1-\gamma_e}{1+\gamma_e} \left(\frac{1}{2} v_{e,th} n_e \right) - \sum_i \gamma_i (\boldsymbol{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n}) \\ \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Gamma}_\varepsilon = \frac{1-\gamma_\varepsilon}{1+\gamma_\varepsilon} \left(\frac{5}{6} v_{e,th} n_\varepsilon \right) - \sum_i \gamma_i \bar{\varepsilon}_i (\boldsymbol{\Gamma}_i \cdot \mathbf{n}) \end{cases} \quad (9)$$

其中 $v_{e,th}$ 为电子热速度， γ_e 代表电子反射系数，设置为 0.2。 γ_i 和 $\bar{\varepsilon}_i$ 分别是二次电子发射系数和二次电子平均能量，分别设置为 0.05 和 4 eV。

重物扩散通量的边界条件定义为：

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_k = M_k c_k \sum_{j=1}^{\pm} \left[\frac{s_{kj} \beta_k v_{k,th}}{2(2-\beta_k)} + Z_k \mu_k (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \right] \quad (10)$$

$v_{k,th}$ 、 c_k 和 β_k 分别代表粒子 k 的热速度、摩尔浓度和黏附系数。

在电源电极，施加振幅为 V_a 的余弦电压 V_s 波形作为电势的边界条件：

$$V_s = V_a \cos(2\pi ft) + V_{dc} \quad (11)$$

其中， f 是电源频率， V_{dc} 是直流自偏压，通过保证一个射频周期内的净电流为 0，其值由系统自洽计算。

2.2. 腔室模型

本研究采用仿真软件对容性耦合 O_2 等离子体放电过程建立二维流体模型。如图 1 所示，模型腔室材质为不锈钢，半径为 14 cm，上下电极的半径均为 10.5 cm，厚度为 1 cm，两电极间距离为 3 cm。上电极连接一个射频电压源，下电极和侧壁接地。为了避免电源电极与接地侧壁之间的放电，使用 0.2 mm 厚的电介质环包裹电源电极，相对介电常数设定为 8.5。计算中，放电区域采用结构化网格进行剖分，并在鞘层处设置了加密的网格层。

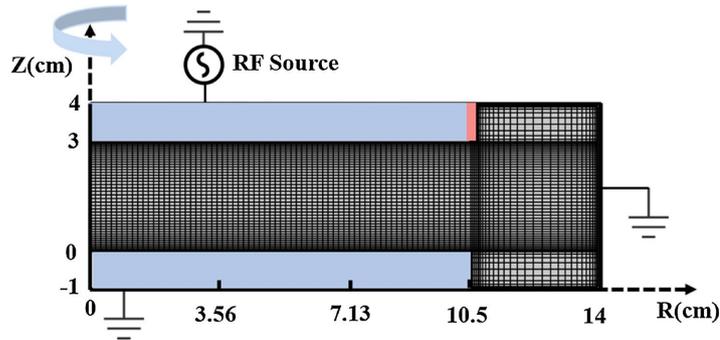


Figure 1. Chamber geometry and mesh configuration
图 1. 腔室几何结构与网格配置

3. 结果与讨论

为验证本模型的可靠性，将本模型的计算结果与文献[5]中基于 PIC-MCC 方法的模拟数据进行对比，如图 2 所示为 13.56 MHz、0.05 Torr、222 V 条件下获得的电子密度和 O_2^+ 密度轴向分布的对比。从图中观察到，本模型计算得到的结果与文献中的数据具有很好的一致性： O_2^+ 密度约高于电子密度两个量级， O_2^+ 密度峰值出现在腔室中心处，而电子密度在上下电极附近的鞘层边界处有一个小的峰值。尽管流体模型未能完全捕捉电子密度在鞘层中的快速下降，但整体分布趋势和数量级均合理。对比结果表明本研究

的模型能够对容性耦合 O_2 放电中的物理过程进行有效模拟，具备良好的预测能力。

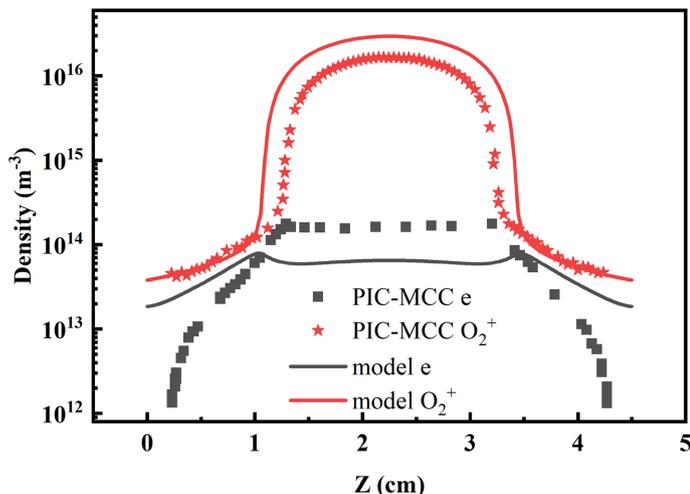


Figure 2. Axial distributions of electron density and O_2^+ density from our model (solid lines) and the PIC-MCC model in Ref. [5] (symbol lines) under the discharge condition: 13.56 MHz, 222 V, 0.05 Torr, and electrode gap of 4.5 cm

图 2. 本模型计算(实线)和文献[5]中 PIC-MCC 模型计算(符号线)电子密度和 O_2^+ 密度轴向分布: 本文模型结果(实线)与文献[5]中 PIC-MCC 模拟数据(符号线)的对比放电参数: 13.56 MHz、222 V、0.05 Torr、极板间距 4.5 cm

3.1. 频率的影响

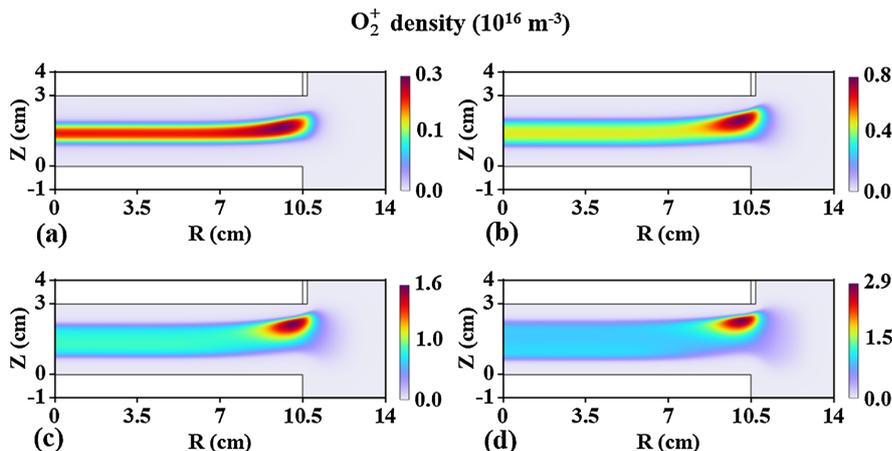


Figure 3. Spatial distributions of O_2^+ density at different frequencies: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

图 3. 不同频率下 O_2^+ 密度空间分布: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

在容性耦合等离子体(CCP)放电中，驱动频率是调控等离子体特性的关键参数之一。在 O_2 等离子体中，频率变化会显著影响 O 原子的生成效率与空间均匀性。因此，系统研究频率对放电特性的影响，对优化等离子体工艺参数具有重要意义。本节固定气压为 0.375 Torr、电压为 100 V 条件下，考察不同频率下 O_2^+ 离子、O 原子以及 O_2^+ 分子的空间分布演化规律。

图 3 展示了随电源频率变化的 O_2^+ 密度空间分布。从图中可见，各频率下 O_2^+ 密度在上电极边缘下方均出现一个峰值。图 4 给出了不同频率下上电极边缘附近电场的空间分布，图中箭头方向代表电场的方向，长度和颜色代表电场强度。从图 4 中可以观察到，电场强度的最大值都出现在电极的边缘处，当频

率增加时这个位置的电场增强,从而加速电子运动、提升电子能量。当电子能量达到 O_2 电离的阈值时,电离速率增加,导致 O_2^+ 密度在此处达到峰值。此外,注意到体区 O_2^+ 密度随频率升高而提升近一个数量级:从 13.56 MHz 的 $0.25 \times 10^{16} m^{-3}$ 到 60 MHz 的 $0.95 \times 10^{16} m^{-3}$ 。在单频放电中,等离子体密度通常与频率的平方近似成正比[10],这是因为频率越高,射频电场变化越快,电子在两次碰撞间经历更多次电场加速,相比于低频,其有效运动路径增长,从而获得更高电离概率,最终提升 O_2^+ 密度。

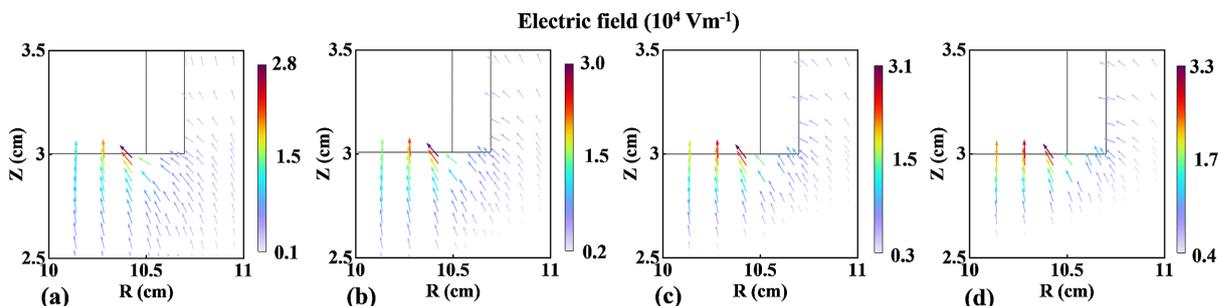


Figure 4. Spatial distributions of electric field around upper electrode edge at different frequencies: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

图 4. 不同频率下上电极边缘区域电场空间分布: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

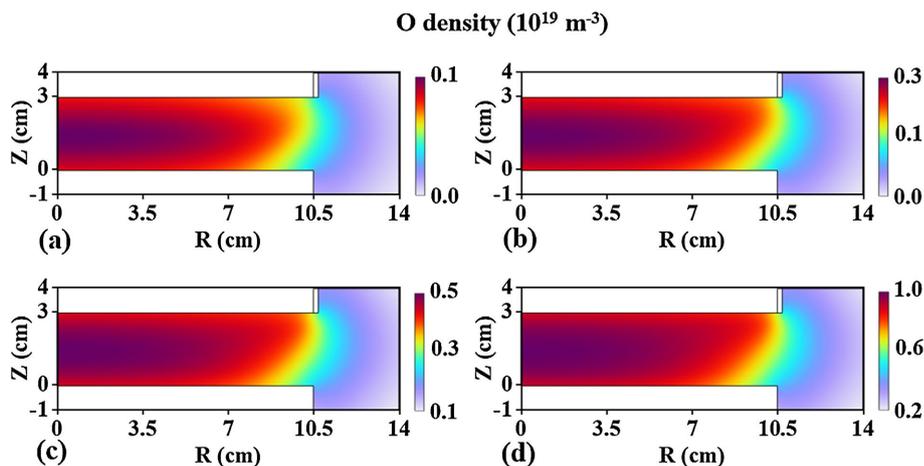


Figure 5. Spatial distributions of O density at different frequencies: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

图 5. 不同频率下 O 密度空间分布: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

图 5 展示了随电源频率变化的 O 原子密度空间分布。从图中可以看到, O 密度的最大值随着频率的增加而显著上升,从 13.56 MHz 时的 $0.1 \times 10^{19} m^{-3}$ 增至 60 MHz 时的 $1.0 \times 10^{19} m^{-3}$ 。这是因为频率的增加导致电子温度上升(如图 6 所示),使得更多高能电子能够有效地与 O_2 碰撞使其解离成 O 原子。还注意到, O 原子密度分布呈现出中心区域密度较高,而向外围逐渐减少的趋势。这种分布特征主要是由于 O 原子在表面上发生反应而导致的损失,形成了浓度梯度。在中心区域,由于浓度梯度较小, O 原子的扩散速度相对较慢,因此在此区域内形成了密度高峰。

图 7 展示了随电源频率变化的 O_2^+ 密度空间分布。从图中可以观察到 O_2^+ 密度也是随着频率的升高而升高,而且 O_2^+ 有着与 O 相似的分布特征。这是由于 O_2^+ 与 O 原子的产生密切相关,除 O_2 的电子碰撞解离外,电子也会与 O_2^+ 碰撞,通过多种反应产生 O 原子。图 8 给出了不同频率下,多个由 $O_2^+ \rightarrow O$ 反应对 O 原子贡献率的变化,图中的数值是通过空间积分获得的。可以观察到,在低频率时,通过 O_2^+ 生成 O 的占比比较低,随着频率的升高,通过 O_2^+ 的电子碰撞解离生成的 O 原子的占比显著提高,但最大贡献率不超过 3%。

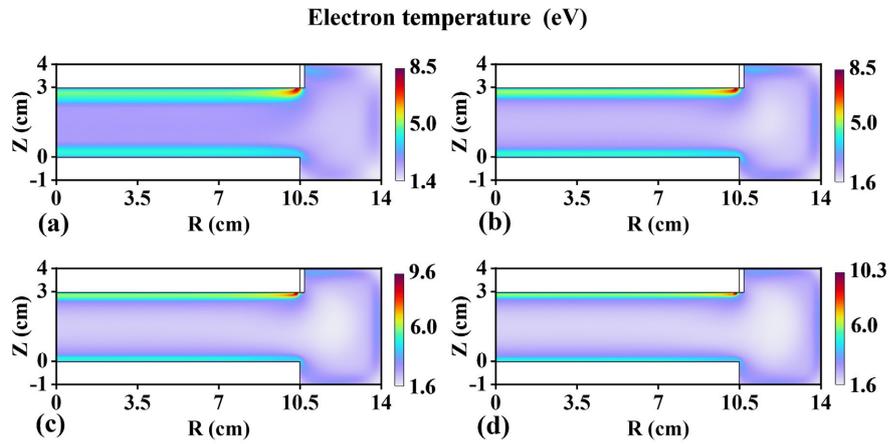


Figure 6. Spatial distributions of electron temperature at different frequencies: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

图 6. 不同频率下电子温度空间分布: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

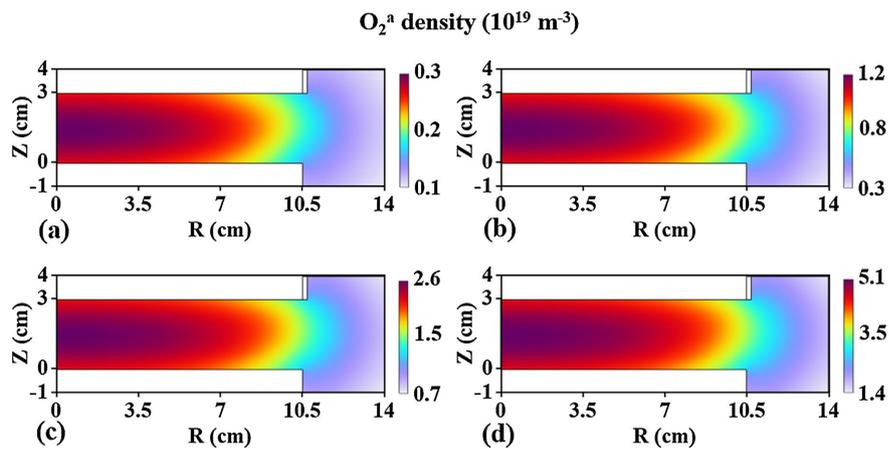


Figure 7. Spatial distributions of O₂^a density at different frequencies: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

图 7. 不同频率下 O₂^a 密度空间分布: (a) 13.56 MHz, (b) 27.12 MHz, (c) 40.68 MHz, (d) 60 MHz

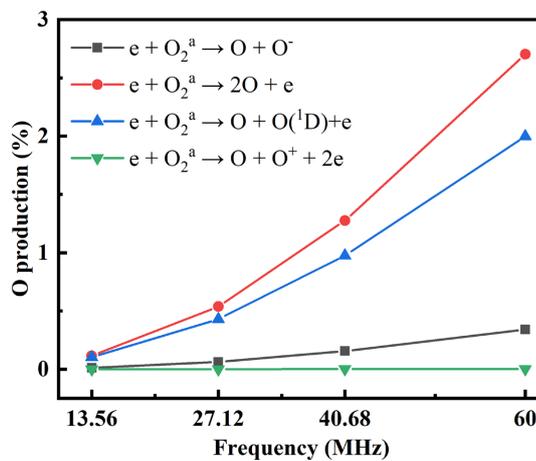


Figure 8. Contribution rates of reactions ($e + O_2^a \rightarrow O$) to the O atom production as a function of frequency

图 8. $e + O_2^a \rightarrow O$ 反应对 O 原子生成的贡献率随频率变化

3.2. 电压的影响

本节在气压为 0.375 Torr，频率为 60 MHz，极板间距为 3 cm 的条件下，考察电压对 O_2^+ 离子与 O 原子的空间分布演化规律。图 9 展示了 O_2^+ 密度随施加电压变化的空间分布。可以看出，当电压从 50 V 提升至 125 V 时，受边缘效应影响， O_2^+ 密度峰值始终位于射频电极边缘下方；且随着电压升高，该边缘效应愈发显著，导致 O_2^+ 径向分布的均匀性明显下降。类似现象在容性 N_2 放电中亦有报道[11]。此外，整体 O_2^+ 密度随电压升高而增加，这归因于更高的电压使电子获得更大能量，从而提升了 O_2 的电离率。

图 10 展示了不同电压下 O 原子密度的空间分布。可以观察到：随着电压增大，O 密度的峰值不仅显著提高，其高密度区域的空间范围也同步扩展。这一趋势源于等离子体吸收功率的显著增强：在固定频率与气压条件下，吸收功率近似与电压的平方成正比，从而提高了电子碰撞解离 O_2 的效率，最终导致 O 原子密度上升。该结果文献[12]中关于输入功率对 O_2 等离子体中活性物种产率影响的研究一致。

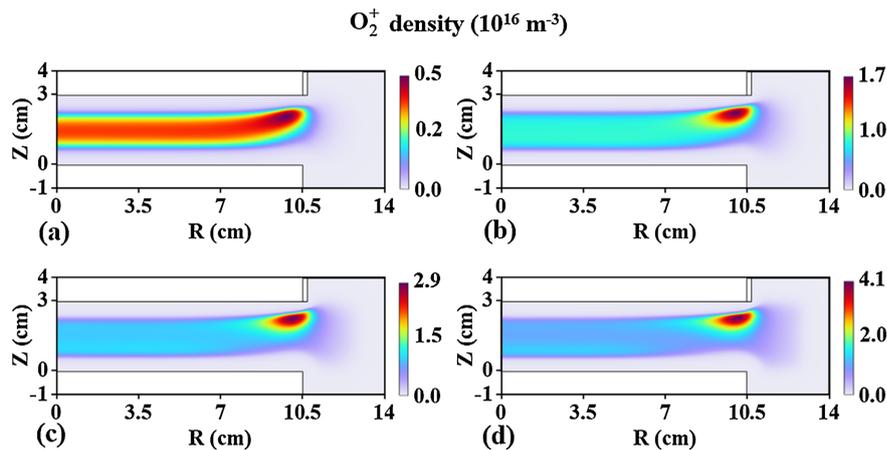


Figure 9. Spatial distributions of O_2^+ density at different voltages: (a) 50 V, (b) 75 V, (c) 100 V, (d) 125 V

图 9. 不同电压下 O_2^+ 密度空间分布: (a) 50 V, (b) 75 V, (c) 100 V, (d) 125 V

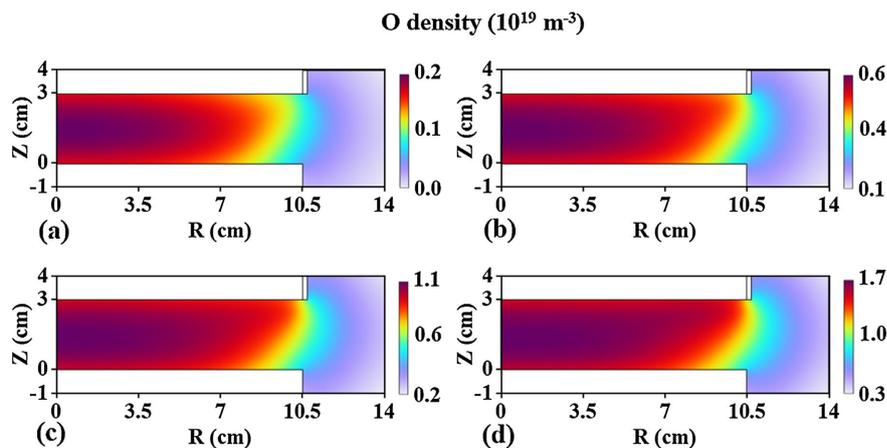


Figure 10. Spatial distributions of O density at different voltages: (a) 50 V, (b) 75 V, (c) 100 V, (d) 125 V

图 10. 不同电压下 O 密度空间分布: (a) 50 V, (b) 75 V, (c) 100 V, (d) 125 V

3.3. 气压的影响

本节固定频率为 60 MHz、施加电压为 100 V 条件下，考察不同气压下 O_2^+ 离子与 O 原子的空间分布

演化规律。图 11 展示了 O_2^+ 密度随气压变化的空间分布。当气压从 0.25 Torr 升高至 1 Torr 时, O_2^+ 的峰值密度逐渐减小, 而且在上极板边缘处的分布更局域, 但腔室中心处轴向分布从中心高密度逐渐转变为双峰的马鞍形分布。在电源频率和电压保持不变的情况下, 气压升高意味着腔室中的粒子数升高, 使得粒子的平均能量降低, 而电离反应需要较高的能量, 因此产生 O_2^+ 的电离反应速率下降, 粒子密度下降; 同时, 气压的升高抑制了粒子的扩散, 都局域在其产生的位置附近。

图 12 展示了 O 密度的空间分布随气压的改变, 从图中可以观察到, 当气压从 0.25 Torr 提升到 1 Torr 时, O 密度的峰值密度随之增加, 这一趋势在文献[12]中亦有报道。然而, 也注意到 O 原子密度随气压的增长速度却逐渐缓慢。这一现象源于电子温度随气压升高而降低, 造成大于等于解离反应阈值能量(约 6 eV)的高能电子数量减少, 导致解离效率的进一步提升受到抑制。

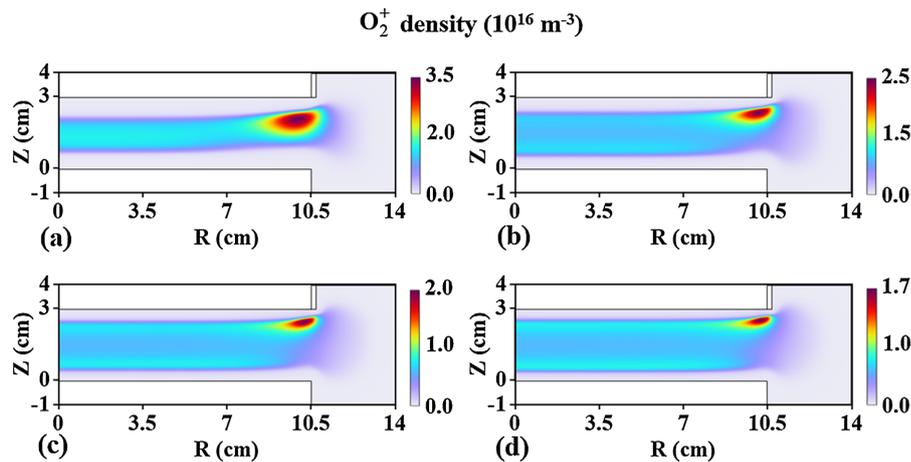


Figure 11. Spatial distributions of O_2^+ density at different pressures: (a) 0.25 Torr, (b) 0.5 Torr, (c) 0.75 Torr, (d) 1 Torr

图 11. 不同气压下 O_2^+ 密度空间分布: (a) 0.25 Torr, (b) 0.5 Torr, (c) 0.75 Torr, (d) 1 Torr

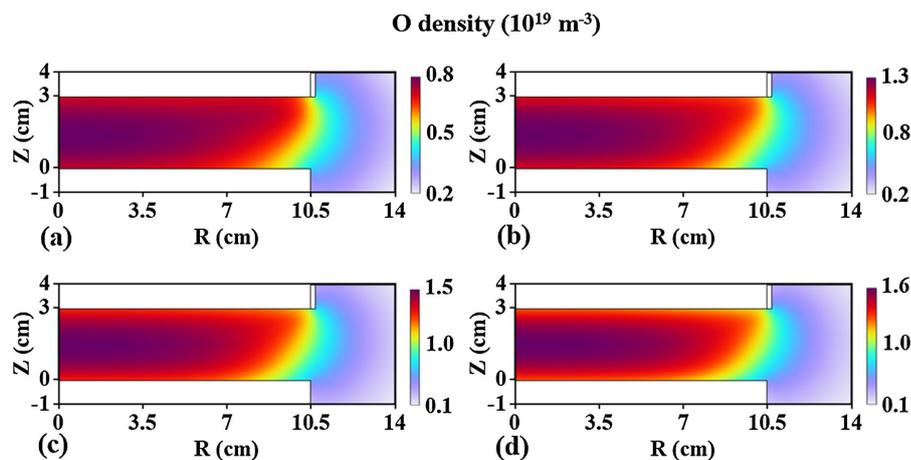


Figure 12. Spatial distributions of O density at different pressures: (a) 0.25 Torr, (b) 0.5 Torr, (c) 0.75 Torr, (d) 1 Torr

图 12. 不同气压下的 O 密度空间分布: (a) 0.25 Torr, (b) 0.5 Torr, (c) 0.75 Torr, (d) 1 Torr

3.4. O 表面复合系数的影响

研究发现, 由于活性粒子在不同材料表面的黏附系数不同, 腔室材质也会对放电产生影响。本节讨论 O 原子在器壁表面的黏附系数对 O 原子密度的影响, 放电参数为: 60 MHz、100 V、0.375 Torr。图 13

给出不同 O 原子表面黏附系数下, 在腔室中心处观察 O 原子密度沿径向分布。从图中观察到, 当黏附系数从 0.001 增长至 0.005 时, O 原子密度迅速下降。这是因为更高的黏附系数代表了 O 原子在壁表面的损失加剧, 因此密度显著下降。然而从图中还可以观察到, 随着黏附系数进一步增大, O 密度的下降趋势变得缓慢, 这种现象在感性耦合 Ar/O₂ 等离子体中也被观察到[13]。这一结果表明, 在等离子体工艺设计中, 调控反应腔壁材料或涂层以调节黏附系数也是调控 O 原子密度的一种手段。

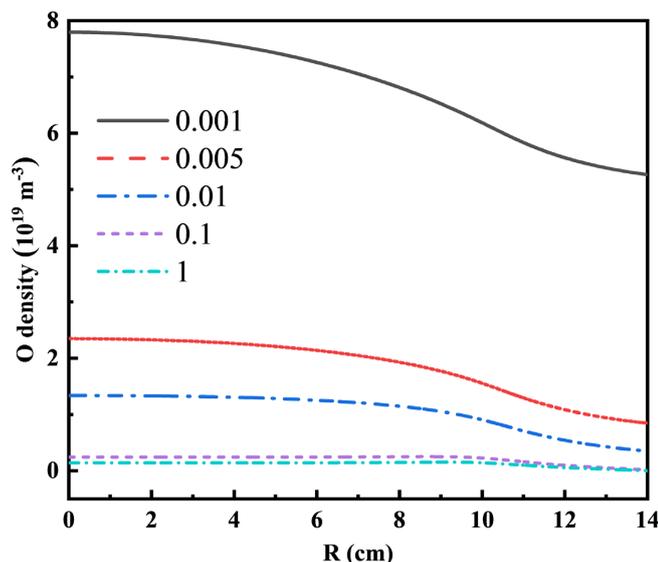


Figure 13. Radial distributions of O atom density along mid-gap at different sticking coefficients
图 13. 不同 O 原子表面黏附系数下腔室中心处 O 原子密度的径向分布

4. 结论

本研究通过二维流体模型系统揭示了频率、电压和气压对容性耦合 O₂ 等离子体中 O 原子与 O₂⁺ 离子空间分布的调控机制: 提升频率可同步增强各活性粒子的密度, O 原子可以通过电子与 O₂^a 的多个碰撞反应产生, 因此 O 原子的空间分布特性与 O₂^a 密切相关; 增大电压虽提高了 O₂⁺ 离子产率, 但导致均匀性下降; 然而随着气压的升高, O₂⁺ 密度与 O 原子呈现相反的变化趋势。此外, O 原子的密度也受到其在表面的黏附系数的影响, 通过合理选择腔壁材料或表面涂层可以调控该系数, 可在不改变放电参数的前提下对 O 原子密度进行调控。本研究揭示了各关键放电参数对 O₂ 等离子体中活性物种分布的影响规律, 为后续多参数协同优化高性能光刻胶灰化等工艺提供了基础参考。

基金项目

本研究系辽宁省教育厅基本科研项目(项目编号: LJ222510146002), 和 2026 年辽宁科技大学大学生创新训练计划资助成果。

参考文献

- [1] Li, Y.P., Li, S.Y., Shi, W. and Lei, M.K. (2012) Hydrophobic Over-Recovery during Aging of Polyethylene Modified by Oxygen Capacitively Coupled Radio Frequency Plasma: A New Approach for Stable Superhydrophobic Surface with High Water Adhesion. *Surface and Coatings Technology*, **206**, 4952-4958. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.120>
- [2] Park, J., Hong, Y.H., Kang, G.H., Lee, B.J. and Choi, D.W. (2025) Control of the Photoresist Etch Uniformity in Inductive Discharge with Magnetic Resonance Wireless Power Transfer. *Plasma Sources Science and Technology*, **34**, Article

025018. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/adb788>
- [3] Zhang, A., Lee, M.Y., Lee, H.W., Kim, J.H. and Park, S.J. (2021) Effects of RF Bias Frequency and Power on the Plasma Parameters and Ash Rate in a Remote Plasma Source. *Plasma Sources Science and Technology*, **30**, Article 025009. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abdae2>
- [4] Li, Y.P., Zhang, Z.C., Shi, W. and Lei, M.K. (2014) Adhesion Enhancement of Polyethylene Modified by Capacitively Coupled Radio Frequency Plasma Polymerization of Ethanol. *Surface and Coatings Technology*, **259**, 77-82. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.003>
- [5] Gudmundsson, J.T., Kawamura, E. and Lieberman, M.A. (2013) A Benchmark Study of a Capacitively Coupled Oxygen Discharge of the Oopd1 Particle-In-Cell Monte Carlo Code. *Plasma Sources Science and Technology*, **22**, Article 035011. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/22/3/035011>
- [6] Gudmundsson, J.T. and Lieberman, M.A. (2015) On the Role of Metastables in Capacitively Coupled Oxygen Discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, **24**, Article 035016. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/3/035016>
- [7] Hannesdottir, H. and Gudmundsson, J.T. (2016) The Role of the Metastable $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ and Energy-Dependent Secondary Electron Emission Yields in Capacitively Coupled Oxygen Discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, **25**, Article 055002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/055002>
- [8] Vass, M., Wilczek, S., Lafleur, T., Brinkmann, R.P., Donkó, Z. and Schulze, J. (2020) Electron Power Absorption in Low Pressure Capacitively Coupled Electronegative Oxygen Radio Frequency Plasmas. *Plasma Sources Science and Technology*, **29**, Article 025019. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab5f27>
- [9] Proto, A. and Gudmundsson, J.T. (2020) Electron Power Absorption Dynamics in a Low Pressure Radio Frequency Driven Capacitively Coupled Discharge in Oxygen. *Journal of Applied Physics*, **128**, Article 113302. <https://doi.org/10.1063/5.0019340>
- [10] Surendra, M. and Graves, D.B. (1991) Capacitively Coupled Glow Discharges at Frequencies above 13.56 MHz. *Applied Physics Letters*, **59**, 2091-2093. <https://doi.org/10.1063/1.106112>
- [11] 梁英爽. 射频容性耦合氮及氮/氩等离子体的流体力学模拟及实验验证[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [12] Hussain, S., Verma, A., Bera, K., Rauf, S. and Goeckner, M. (2024) Power Measurement Analysis of Moderate Pressure Capacitively Coupled Discharges. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, **42**, Article 033010. <https://doi.org/10.1116/6.0003366>
- [13] 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.