

专题: 低温等离子体非平衡输运与主动调控

尘埃颗粒对低气压射频等离子体中 非局域动理学的影响*

赵悦悦 缪阳 杨唯† 杜诚然

(东华大学物理学院, 上海 201620)

(2025年8月15日收到; 2025年8月29日收到修改稿)

低气压射频感性放电可以产生更均匀的单分散颗粒和等离子体, 因此常被用于纳米器件制造中. 纳米器件制造需要产生纳米到亚微米尺度的颗粒. 由于其通常带负电荷, 会显著影响等离子体的放电特性. 本文主要研究了尘埃颗粒的尺度和密度对低气压感性耦合等离子体中电子反弹共振加热效应以及基本等离子体性质的影响. 模拟结果表明, 随着颗粒半径或密度的增大, 在电子能量概率函数中以形成平台为特征的反弹共振加热效应逐渐受到抑制并最终消失, 导致电子温度下降、电子密度上升、颗粒表面电势增大, 而颗粒带电量随着颗粒密度的增大而减小, 随着颗粒半径的增大呈现非单调变化. 本研究指出, 由于颗粒存在引发的高能电子的损失可能会为低缺陷、单分散纳米颗粒的生长创造更有利的环境. 颗粒质量的提升对降低纳米器件中的陷阱密度以及增强其电学性能具有重要意义.

关键词: 射频等离子体, 尘埃等离子体, 非局域, 电子动理学**PACS:** 52.27.Lw, 52.25.Dg**DOI:** 10.7498/aps.74.20251096**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251096

1 引言

复杂等离子体由弱电离气体和尘埃颗粒组成^[1-5], 后者表现出多种形成机制并对等离子体行为产生多方面影响^[6-9]. 尘埃颗粒可以人为引入, 或由等离子体与表面相互作用或化学反应生成. 在实验室条件下, 可以将尘埃颗粒注入等离子体中, 构建强耦合体系^[10,11], 用于研究等离子体晶体和非晶体系^[12-15]、尘埃声波及其不稳定性^[16-19], 以及相分离和相变^[20-23]等多种物理过程.

在聚变装置中, 由壁面溅射产生的尘埃颗粒可能引起局域等离子体冷却, 并终止放电^[24-26]. 在半导体制造过程中, 例如芯片刻蚀和薄膜沉积工艺中, 尘埃颗粒通常由体相或表面化学反应生成的分

子团聚而成, 这些颗粒可能对刻蚀和沉积过程造成污染^[27]. 在表面改性过程中, 例如硅烷在等离子体环境中容易分解生成活性中间产物, 这些中间产物通过复杂的化学反应沉积在表面上, 形成所需的二氧化硅薄膜^[28-30]. 在尘埃颗粒密度和电荷较低时, 其对等离子体的影响可以忽略. 然而, 在射频 (radio frequency, RF) 等离子体中产生的尘埃颗粒通常具有亚微米尺度, 其密度在感性耦合等离子体 (inductively coupled plasma, ICP) 中可达到 10^8 cm^{-3} 甚至更高^[31,32]. 这些尘埃颗粒会不可避免地影响放电特性.

低气压 ICP 有利于生成单分散纳米颗粒, 而这类颗粒对于实现纳米器件中可靠的电接触至关重要^[31,32]. 其电输运通常受限于纳米颗粒内部的陷阱, 进而限制导电性能. 在低气压 ICP 中,

* 国家自然科学基金 (批准号: 12035003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weiyang@dlu.edu.cn

非麦克斯韦的电子能量概率函数 (electron energy probability function, EEPF) 通常具有高能尾, 这可能会在颗粒体相或表面引入结构损伤或深陷阱态, 从而增大陷阱密度, 降低电学性能. 然而, 等离子体中存在的尘埃颗粒会通过收集电子而引入额外的电子能量损失通道^[33-35], 从而减少能量高于颗粒表面电势的电子数量. 颗粒诱导的高能电子的抑制效应可能会创造一个更有利于低缺陷、单分散纳米粒子生长的环境. 改进的颗粒质量对于降低陷阱密度并提升基于纳米粒子的电子器件性能具有重要意义.

Shen 等^[31,32]的研究主要关注纳米器件中生成粒子的结构或电学特性, 然而, 很少研究颗粒本身对低气压 ICP 中的电子动理学的影响. 在低气压条件下, 电子动理学表现出非局域和非线性特征. 等离子体某一区域性质的变化会显著影响其他区域, 从而导致电子动理学^[36-39]的非局域性. 在有限尺寸 ICP 中, 存在两种电子加热机制: 一种是时间共振加热, 取决于趋肤深度和射频频率; 另一种是反弹共振加热 (bounce resonance heating, BRH), 与等离子体尺寸和射频频率相关. BRH 是低气压射频感性放电中的关键加热机制, 其特征是电子在腔室器壁间的反弹运动频率与射频频率相当时, 发生共振, 从而导致 EEPF 出现平台区^[37,40]. 在无尘埃 ICP 中, 朗缪尔探针通常用于测量 EEPF^[37]. 然而, 关于含尘埃 ICP 的实验 EEPF 数据依然非常稀缺. 这种稀缺性可能源于侵入式探针测量在含尘埃等离子体中会造成显著扰动, 改变局域等离子体特性并影响尘埃生成的动力学过程.

为了研究尘埃颗粒对低气压 RF-ICP 中非局域电子动理学的影响, 需要一种合适的数值模型^[41]. 基于局域欧姆定律的流体模型^[42,43]假设 EEPF 为麦克斯韦分布, 而这在低气压等离子体中往往不成立. 粒子模拟/蒙特卡罗碰撞 (particle-in-cell/Monte Carlo collision, PIC/MCC) 模型可以自洽地描述动理学特性, 但由于尘埃动力学与等离子体行为之间存在巨大的时间尺度差异, 因此计算资源需求极大^[44,45]. PIC/MCC 方法在容性耦合等离子体 (capacitively coupled plasma, CCP) 模拟中已经相当成熟, 但应用于 ICP 时计算需求更高. 与 CCP 不同, ICP 模拟需要求解全麦克斯韦方程组, 并跟踪更多的宏粒子, 这使得计算域尺寸受

限^[46,47], 远小于实际 ICP 应用腔体. 引入尘埃颗粒进一步增加了模拟的复杂性. 基于玻尔兹曼方程的动力学模型可以描述含尘埃等离子体中的 EEPF, 并揭示在非局域效应下偏离麦克斯韦分布的情况^[33,35,48-51]. 然而, 由有限尺寸效应导致的 BRH 在含尘埃等离子体中尚未得到研究.

本文基于已有对无尘 ICP 的研究^[52]开发了一种混合模型. 该混合模型实现了二维电磁场与非局域电子动理学以及含尘埃 ICP 的整体模型的自洽耦合. 该混合模型引入了尘埃颗粒的影响, 并为研究低气压含尘埃 ICP 中的电子动理学提供了理论工具. 本工作重点研究尘埃尺寸和密度对低气压下的 BRH 效应和等离子体基本放电特性的影响. 本研究有助于改进 ICP 放电性能, 并为基于纳米颗粒的电子器件设计提供参考.

2 混合模型数值模拟方法

模拟所采用的腔室结构如图 1 所示, 圆柱形腔体的半径为 R , 长度为 L . 射频频率设定为 Ω , 由于射频频率较高, 可以忽略带电粒子的洛伦兹力效应^[53]. 腔室侧壁缠绕螺旋线圈, 线圈上施加射频电流, 激发出随时间变化的轴向磁场 B , 而轴向变化的磁场进一步在方位角方向产生感应电场 E , 以维持等离子体放电.

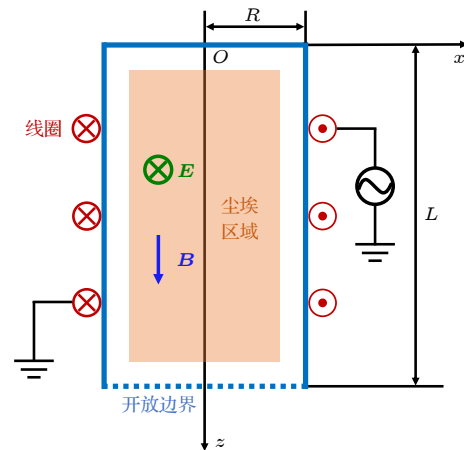


图 1 模拟的腔室结构图

Fig. 1. Chamber structure in the simulation.

本研究重点关注尘埃颗粒对等离子体性质的影响, 并非颗粒自身的生长和凝聚过程, 因此并未进行颗粒生成过程的自洽模拟, 而是人为假设了颗粒的密度和半径. 依据 Belenguer 等^[35,54]的实验研

究结果, 模型中假设颗粒均匀分布于等离子体中, 且鞘层内没有颗粒. 模拟过程中, 所有物理量均为轴对称分布.

本文将采用等离子体动理学混合模型对圆柱形腔室内产生的感性耦合氩气等离子体放电进行模拟研究. 等离子体混合模型包含三个主要模块: 电子动理学模块、电磁场模块、整体模型模块. 电子动理学模块中的准线性部分用于求解 EEPF、电子动理学模块中的线性部分结合电磁场模块用于求解感性电场以及电子流密度分布、整体模型模块用于确定等离子体密度和颗粒带电荷数. 该混合模型能够研究低气压等离子体中电子动理学的非局域性, 且已进行实验验证 [52,55,56]. 在引入颗粒后, 需要对上述三个模块进行修正, 以反映颗粒的影响, 包括尘埃颗粒对于电子碰撞积分、等离子体电导率、等离子体损失功率以及准中性条件的影响, 模型的具体方程如下 [33,35,52]:

$$-\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(D_e \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) = S_0^{(\text{elas})} + S_0^{(\text{ex})} + S_0^{(\text{iz})} + S_0^{(\text{ee})} + S_0^{(\text{ed})}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{E}}{dx^2} + \frac{d^2 \mathbf{E}}{dz^2} + k_0^2 \mathbf{E} = -i\Omega\mu_0 (\mathbf{J}_{\text{coil}} + \mathbf{J}_e), \quad (2)$$

$$P_{\text{abs}} = V \left(n_e P_v + n_i P_s + n_d P_d \frac{V_d}{V} \right), \quad (3)$$

$$n_i = n_e + |Z_d| n_d, \quad (4)$$

$$I_e + I_i = 0. \quad (5)$$

其中, 方程 (1) 是电子玻尔兹曼方程, 属于电子动理学模块, 用于描述电子能量概率分布和非局域电导率. ε 是电子能量, f_0 是 EEPF, D_e 是描述电子加热过程的能量扩散系数, $S_0^{(\text{elas})}$, $S_0^{(\text{ex})}$, $S_0^{(\text{iz})}$, $S_0^{(\text{ee})}$, $S_0^{(\text{ed})}$ 分别表示电子-中性弹性碰撞、激发碰撞、电离碰撞、电子-电子碰撞和电子-尘埃碰撞. 方程 (2) 是感性电场方程, 属于电磁场模块, 用于描述感性电场在空间的分布. 感性电流考虑了线圈内部的电流 J_{coil} 与电子电流 J_e , 根据实际的放电腔室, 如图 1 所示, 可以得到如下的边界条件: $E(0, z) = 0$, $E(x, 0) = 0$, $dE(x, z)/dz|_{z=H} = 0$, 即在 $x = 0$, $z = 0$ 的位置处为第一类边界条件, $z = H$ 的位置处为第二类边界条件, 即开放边界条件. 在模型中, 仅考虑电场的角向分量, 即 y 方向分量 E_y [52]. 方程 (3)—(5) 分别是功率平衡方程、准

中性条件与充电平衡方程 (轨道运动限制理论 (orbital motion limited, OML)), 属于整体模型模块. 功率平衡方程也称为能量平衡方程, 用于确定电子密度; 准中性条件为了维持等离子体的准中性, 用于确定离子密度; 充电平衡方程利用流到颗粒表面的电子流和离子流相等, 来确定尘埃颗粒带电荷数. P_{abs} 是总吸收功率, P_v , P_s 和 P_d 分别是单位体积内电子-中性碰撞损失的功率, 器壁表面单位面积电子和离子的功率损失, 单位体积内电子和离子与尘埃颗粒碰撞的功率损失, V 与 V_d 分别是等离子体体积与尘埃体积, n_e , n_i 与 n_d 分别是电子、离子与颗粒密度, Z_d 是颗粒带电荷数, I_e 与 I_i 分别是尘埃收集的电子流与离子流 [49,50,57].

图 2 所示为模拟计算的流程图, 3 个模块在计算过程中相互耦合, 具体流程如下: 模拟初始阶段会初始化设置电子密度 n_e 、离子密度 n_i 、有效电子温度 T_e 、尘埃带电荷数 Z_d . 这里初始设置的 n_e, n_i, T_e 和 Z_d 对模拟结果没有影响, 因为这些参数将最终获得自洽解. 首先通过动理学模块计算等离子体的电导率 σ_n 、归一化后的电子能量概率函数 f_0 和更新后的电子温度 T_e . 结合电磁场模块, 将 σ_n 作为输入参数, 计算电场展开项 E_{nm} 和沉积功率 P_{abs} . 将 P_{abs} 和 f_0 作为整体模型的输入参数, 获得更新后的电子密度 n_e , 离子密度 n_i 和尘埃颗粒带电荷数 Z_d . 重复迭代计算 n_e, n_i 和 Z_d , 直到收敛.

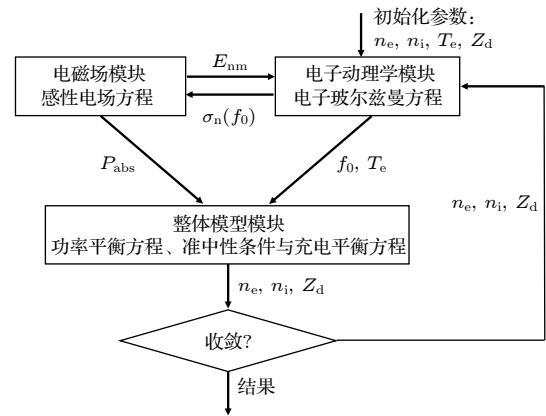


图 2 模拟计算程序流程图

Fig. 2. The flowchart of simulation.

3 结果与讨论

EEPF 的曲线特征及其变化规律可以表征等离子体中的电子动理学行为, 进而利于理解等离子

体的放电特性. 模拟中, 腔室半径为 2 cm、腔室高度为 14 cm、射频放电频率为 13.56 MHz、放电气压为 2.25 mTorr (1 Torr = 1.33×10^2 Pa)、放电功率为 50 W.

3.1 尘埃颗粒对电子能量概率函数的影响

图 3 所示为尘埃颗粒的半径和密度变化对 EEPF 产生的影响. 图 3(a), (b) 展示了颗粒密度为 $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, 不同颗粒半径 (50, 100, 150, 200 nm) 条件下的 EEPF 及其放大图, 图 3(c), (d) 展示了颗粒半径为 200 nm, 颗粒密度从 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 增至 $4 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 情况下的 EEPF 及其放大图, 图中黑色实线为无尘埃条件. 无尘埃颗粒时, BRH 效应较为显著, 第一反弹共振能量可以通过电子的反弹共振热运动频率 Ω_b 与射频电场频率 f 相匹配进行计算, 即 $\Omega_b = f$, 在该放电条件下, 第一反弹共振能量约为 3.3 eV. 随着颗粒半径的增大或密度的提高, EEPF 曲线的变化趋势类似, 大于第一反弹共

振能量的电子数迅速减少. 如图 3(a), (b) 中, 当半径增至 150 nm, BRH 效应明显减弱, 并在 200 nm 处消失, 曲线呈现单调下降的趋势, 近似于麦克斯韦分布的线性特征. 在图 3(c), (d) 中, 当颗粒密度增至 $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 时, 平台区域显著减弱, 进一步增至 $4 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 时, 平台特征几乎完全消失, 这表明颗粒的作用完全抑制了 BRH 效应. 造成这一现象的本质原因在于颗粒的引入增大了电子能量的损失, 导致高能电子数显著降低.

3.2 尘埃颗粒对电子温度和电子密度的影响

尘埃颗粒对 EEPF 的显著影响, 导致等离子体的基本性质发生变化, 如电子温度、电子密度等, 尘埃颗粒自身性质也会发生显著变化. 图 4 展示了不同颗粒半径或颗粒密度情况下, 电子温度和电子密度的变化, 其中图 4(a) 为不同颗粒半径下的情况, 颗粒密度固定为 $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, 图 4(b) 为不同颗粒密度下的情况, 颗粒半径固定为 200 nm.

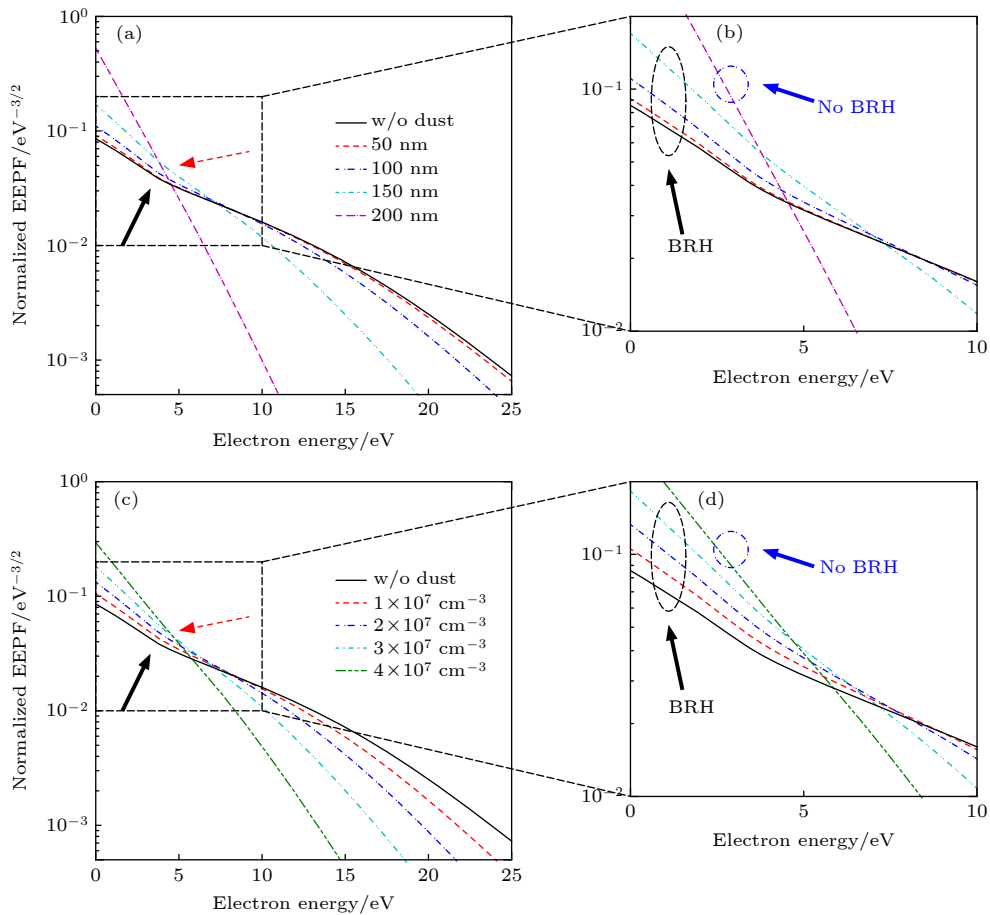


图 3 不同尘埃半径 (a), (b) 与不同尘埃密度 (c), (d) 情况下 EEPF 及放大图

Fig. 3. EEPF and zoomed-in plots for different dust radii (a), (b) and different dust densities (c), (d).

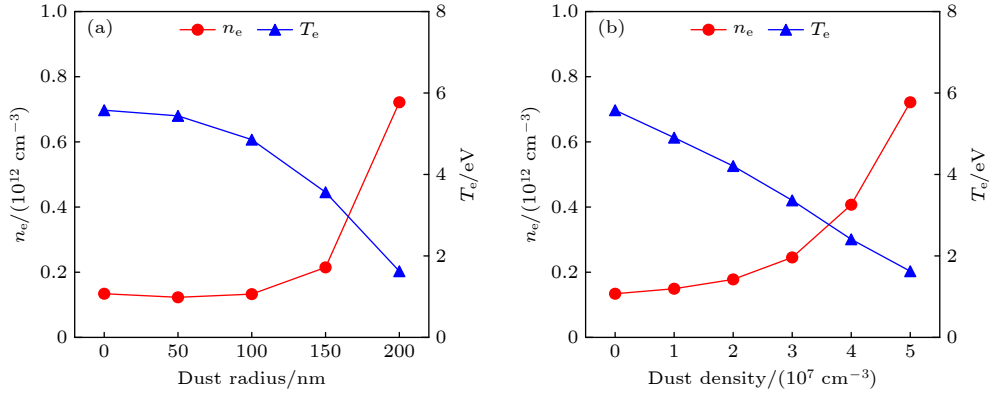


图 4 电子密度和电子温度随尘埃半径 (a) 与尘埃密度 (b) 的变化

Fig. 4. Variation of electron temperature, electron density, and ion density with different dust radii (a) and dust densities (b).

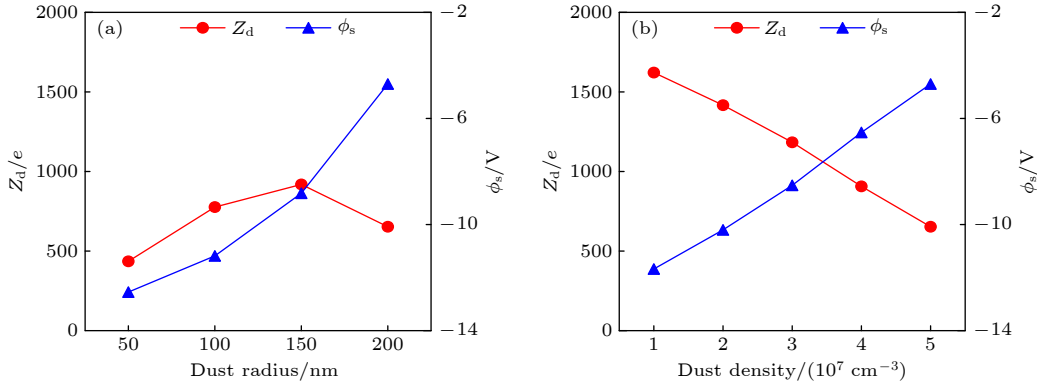


图 5 尘埃带电量 and 表面电势随尘埃半径 (a) 与尘埃密度 (b) 的变化

Fig. 5. Variation of dust charge and surface potential with different dust radii (a) and dust densities (b).

随着尘埃半径或尘埃密度的增大, EEPF 中高能尾的衰减导致了电子温度的显著下降. 电子密度主要受产生与损失平衡机制控制. 产生机制与电子-中性气体的电离碰撞有关, 而损失机制主要是电子-尘埃吸收碰撞和离子与器壁碰撞. 为了分析在器壁上的损失速率, 需要考虑波姆速度 $u_B = \sqrt{k_B T_e / m_i}$ [58] 的变化, 即离子进入鞘层内部的初始速度, 式中 m_i 是离子质量、 k_B 是玻尔兹曼常数. 在低气压等离子体中, 离子在器壁上的损失是等离子体的主要损失机制. 随着尘埃颗粒的引入, 下降的 T_e 导致 u_B 下降, 进一步使流向壁面的离子通量减小, 导致离子的损失速率也会降低. 因此, 尘埃颗粒的引入虽然使高能电子数减少, 即能够有效发生电离的电子数下降, 但离子在器壁表面的损失也减小, 两者之间的竞争机制导致电子密度随着颗粒半径或颗粒密度的增大而增大.

3.3 尘埃颗粒带电量

当尘埃颗粒引入后, 尘埃颗粒会收集等离子体内部的电子流与离子流并带电, 由于电子的质量远

小于离子的质量, 运动到颗粒表面的电子更多, 使得尘埃颗粒通常带负电. 尘埃颗粒的带电量与表面电势依赖于颗粒自身的参数. 图 5 展示了 Z_d 与表面电势 ϕ_s 随颗粒半径和密度的变化. 随着颗粒密度的增大, 其带电量呈现下降趋势, 而表面电势逐步上升. 当颗粒密度从 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 增至 $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 时, 颗粒带电量由约 $1500 e$ 减小到 $600 e$, e 是基本元电荷, 表面电势从 -12 V 升高至 -5 V . 造成这一现象的原因在于, 随着颗粒密度的升高, 可供单个颗粒收集的电子数变少, 导致颗粒带电量下降, 颗粒表面负电荷积累减少, 电势升高.

不同尘埃半径下, 颗粒带电量与表面电势也会发生变化. 颗粒表面电势的变化趋势与增大颗粒密度一致, 而带电量却出现了先上升后减小的非单调变化趋势. 根据 OML 充电理论, 流到颗粒表面的电子流 I_e 与离子流 I_i 相等, 如图 6 所示, 其中电子流为 $I_e = -\pi r_d^2 e n_e \sqrt{2e/m_e} \int_{-\phi_s}^{\infty} (f_0 \varepsilon + f_0 \phi_s) d\varepsilon$, r_d 是尘埃半径, m_e 是电子质量. 电子流包括两项, 第一项可以看作没有尘埃表面电势作用下, 颗粒收集

到的电子流,第二项是考虑尘埃表面电势对电子流收集的阻碍作用,两项分别记为 I_e^{geo} 与 I_e^{pot} . 因此,当颗粒半径增大后,增大了电子流向颗粒表面的概率,颗粒带电量增加,进一步增大颗粒半径,电子-尘埃碰撞导致电子能量衰减,使其无法克服颗粒表面电势抵达颗粒表面,进而导致颗粒带电量下降. 因此,随着颗粒半径的增大,颗粒带电量呈现出非单调变化.

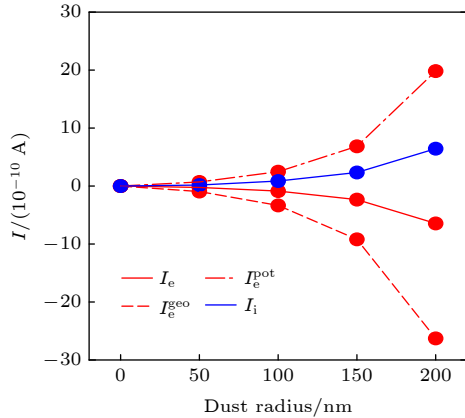


图6 尘埃收集的电子流、离子流随尘埃半径的变化
Fig. 6. Dust collected electron and ion currents under different dust radii.

4 结 论

低气压射频 ICP 利于生成均匀的单分散颗粒和等离子体,常被用于纳米器件制造中. 较高密度的带电颗粒不可避免地影响等离子体的放电特性. 本文重点研究了颗粒尺寸和密度对非局域电子动力学特性以及对电子密度、电子温度、颗粒带电量、颗粒表面电势等参数的影响. 当颗粒半径较小或密度较低时,电子反弹共振加热效应仍然较为明显,EEPF 展现明显平台区. 随着颗粒半径或密度的增大,EEPF 的平台区逐渐消失,EEPF 整体呈现近麦克斯韦分布. 这是由于颗粒的存在增加了电子能量损失通道,有效消耗了高能电子,进而抑制了电子反弹共振加热,最终导致电子温度下降、电子密度增大. 此外,随着颗粒密度的增大,其表面电势增大,带电量下降. 随着颗粒半径的增大,其表面电势增大,但带电量出现了先上升后减小的非单调变化趋势,这主要取决于 EEPF 中能克服颗粒表面电势的电子数量的变化. 反弹共振加热的抑制有利于低缺陷、单分散纳米颗粒的生长,从而提

升纳米器件的电学性能. 基于模拟得到的颗粒半径和密度阈值,为未来利用非侵入式诊断方法验证含尘埃 ICP 中的 EEPF 提供了参考依据.

参考文献

- [1] Fortov V E, Ivlev A V, Khrapak S A, Khrapak A G, Morfill G E 2005 *Phys. Rep.* **421** 1
- [2] Merlino R L, Goree J A 2004 *Phys. Today* **57** 32
- [3] Beckers J, Berndt J, Block D, Bonitz M, Bruggeman P J, Couëdel L, Delzanno G L, Feng Y, Gopalakrishnan R, Greiner F, Hartmann P, Horányi M, Kersten H, Knaepk C A, Konopka U, Kortshagen U, Kostadinova E G, Kovačević E, Krasheninnikov S I, Mann I, Mariotti D, Matthews L S, Melzer A, Mikikian M, Nosenko V, Pustyl'nik M Y, Ratynskaia S, Sankaran R M, Schneider V, Thimsen E J, Thomas E, Thomas H M, Tolias P, Van De Kerkhof M 2023 *Phys. Plasmas* **30** 120601
- [4] Morfill G E, Ivlev A V 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1353
- [5] De La Cal E, Martín A, Carralero D, De Pablos J L, Pedrosa M A, Shoji M, Hidalgo C, the TJ-II Team 2013 *Phys. Control. Fusion* **55** 065001
- [6] Boufendi L, Bouchoule A 2002 *Plasma Sources Sci. Technol.* **11** A211
- [7] Vladimirov S V, Ostrikov K 2004 *Phys. Rep.* **393** 175
- [8] Shukla P K, Eliasson B 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 25
- [9] Kersten H, Deutsch H, Stoffels E, Stoffels W W, Kroesen G M W, Hippler R 2001 *Contrib. Plasma Phys.* **41** 598
- [10] Du C R, Feng Y, Wang X G 2022 *Manned Spaceflight* **28** 323 (in Chinese) [杜诚然, 冯岩, 王晓钢 2022 载人航天 **28** 323]
- [11] Yang W, Wang Y N, Liang Y Y, Huang X J, Zhou H Y, Guo Y, Zhang J, Feng Y, Wang X G, Zhang L X, Du C R 2025 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **55** 105206 (in Chinese) [杨唯, 王垚楠, 梁颖悦, 黄晓江, 周鸿颖, 郭颖, 张菁, 冯岩, 王晓钢, 张立宪, 杜诚然 2025 中国科学: 物理学 力学 天文学 **55** 105206]
- [12] Chu J H, Lin I 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 4009
- [13] Thomas H, Morfill G E, Demmel V, Goree J, Feuerbacher B, Möhlmann D 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 652
- [14] Liu B, Goree J, Feng Y 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 085004
- [15] Du C R, Nosenko V, Thomas H M, Lin Y F, Morfill G E, Ivlev A V 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 185002
- [16] Numomura S, Zhdanov S, Samsonov D, Morfill G 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 045001
- [17] Teng L W, Chang M C, Tseng Y P, I L 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 245005
- [18] Couëdel L, Nosenko V, Ivlev A V, Zhdanov S K, Thomas H M, Morfill G E 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 195001
- [19] Huang H, Ivlev A V, Nosenko V, Yang W, Du C R 2023 *Phys. Rev. E* **107** 045205
- [20] Huang D, Baggioli M, Lu S Y, Ma Z, Feng Y 2023 *Phys. Rev. Res.* **5** 013149
- [21] Killer C, Bockwoldt T, Schütt S, Himpel M, Melzer A, Piel A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 115002
- [22] Wysocki A, Rätz C, Ivlev A V, Sütterlin K R, Thomas H M, Khrapak S, Zhdanov S, Fortov V E, Lipaev A M, Molotkov V I, Petrov O F, Löwen H, Morfill G E 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 045001
- [23] Ivlev A V, Zhdanov S K, Thomas H M, Morfill G E 2009 *Europhys. Lett.* **85** 45001
- [24] Winter J 2000 *Phys. Plasmas* **7** 3862
- [25] Pigarov A Yu, Krasheninnikov S I, Soboleva T K, Rogulien T

- D 2005 *Phys. Plasmas* **12** 122508
- [26] Smirnov R D, Pigarov A Y, Rosenberg M, Krasheninnikov S I, Mendis D A 2007 *Plasma Phys. Control. Fusion* **49** 347
- [27] Kokura H, Yoneda S, Nakamura K, Mitsuhiro N, Nakamura M, Sugai H 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 5256
- [28] Raha D, Das D 2013 *Appl. Surf. Sci.* **276** 249
- [29] Cheng Q, Xu S, Long J D, Ni Z H, Rider A E, Ostrikov K 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 055406
- [30] Bapat A, Perrey C R, Campbell S A, Barry Carter C, Kortshagen U 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1969
- [31] Shen Z, Kortshagen U, Campbell S A 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 2204
- [32] Shen Z, Kim T, Kortshagen U, McMurry P H, Campbell S A 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2277
- [33] Denysenko I B, Kersten H, Azarenkov N A 2015 *Phys. Rev. E* **92** 033102
- [34] Wang D Z, Dong J Q 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 38
- [35] Denysenko I, Yu M Y, Ostrikov K, Smolyakov A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 046403
- [36] Czarnetzki U, Alves L L 2022 *Mod. Plasma Phys.* **6** 31
- [37] Gu S, Kang H J, Kwon D C, Kim Y S, Chang Y M, Chung C W 2016 *Phys. Plasmas* **23** 063506
- [38] Kolobov V, Godyak V 2019 *Phys. Plasmas* **26** 060601
- [39] Liu Y X, Zhang Q Z, Jiang W, Hou L J, Jiang X Z, Lu W Q, Wang Y N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 055002
- [40] Chung C W, You K I, Seo S H, Kim S S, Chang H Y 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2992
- [41] Zhang Y R, Gao F, Wang Y N 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 095206 (in Chinese) [张钰如, 高飞, 王友年 2021 物理学报 **70** 095206]
- [42] Jia W Z, Zhang Q Z, Wang X F, Song Y H, Zhang Y Y, Wang Y N 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 015206
- [43] De Bleecker K, Bogaerts A, Goedheer W 2004 *Phys. Rev. E* **70** 056407
- [44] Boeuf J P 1992 *Phys. Rev. A* **46** 7910
- [45] Alexandrov A L, Schweigert I V, Peeters F M 2008 *New J. Phys.* **10** 093025
- [46] Wen H, Schulze J, Fu Y, Sun J Y, Zhang Q Z 2025 *Plasma Sources Sci. Technol.* **34** 03LT01
- [47] Fu C C, Dong Y C, Li Y F, Wang W Z, Wang Z H, Liu W 2024 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **57** 135201
- [48] Liu Y X, Zhang Q Z, Zhao K, Zhang Y R, Gao F, Song Y H, Wang Y N 2022 *Chin. Phys. B* **31** 085202
- [49] Li S, Rabadanov K M, Bogdanov E A, Kudryavtsev A A, Ashurbekov N A, Yuan C, Zhou Z 2021 *Plasma Sources Sci. Technol.* **30** 047001
- [50] Liang Y G, Wang Y, Li H, Tian R H, Yuan C X, Kudryavtsev A A, Rabadanov K M, Wu J, Zhou Z X, Tian H 2018 *Phys. Plasmas* **25** 053702
- [51] Fedoseev A V, Demin N A, Sahnikov M V, Sukhinin G I 2019 *Contrib. Plasma Phys.* **59** e201800181
- [52] Yang W, Wang Y N 2021 *Plasma Phys. Control. Fusion* **63** 035031
- [53] DiPeso G, Vahedi V, Hewett D W, Rognlien T D 1994 *J. Vac. Sci. Technol. A* **12** 1387
- [54] Belenguer Ph, Blondeau J Ph, Boufendi L, Toogood M, Plain A, Bouchoule A, Laure C, Boeuf J P 1992 *Phys. Rev. A* **46** 7923
- [55] Yang W, Gao F, Wang Y N 2022 *Plasma Sci. Technol.* **24** 055401
- [56] Yang W, Gao F, Wang Y N 2022 *Phys. Plasmas* **29** 063503
- [57] Allen J E 1992 *Phys. Scr.* **45** 497
- [58] Wood B P, Lieberman M A, Lichtenberg A J 1995 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **23** 89

SPECIAL TOPIC—Non-equilibrium transport and active control strategy in low-temperature plasmas

Influence of dust particles on non-local kinetic behavior in low-pressure radio frequency plasma^{*}

ZHAO Yueyue MIAO Yang YANG Wei[†] DU Chengran

(College of Physics, Donghua University, Shanghai 201620, China)

(Received 15 August 2025; revised manuscript received 29 August 2025)

Abstract

Low-pressure radio-frequency inductively coupled discharges can produce uniformly distributed monodisperse particles and plasma, making them widely used in nanodevice fabrication. The manufacturing of nanodevices typically requires the generation of particles ranging from nanometer to submicron scales. These particles usually carry negative charges and can significantly influence the discharge characteristics of the plasma. This study investigates the effects of particle size and density on electron bounce resonance heating (BRH) and fundamental plasma properties in low-pressure inductively coupled plasmas (ICPs) by using a hybrid model. The hybrid model consists of kinetic equation, electromagnetic field equation, and global model equation. The simulation results show that as the dust radius or density increases, the BRH effect characterized by the formation of a plateau in the probability function of electron energy, is gradually suppressed and eventually disappears, accompanied by a decrease in electron temperature, an increase in electron density, and an increase in particle surface potential. The dust charge decreases with the increase of particle density, while exhibiting a nonmonotonic variation with particle radius. The results show that the loss of high-energy electrons caused by the dust particles may create a more favorable plasma environment for the growth of monodisperse nanoparticles with low defects. Such an improvement in particle quality is crucial for reducing trap densities and enhancing the electrical performance of nanoparticle-based electronic devices.

Keywords: radio frequency plasma, dust plasma, non-locality, electron kinetics

PACS: 52.27.Lw, 52.25.Dg

DOI: [10.7498/aps.74.20251096](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251096)

CSTR: [32037.14.aps.74.20251096](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20251096)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12035003).

[†] Corresponding author. E-mail: weiyang@dhu.edu.cn

尘埃颗粒对低气压射频等离子体中非局域动理学的影响

赵悦悦 缪阳 杨唯 杜诚然

Influence of dust particles on non-local kinetic behavior in low-pressure radio frequency plasma

ZHAO Yueyue MIAO Yang YANG Wei DU Chengran

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 205204 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251096

CSTR: 32037.14.aps.74.20251096

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251096>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

尘埃等离子体金属直棘轮中尘埃颗粒的整流

Rectification of dust particles in a dusty plasma metal straight ratchet

物理学报. 2025, 74(7): 075202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241740>

基于Fokker-Planck-Landau碰撞模型的非均匀尘埃等离子体目标散射特性

Scattering characteristics of non-uniform dusty plasma targets based on Fokker-Planck-Landau collision model

物理学报. 2023, 72(6): 060201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222113>

尘埃等离子体棘轮中颗粒分离的三维模拟

Three-dimensional numerical simulation of particle separation using a dusty plasma ratchet

物理学报. 2024, 73(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240319>

等离子体对共振磁扰动的流体和动理学响应的模拟研究

Modelling study of fluid and kinetic responses of plasmas to resonant magnetic perturbation

物理学报. 2023, 72(7): 075202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222196>

月球南极尘埃等离子体环境特性

Characteristics of dust plasma environment at lunar south pole

物理学报. 2024, 73(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240599>

多组分尘埃等离子体中非线性尘埃声孤波的传播特征

Propagating characteristics of nonlinear dust acoustic solitary waves in multicomponent dusty plasma

物理学报. 2023, 72(3): 035201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221843>