

尘埃粒子在直流辉光放电阴极鞘层中的运动及悬浮*

刘德泳 王德真 刘金远

(大连理工大学物理系, 三束材料改性国家重点实验室, 大连 116024)

(1999 年 7 月 24 日收到)

研究尘埃粒子在直流辉光放电阴极鞘层中的运动特性, 并讨论了尘埃粒子携带的电荷、受到的各种力及悬浮位置等. 尘埃粒子在鞘层中的运动特性及悬浮位置主要由它的尺寸大小和它所受到的各种力(重力、电场力、离子拖拽力、中性粒子拖拽力)决定. 比较无碰撞鞘层和碰撞鞘层发现, 尘埃粒子在碰撞鞘层中的悬浮位置更加靠近极板, 比较下鞘(阴极板放在下方时的鞘层)和上鞘(阴极板放在上方时的鞘层)发现, 在下鞘中只有同一半径的尘埃粒子悬浮在鞘层中的同一位置, 而在上鞘中两种不同半径的尘埃粒子可以悬浮在鞘层中的同一位置. 悬浮在鞘层中的尘埃粒子只可能是携带负电荷的, 并满足合力 $F_{\text{net}}=0$ 及 $dF_{\text{net}}/dx < 0$, 但满足上述条件的尘埃粒子能否悬浮在鞘层中, 还取决于其初始位置和初始速度.

PACC: 5240K; 5225; 5280

1 引 言

等离子体技术目前已成为大规模集成电路生产中的关键工艺, 是其他技术难以顶替的. 近几年来, 人们发现在集成电路的等离子体加工中, 存在大量的尘埃粒子, 严重影响加工的质量和效率. 尘埃等离子体物理开始倍受关注, 目前已成为等离子体物理中的一个重要前沿分支. 迄今为止, 已有不少关于尘埃等离子体的文章发表, 它们的内容涉及尘埃粒子的充电过程、尘埃粒子在鞘层中的运动和悬浮等^[1-3, 6].

本文将讨论尘埃粒子在辉光放电四种阴极鞘层(无碰撞下鞘、碰撞下鞘、无碰撞上鞘、碰撞上鞘)中的悬浮位置和运动特性等; 建立鞘层模型, 讨论尘埃粒子的充电过程; 分析尘埃粒子的受力情况及悬浮位置; 求解尘埃粒子的运动方程, 并给出一些运动轨迹.

2 鞘层模型

在实验室低温等离子体装置中, 当中性气体气压很高时, 离子的平均自由程小于鞘层的厚度, 此时

离子和中性气体原子的碰撞不可忽略, 鞘层视为碰撞鞘层. 在鞘层边界 $x = s$ 处 (s 为鞘层的厚度), 假设离子以速度 $v_0 = -v_B$ (v_B 为离子声速或玻姆速度) 从等离子体区域进入鞘层区域, 坐标原点选在极板处, x 方向由电极指向鞘层.

在鞘层中离子的连续性方程和运动方程为

$$n_i v_i = n_0 v_0, \quad (1)$$

$$m_i v_i \frac{dv_i}{dx} = -e \frac{dV}{dx} + F_c, \quad (2)$$

式中 n_i, v_i 分别为离子密度和离子速度, n_0 是等离子体区域等离子体密度, m_i 为离子质量, V 为鞘层局域势, $F_c = m_i \gamma |v_i|$ 为弱电离气体流体力学中经常用到的摩擦力, 其中 $\gamma = n_n \sigma |v_i|$ 是离子碰撞频率, n_n 为中性气体密度, σ 为离子和中性气体间的碰撞截面. 当忽略(2)式中的摩擦力 F_c 时, 碰撞鞘层模型将过渡到无碰撞鞘层模型.

当尘埃粒子的密度不是很高时, 可以忽略尘埃粒子对鞘层的影响. 鞘层中的局域势 V 满足泊松方程,

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e), \quad (3)$$

式中 n_e 是电子密度, 假设稳态电子遵循玻尔兹曼分布 $n_e(x) = n_0 \exp(-eV/kT_e)$. 为简化上述方程, 引入

* 国家自然科学基金(批准号: 19875006)和教育部博士科学点专项基金(批准号: 98014109)资助的课题.

$Y \equiv \frac{eV}{kT_e}$, $\xi \equiv x/\lambda_D$, $u_i \equiv \frac{v_i}{v_B}$, $\alpha \equiv \frac{\lambda_D}{\lambda_i}$ 等无量纲量, 这里 $\lambda_D \equiv \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_0 e^2} \right)^{1/2}$ 为电子德拜长度, $\lambda_i = \frac{1}{n_n \sigma}$ 为离子平均自由程, 方程(1)–(3)可化为

$$u_i \frac{du_i}{d\xi} = -\frac{dY}{d\xi} + \alpha u_i^2, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 Y}{d\xi^2} = \exp(Y) + \frac{1}{u_i}. \quad (5)$$

考虑到在边界 $\xi = L = s/\lambda_D$ 处, 局域势 $V = 0$, 离子受力为零, 离子速度为 $-v_B$, 则可得出其边界条件 $Y(L) = 0$, $dY/d\xi|_L = 0$ 和 $u_i(L) = -1$, 整个鞘层就可以自治求解了。

本文中所采用实验参数如下: 在氩气直流辉光放电装置中 $n_0 = 6.1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $kT_e = 2.0 \text{ eV}$, $kT_n = 0.025 \text{ eV}$ (kT_n 为中性气体的温度) 极板上所加负偏压值 $V_0 = -40 \text{ V}$, 鞘层中尘埃粒子的质量密度为 $\gamma_d = 2000 \text{ kg/m}^3$. 对于碰撞鞘层, 中性气体的密度为 $n_n = 3.3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, $\alpha = 0.134$ (相应于 $p = 133 \text{ Pa}$, $\sigma = 3 \times 10^{-19} \text{ m}^2$).

图 1 给出了鞘层中各点处的局域势 V (无量纲化后为 Y). 从图中可以看出, 考虑到离子和中性气体原子间的碰撞后, 局域势 V 更快地趋于零. 根据碰撞鞘层的假设, 离子和中性气体原子的碰撞不可忽略, 则离子的运动速度 v_i 将变慢, 离子的密度增大. 离子密度的增加将使离子对阴极的屏蔽效应增强, 局域势 V 更快地趋于零, 这使得鞘层变薄。

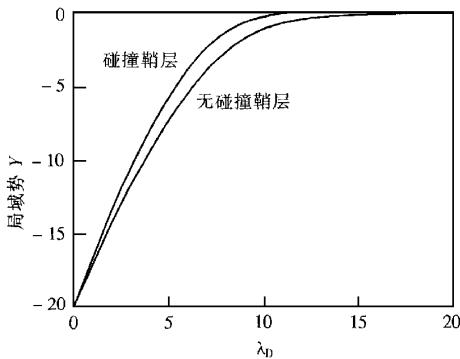


图 1 鞘层中各点处的局域势

3 尘埃粒子的充电过程

鞘层中的尘埃粒子由于收集电子和离子而携带电荷, 或由于光电发射、二次电子发射等引起电荷的改变. 在本文中, 将忽略光电发射和二次电子发射等

对尘埃充电过程的影响, 此时尘埃粒子稳态时携带的电荷由到达尘埃粒子上的电子流和离子流的通量相等的条件决定。

在电荷(电流)平衡时, 尘埃粒子上的净电流为零, 即

$$I_e + I_i = 0, \quad (6)$$

式中 I_e , I_i 分别为碰撞到尘埃粒子上的电子流和离子流. 根据轨道理论(OML理论)^[4], 电子流的表达式为

$$\text{当 } Y_D \leq 0 \text{ 时, } I_e = -n_e e \pi a^2 \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} \exp(Y_D), \quad (7)$$

$$\text{当 } Y_D > 0 \text{ 时, } I_e = -n_e e \pi a^2 \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} (1 + Y_D), \quad (8)$$

式中 $Y_D = eU/kT_e$ 是无量纲化的漂浮势, U 为尘埃粒子的漂浮势。

尘埃粒子上的离子流^[3]为

$$\text{当 } Y_D \leq u_i^2/2 \text{ 时 } I_i = n_0 e \pi a^2 \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{2Y_D}{u_i^2} \right), \quad (9)$$

$$\text{当 } Y_D > u_i^2/2 \text{ 时 } I_i = 0. \quad (10)$$

(10)式表明当 $Y_D > 0$ 时, 离子将被尘埃粒子所排斥开, 而不与尘埃粒子发生碰撞, 此时离子流为 $I_i = 0$. 通过(7)–(10)式代入(6)式可以计算出尘埃粒子的漂浮势 U , 尘埃粒子携带的电荷 q_d ($q_d = U/4\pi\epsilon_0 a U$) 也就确定了。

图 2 给出了尘埃粒子在鞘层中各点处的漂浮势 U (无量纲化后为 Y_D). 从图中可以看出, 碰撞鞘层中的漂浮势比无碰撞鞘层中的漂浮势低, 这主要是由于在碰撞鞘层中的离子运动速度变慢和离子密度增加. 在极板处附近, 尘埃粒子的漂浮势是正值, 即

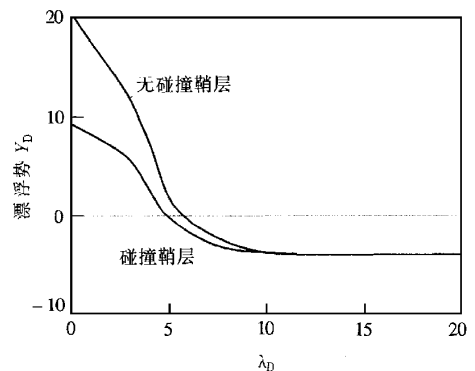


图 2 尘埃粒子在鞘层中各点处的漂浮势

带的是正电荷,在稍远处尘埃粒子的漂浮是负值,即带的是负电荷.这主要是由于在极板附近,电场强度 E 很大,且指向鞘层,电子被排斥开,电子密度极低,与尘埃粒子发生碰撞的主要是离子,因而尘埃粒子携带的是正电荷;在远离极板处,电子密度已较高,由于电子的质量远比离子的质量小得多,其热运动速度也高,因而尘埃粒子表面带的是负电荷.这与空间尘埃等离子体^[2]或射频情况^[3]下有很大的不同,空间尘埃粒子或射频鞘层中的尘埃粒子在整个鞘层中带的是负电荷.

4 尘埃粒子的受力情况

我们分析一个半径为 a ($a \ll \lambda_D$) 的球形尘埃粒子在鞘层中的受力情况.尘埃粒子在鞘层中运动时主要会受到以下几个力的作用.

1. 重力 尘埃粒子受到的重力 F_g 为

$$F_g = \pm m_d g = \pm \frac{4}{3} \pi a^3 \gamma_d g, \quad (11)$$

式中 m_d 为尘埃粒子的质量, g 为重力加速度, γ_d 为尘埃粒子的质量密度.(11)式中 \pm 号是相对于尘埃粒子所处的鞘层来说的,当尘埃粒子位于上鞘中时取正号,当尘埃粒子位于下鞘时取负号.

2. 电场力 设尘埃粒子所带电荷为 q_d , 则其所受的电场力 F_e 为

$$F_e = q_d E, \quad (12)$$

式中 $E = -dV/dx$ 是鞘层内尘埃粒子所在处的电场强度.

3. 离子拖拽力 由于鞘层内电场的驱动,会形成离子流.离子流在与尘埃粒子发生相互作用时,会进行动量的交换,因而对尘埃粒子有力的作用,方向与离子流的方向相同.离子拖拽力有两种作用方式:一种是离子被尘埃粒子收集而进行力的作用,另一种是离子同带电的尘埃粒子通过库仑碰撞而进行力的作用.与这两种作用方式相对应的力称为离子收集拖拽力 F_{icoll} 和库仑拖拽力 F_{icoul} , 它们的表达式^[3]为

$$F_{icoll} = -\pi a^2 m_i n_i \left(1 - \frac{2eU}{m_i v_i^2} \right), \quad (13)$$

$$F_{icoul} = \frac{-2\pi a^2 n_i (eU)}{m_i v_i^2} \ln \Lambda, \quad (14)$$

式中 $\Lambda = \frac{\lambda_D^2 + b_0^2}{b_{coll}^2 + b_0^2}$, $b_0 \equiv \frac{eq_d}{4\pi\epsilon_0 m_i v_i^2} = \frac{aeU}{m_i v_i^2}$, $b_{coll} \equiv a \left(1 - \frac{2eU}{m_i v_i^2} \right)^{\frac{1}{2}}$. 总的离子拖拽力 $F_i = F_{icoll} + F_{icoul}$.

4. 中性粒子拖拽力 中性粒子拖拽力是由于尘埃粒子和中性粒子间的碰撞而产生的阻力.忽略任何气体流动,尘埃粒子相对中性粒子的速度为 V_d . 中性粒子拖拽力采用 Epstein 表达式^[5]:

$$F_{neu} = -\frac{16}{3} \sqrt{\pi} a^2 n_n k T_n \frac{v_d}{v_{th}} \left(1 + \frac{8}{\pi} \right), \quad (15)$$

式中 v_{th} 为中性气体原子热运动速度.

图3给出了尘埃粒子 ($a = 5.0 \mu\text{m}$) 在碰撞下鞘层中各点处受到的重力、电场力、离子拖拽力(图中不包含 F_{neu} , 因为中性粒子拖拽力正比于尘埃粒子的运动速度,对平衡位置无影响,此处不画出).从图中可以看出,在下鞘层中, F_g, F_i 始终是负值,方向指向电极,电场力则有一个反向的过程.在靠近极板处 (q_d 为正值) 时,电场力是负值,方向指向极板;在稍远处 (q_d 变号后),电场力是正值,方向指向鞘层边界.因而只有带负电的尘埃粒子才可能在鞘层中某一点处平衡.在上鞘层中,尘埃粒子受到的重力始终是正值,指向鞘层边界,电场力、离子拖拽力同下鞘.

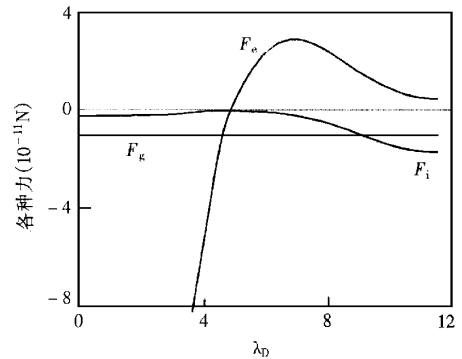


图3 尘埃粒子的受力图

图4给出了一个尘埃粒子 ($a = 5.0 \mu\text{m}$) 在碰撞下鞘和碰撞上鞘中受到的合力图.从图中可以看出,尘埃粒子在鞘层中有两个平衡位置,其中里面的一个(靠近极板处)是不稳定平衡点,外面的一个(靠近等离子体区域处)是稳定平衡点(即悬浮位置).这是因为在里面的平衡位置处 $dF_{net}/dx > 0$, 尘埃粒子由于某种原因稍偏离平衡位置,它就会受到一个与运动方向相同的力,这个力会促使粒子进一步离开平衡位置,因而这个平衡点是一个不稳定平衡点.同样的分析,可得出外面的平衡点是稳定平衡点.可见,尘埃粒子稳定平衡的必要条件是 $F_{net} = 0$ 及 $dF_{net}/dx < 0$.

在上鞘中,似乎带正电荷的尘埃粒子和带负电荷的尘埃粒子都有可能悬浮在鞘层中某一点处.带

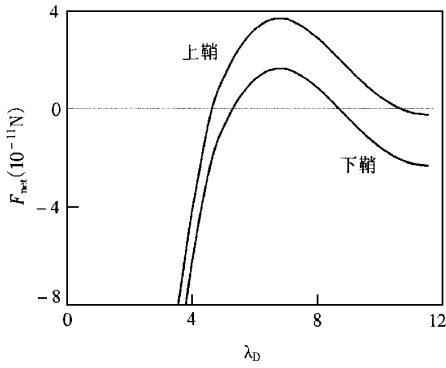


图 4 尘埃粒子受到的合力图

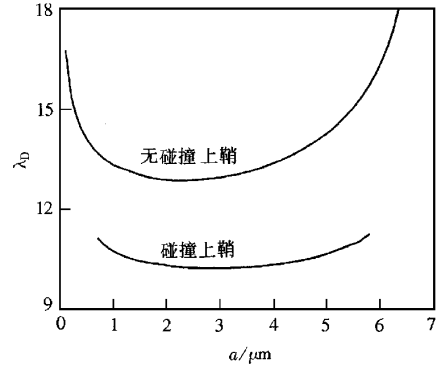


图 6 上鞘层中的悬浮位置

正电荷的尘埃粒子虽然有可能满足合力 $F_{\text{net}} = 0$, 但当尘埃粒子由于某种扰动从平衡位置稍向极板(向鞘层边界)运动时, 它所受到的离子拖拽力和重力几乎不变, 而电场力大小会增大(减小), 方向指向极板, 合力会减小(增大), 即 $dF_{\text{net}}/dx > 0$, 因而这种平衡是不稳定平衡. 带负电荷的尘埃粒子则可能满足 $F_{\text{net}} = 0$ 及 $dF_{\text{net}}/dx < 0$. 综合上鞘和下鞘两种情况, 悬浮在鞘层中的尘埃粒子只能是携带负电荷的, 这或许是实验中没有观察到带正电荷的尘埃粒子的原因吧.

由稳定平衡的必要条件 $F_{\text{net}} = 0$ ($F_{\text{net}} = F_g + F_e + F_i + F_{\text{neu}}$ 是尘埃粒子所受合力)和 $dF_{\text{net}}/dx < 0$ 可求出尘埃粒子在鞘层中的悬浮位置. 图 5、图 6 给出了不同半径的尘埃粒子在四种鞘层中悬浮位置. 从图 5、图 6 可以看出: 在下鞘中悬浮在同一点处的尘埃粒子的半径相同, 而在上鞘中两种不同半径的尘埃粒子可以同时悬浮在鞘层中同一点处. 原因可以如下解释: 在上鞘层中, 尘埃粒子受到指向极板的离子拖拽力和指向鞘层边界的电场力、重力作用. 在

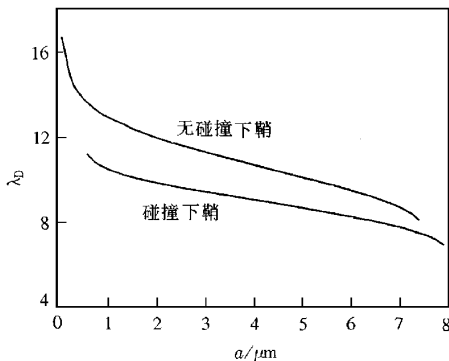


图 5 下鞘层中的悬浮位置

鞘层中某一点处, 电场强度一定, 当尘埃粒子半径较大(较小)时, 尘埃粒子携带的电荷较多(较少), 它所受到重力、电场力、离子拖拽力都较大(较小), 因而两种不同半径的尘埃粒子可能悬浮在鞘层中的同一点处. 悬浮在鞘层中的尘埃粒子是有一定尺寸范围的. 当尘埃粒子太大或太小, 它们都不可能悬浮在鞘层中. 比较图 5、图 6 中无碰撞鞘层和碰撞鞘层还可以看出, 尘埃粒子在碰撞鞘层中的悬浮位置比在无碰撞鞘层中的悬浮位置更加接近极板, 这也是由于碰撞鞘层的厚度变薄的缘故.

5 尘埃粒子的运动特性分析

在鞘层中尘埃粒子的运动方程为

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = F_{\text{net}}. \quad (16)$$

由于尘埃粒子充电需要一定的时间, F_{net} 不仅是位置的函数, 而且是时间的函数. 但由于尘埃粒子的充电时间一般在几个 μs 左右^[6], 远小于尘埃粒子运动的特征时间, 可认为 F_{net} 仅是位置的函数. 由 (16) 式可以计算出尘埃粒子在鞘层中的运动轨迹.

图 7 表示的是在碰撞下鞘层中, 尘埃粒子以不同的初始速度从极板向鞘层中发射, 图中标注的数字是其初始速度(单位是 λ_D/s). 从图中可以看出, 尘埃粒子只有具有合适的初始速度才可能最终悬浮在鞘层中. 当尘埃粒子速度太小时, 它们不能到达悬浮位置, 最终落向极板. 当尘埃粒子的初始速度达到一定值后, 它们在悬浮位置处附近作阻尼振荡, 最终悬浮在鞘层中. 当速度非常大时, 尘埃粒子将直接飞出鞘层. 在鞘层中非稳定平衡点之前释放尘埃粒子同从极板向鞘层中发射尘埃粒子的情况类似, 只有

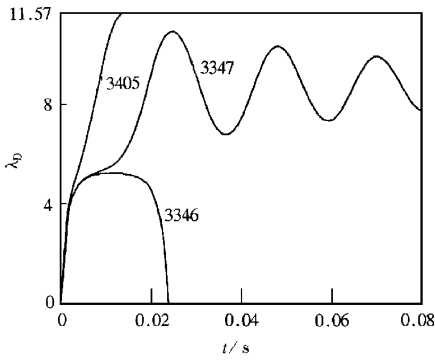


图 7 极板上尘埃粒子发射的各种情况

具有合适的初始速度,才可能最终悬浮在鞘层中.而在非稳定平衡点之后释放尘埃粒子,情况有所不同,因为它们受到的合力大于零,指向鞘层(如图4),尘埃粒子不需要初始速度,就可能在稳定平衡点处附近做阻尼振荡,并最终悬浮在鞘层中,图8表示的就是这种情况.

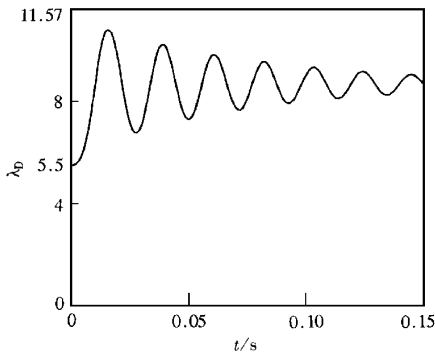


图 8 鞘层中尘埃粒子发射的情况

图9给出了等离子体区域的尘埃粒子由于重力作用落回鞘层区域的各种情况.假设在碰撞下鞘层边界处两个半径不同的尘埃粒子,以零速度从等离

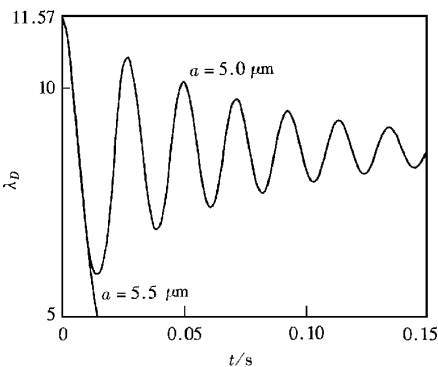


图 9 尘埃粒子落回鞘层区域的各种情况

子体区域落回鞘层区域.从图中可以看出,当半径较大时,由于重力太大,尘埃粒子在鞘层中的减速不够,直接落回了极板,而半径较小的尘埃粒子则在鞘层中经阻尼振荡,最终悬浮在鞘层中.图10模拟了碰撞下鞘层中尘埃粒子生长的情况,尘埃粒子在 $0 < t < 0.1$ s 时尘埃粒子以 $a = \exp(10t)$ (单位是 μm) 的速度生长.图10很好地说明了随着半径的增大,尘埃粒子在下鞘层中的平衡位置更加靠近极板.

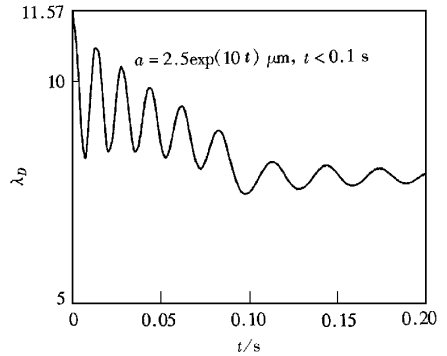


图 10 模拟尘埃粒子生长的情况

图11给出了在碰撞上鞘层中,半径为 $a = 5.0 \mu\text{m}$ $a = 1.125 \mu\text{m}$ 的两个尘埃粒子在离极板 $\xi = 10.4 \lambda_D$ 处零速度释放的运动轨迹.从图中可以看出,两种不同半径的尘埃粒子经过一段时间的阻尼振荡后确实可以悬浮在鞘层中的同一点处,这和图6的结论一致.利用模拟尘埃粒子的运动轨迹的方法还可以判断出各个力在其运动中的作用.图12给出了忽略 F_{neu} 时尘埃粒子($a = 5.0 \mu\text{m}$,在 $\xi = 5.5 \lambda_D$ 零速度释放)在碰撞下鞘层中的运动情况.比较图8和图12,可看到中性粒子拖拽力 F_{neu} 的作用主要是增大尘埃粒子振荡阻尼,使之尽快趋于平衡.

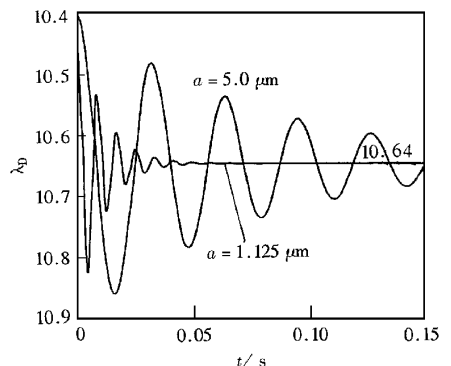


图 11 不同半径的尘埃粒子悬浮在上鞘同一点

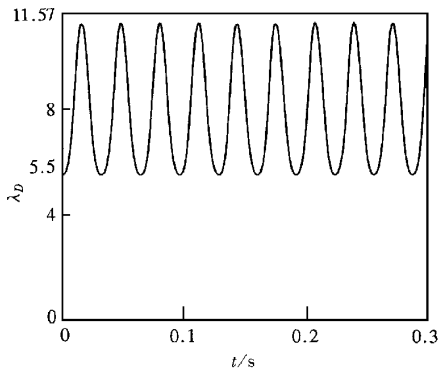


图 12 忽略 F_{net} 时尘埃粒子的运动轨迹

6 结 论

在前文中,我们主要讨论了尘埃粒子在四种直流辉光放电阴极鞘层(无碰撞下鞘、碰撞下鞘、无碰撞上鞘、碰撞上鞘)中的运动特性,并讨论了尘埃粒子携带的电荷、受力情况和悬浮位置。尘埃粒子在鞘层中,由于收集电子和离子而携带大量电荷,它在鞘层中运动时会受到重力、电场力、离子拖拽力、中性粒子拖拽力的作用。尘埃粒子的运动特性及悬浮位置主要由前三者决定,中性粒子拖拽力的作用主要是尘埃粒子在悬浮点附近振荡时增大其阻尼,使之

尽快趋于平衡。比较无碰撞鞘层和碰撞鞘层发现:尘埃粒子在碰撞鞘层中的悬浮位置离极板更近一些。上鞘和下鞘的最大不同在于:下鞘层中只有同一半径的尘埃粒子可以悬浮在鞘层中的同一位置处;在上鞘层中两种不同半径的尘埃粒子可以悬浮在鞘层中的同一位置处。悬浮在鞘层中的尘埃粒子只可能是携带负电荷的,并满足合力 $F_{\text{net}} = 0$ 及 $dF_{\text{net}}/dx < 0$,至于满足上述平衡条件的尘埃粒子能否悬浮在鞘层中,还与尘埃粒子的初始位置和初始速度有关。

当考虑到大量的尘埃粒子聚集在鞘层中时,在自洽求解鞘层方程和尘埃粒子充电时,应考虑尘埃粒子间的相互作用及尘埃粒子空间电荷效应,此时不宜再采用单粒子模型。这有待于我们作进一步的研究。

- [1] D. Winske, M. E. Jones, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **23**(2) (1995), 188.
- [2] T. Nitter, T. K. Aslaksen *et al.*, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **22** (2) (1994), 159.
- [3] T. Nitter, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **5** (1996), 93.
- [4] J. E. Allen, *Phys. Scr.*, **45** (1992), A97.
- [5] P. S. Epstein, *Phys. Rev.*, **23** (1924), 710.
- [6] F. Malandø, T. Nitter *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A14**(2) (1996), 619.

DYNAMICS AND SUSPENSION OF DUST PARTICLES IN CATHODE SHEATHS OF DC GLOW DISCHARGES*

LIU DE-YONG WANG DE-ZHEN LIU JIN-YUAN

(*State Key Laboratory for Materials Modification by Laser ,Ion and Electron Beams ,*

Dalian University of Technolog ,Dalian 116024 ,China)

(Received 24 July 1999)

ABSTRACT

We have investigated the dynamics of dust particles in electrode sheaths of dc glow discharges. The charge of dust particles ,the various forces and the suspension position are also calculated. The dynamics and the suspension position of dust particles are determined by their size and the forces acting on them. We find that the suspension position in the collisional sheath is closer to the electrode than that in the collisionless sheath. It is also shown that in the lower sheath(above the lower electrode) only those particles of the same size can be suspended in the same position. In the upper sheath(under the upper electrode) grains with different sizes can be suspended in the same position. All the dust particles suspended in the sheath are charged negatively and satisfy $F_{\text{net}} = 0$ and $dF_{\text{net}}/dx < 0$. However ,whether the dust particles that satisfy these conditions can be suspended in the sheath is also determined by their initial position and velocity.

PACC : 5240K ; 5225 ; 5280

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 19875006).