

# 等离子体鞘层中尘埃粒子的分布特性<sup>\*</sup>

段 萍<sup>1,2)</sup> 刘金远<sup>1)†</sup> 宫 野<sup>1)</sup> 张 宇<sup>1)</sup> 刘 悦<sup>1)</sup> 王晓钢<sup>1)</sup>

1) 大连理工大学三束材料改性国家重点实验室, 物理与光电工程学院, 高科技研究院, 大连 116024)

2) 大连大学物理科学与技术学院, 大连 116622)

(2007 年 4 月 14 日收到, 2007 年 6 月 28 日收到修改稿)

采用柱槽状电极的流体模型, 数值模拟了等离子体鞘层及鞘层中尘埃粒子的分布结构. 研究了尘埃粒子数、粒子大小、电极尺寸等因素对尘埃分布结构的影响. 研究表明: 当等离子体密度较高时, 鞘层较薄, 反之鞘层较厚; 当尘埃粒子数少时, 尘埃分布形成一层结构, 反之则形成多层结构. 随电极尺寸的不同, 尘埃粒子形成一些复杂而又有趣的结构.

关键词: 尘埃粒子, 等离子体鞘层, 电极

PACC: 5225Z, 5240K, 5265

## 1. 引 言

近年来在对尘埃等离子体的研究中, 人们发现了许多奇特现象, 如尘埃晶格的形成<sup>[1-4]</sup>、单尘埃粒子在鞘层中的非线性共振<sup>[5-7]</sup>以及尘埃晶格在磁场作用下的旋转<sup>[8-10]</sup>等. 在等离子体材料加工中产生的带电尘埃粒子, 会改变等离子体鞘层的结构, 影响加工材料的性质, 甚至对加工工件造成污染, 因此研究带电尘埃在等离子体鞘层中的分布具有重要意义. 学者们对此做了许多研究工作, 如尘埃充电特性<sup>[11, 12]</sup>、尘埃相互作用<sup>[13-15]</sup>、尘埃的悬浮<sup>[16-18]</sup>、尘埃的尾流效应<sup>[19-22]</sup>及尘埃晶格的特性<sup>[23, 24]</sup>等. 为了较深入了解尘埃粒子在鞘层中的运动及分布特性, 本文针对实验室等离子体发生器中的柱槽状电极采用二维流体模型, 数值模拟了等离子体鞘层及尘埃粒子在鞘层中的分布结构, 并讨论了尘埃粒子数、尘埃的大小以及电极尺寸等对尘埃粒子分布的影响.

## 2. 基本物理模型

### 2.1. 二维鞘层模型

实验所用柱槽状电极的二维鞘层模型如图 1

所示.

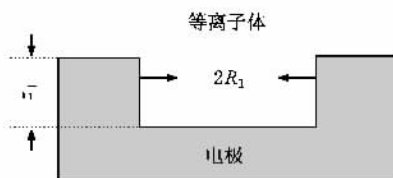


图 1 实验室二维柱槽状电极示意图

数值模拟区域如图 2 所示, 其中  $R = R_2$ ,  $z = z_2$  是模拟空间的边界, 而  $R_1 \leq R \leq R_2$ ,  $0 \leq z \leq z_1$  是电极区.

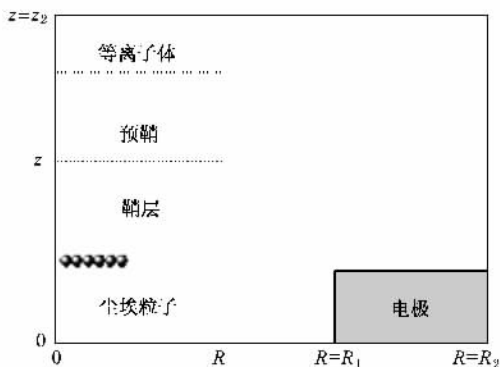


图 2 二维鞘层模拟空间示意图

离子的密度和速度由连续性方程和动量方程描述, 即

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10605008)和辽宁省教育厅科研计划(批准号:2005069)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: jyliu@dlut.edu.cn

$$\nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) = 0, \quad (1)$$

$$(\mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = -\frac{e}{m_i} \nabla \phi - \frac{1}{n_i m_i} \nabla P, \quad (2)$$

$$P = n_i k_B T_i, \quad (3)$$

其中  $m_i$ ,  $e$ ,  $n_i$ ,  $\mathbf{v}_i$ ,  $T_i$ ,  $\phi$ ,  $P$  和  $k_B$  分别是离子质量、电子电荷、离子数密度、离子速度、离子温度、鞘层电势、离子压强和玻尔兹曼常数. 电子密度采用玻尔兹曼分布, 即

$$n_e = n_{e0} \exp\left(\frac{e\phi}{k_B T_e}\right), \quad (4)$$

其中  $T_e$  和  $n_{e0}$  分别是电子温度和鞘边电子密度. 鞘层电势与粒子密度的关系由如下泊松方程给出:

$$\nabla^2 \phi = -4\pi e (n_i - n_e). \quad (5)$$

方程(1)–(5)组成了描述二维鞘层结构的封闭方程组. 为简化方程引入如下无量纲量:

$$\Phi = -\frac{e\phi}{k_B T_e},$$

$$\mathbf{u}_i = \frac{\mathbf{v}_i}{c_{is}},$$

$$N_e = \frac{n_e}{n_{e0}},$$

$$N_i = \frac{n_i}{n_{i0}},$$

$$T_{i0} = \frac{T_i}{T_e}.$$

这里

$$c_{is} = \left(\frac{k_B T_e}{m_i}\right)^{1/2}$$

是离子声速,

$$\lambda_D = \left(\frac{k_B T_e}{4\pi n_{e0} e^2}\right)^{1/2}$$

是电子德拜长度. 方程(1)–(5)变为

$$\nabla \cdot (N_i \mathbf{u}_i) = 0, \quad (6)$$

$$(\mathbf{u}_i \cdot \nabla) \mathbf{u}_i = \nabla \Phi - \frac{1}{N_i} \nabla P, \quad (7)$$

$$N_e = \exp(-\Phi), \quad (8)$$

$$\nabla^2 \Phi = N_i - N_e. \quad (9)$$

数值计算方程(6)–(9)选取的边界条件如下: 上边界  $z = z_2$  在等离子体中性区内, 故有  $u_i = 0$ ,  $\phi = 0$ ,  $n_i = n_e = n_0$ ; 在电极区  $R_1 \leq R \leq R_2$ ,  $0 \leq z \leq z_1$ ,  $\phi = \phi_0$ ,  $\phi_0$  是电极的偏压; 在  $R = R_2$  边界处, 可以认为  $R_2$  足够大,  $\partial/\partial R = 0$ ; 在  $R = 0$  处, 考虑到问题的对称性, 则  $\partial/\partial R = 0$ ,  $u_i = 0$ .

数值计算中, 取下列参数值:  $T_i = 0.10$  eV,  $T_e =$

1.0 eV, 中性气体压强  $P_n = 100$  Pa, 等离子体密度  $N_0 = 2 \times 10^9$  cm $^{-3}$  或  $N_0 = 2 \times 10^8$  cm $^{-3}$ .

## 2.2. 尘埃粒子运动模型

在鞘层中, 尘埃粒子所受的力有静电力、德拜力、尾流力、离子拖拽力、中性气体阻尼力及重力. 第  $j$  个尘埃粒子的受力方程为

$$m_{dj} \frac{d\mathbf{u}_{dj}}{dt} = -Q_{dj} \left[ \nabla \phi + \sum_{k \neq j} (\nabla \phi_k(R_{j,k}) + \nabla \phi_{k, \text{awake}}) \right] + m_i \gamma_{id} \mathbf{u}_i - m_n \gamma_{nd} \mathbf{u}_{dj} + m_{dj} \mathbf{g}. \quad (10)$$

这里  $m_{dj}$ ,  $\mathbf{u}_{dj}$ ,  $Q_{dj}$  和  $\mathbf{g}$  分别是第  $j$  个尘埃粒子的质量、速度、电量和重力加速度;  $\phi$ ,  $\phi_k(R_{j,k})$  和  $\phi_{k, \text{awake}}$  分别是鞘层电势、第  $k$  个尘埃粒子的德拜势和尾流势,

$$\phi_k(R_{j,k}) = \frac{Q_{dk}}{R_{j,k}} \exp\left(-\frac{R_{j,k}}{\lambda_D}\right),$$

其中  $R_{j,k} = |R_j - R_k|$  是第  $j$  个尘埃粒子与第  $k$  个尘埃粒子之间的距离;  $\gamma_{id}$  和  $\gamma_{nd}$  分别是离子及中性粒子对尘埃粒子的碰撞频率,

$$\gamma_{nd} = \frac{50}{\sqrt{m_d}}.$$

### 2.2.1. 尘埃粒子的充电方程

考虑到中性粒子碰撞的影响, 充电方程为修正的轨道运动限制理论方程<sup>[7]</sup>. 充电方程可以表述为

$$Q_d = C_d \phi_f, \quad (11)$$

$$C_d = 4\pi\epsilon_0 r_d \left(1 + \frac{r_d}{\lambda_D}\right), \quad (12)$$

其中  $C_d$ ,  $\phi_f$  和  $r_d$  分别是尘埃粒子的电容、漂浮势和半径. 漂浮势由电子电流和离子电流平衡时得到, 即  $I_e = I_i$ . 电子和离子电流可以分别表示为

$$I_e = \pi r_d^2 e n_e \left(\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{e\phi_f}{k_B T_e}\right), \quad (13)$$

$$I_i = \pi r_d^2 e n_i \left[ \left(\frac{2E_i}{m_i}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{2e\phi_f}{E_i}\right) + \left(\frac{2T_n}{m_i}\right)^{1/2} \frac{r_i^3}{r_d^2 \lambda_{mf}} \right]. \quad (14)$$

(14)式中的第一项  $E_i = k_B T_i + \frac{m_i u_i^2}{2}$  是离子的能量,

第二项  $\pi r_d^2 e n_i \left(\frac{2T_n}{m_i}\right)^{1/2} \left(\frac{r_i^3}{r_d^2 \lambda_{mf}}\right)$  表示由于离子和中性粒子电荷交换碰撞引起的离子电流. 这里  $T_n$  和  $r_i$  分别表示中性粒子温度和离子半径,  $\lambda_{mf}$  表示离子的平均碰撞自由程,

$$\lambda_{\text{mp}} = \frac{V_{\text{th}}}{\gamma_{\text{in}}},$$

式中  $V_{\text{th}}$  和  $\gamma_{\text{in}}$  分别表示离子的平均热速度和中性粒子与离子之间的电荷交换碰撞频率, 表达式分别为

$$V_{\text{th}} = \left( \frac{8k_B T_i}{\pi m_i} \right)^{1/2},$$

$$\gamma_{\text{in}} = u_i N \sigma_{\text{in}}(u_i),$$

其中  $N$  是中性粒子的数密度, 可由气压  $P_n$  求得,  $\sigma_{\text{in}}(u_i)$  是中性粒子与氩离子之间的电荷交换碰撞截面,

$$\sigma_{\text{in}}(u_i) = 47.05 \left( 1 - 0.0557 \ln \left( \frac{m_i u_i^2}{2} \right) \right)^2.$$

### 2.2.2. 离子拖拽力

尘埃粒子受到离子拖拽力的半解析表达式为<sup>[25]</sup>

$$\mathbf{F}_i = m_i \gamma_{\text{id}} \mathbf{u}_i. \quad (15)$$

这里

$$\gamma_{\text{id}} = n_i \sigma_{\text{id}}(u_i) u_i,$$

其中  $\sigma_{\text{id}}(u_i)$  表示离子与尘埃粒子之间的电荷交换碰撞截面,

$$\sigma_{\text{id}}(u_i) = b^2 c_1 \ln \left( 1 + \frac{c_2}{(b/\lambda_D) \tilde{\gamma}} \right),$$

$c_1 = 0.9369$ ,  $c_2 = 61.32$ ,  $b$  是碰撞长度,

$$b = \frac{Q_d e}{4\pi\epsilon_0 E_i}.$$

### 2.2.3. 尘埃粒子的尾流势

鞘层中的离子流会改变尘埃粒子周围的电场, 称为尾流效应. 尾流效应在竖直方向对多层尘埃晶格结构有取向一致的作用. 当

$$\frac{z}{\lambda_D} > 1,$$

$$\left[ \frac{z}{M_i(R + r_d)} \right]^{1/2} \gg 1,$$

$$\frac{r_d}{\lambda_D} \left[ \frac{z}{M_i(R + r_d)} \right]^{1/2} \gg 1,$$

时某个尘埃粒子在其相对位置  $(R, z)$  的尾流势为<sup>[21]</sup>

$$\begin{aligned} \phi_{\text{wake}} = & \frac{\alpha - Q_d/\lambda_D}{(6\pi)^{1/2} \epsilon_0} J_1 \left( r_d \left[ \frac{z}{M_i(R + r_d)} \right]^{1/3} \right) \\ & \times J_0 \left( r_d \left[ \frac{z}{M_i(R + r_d)} \right]^{1/3} \right) \\ & \times \sin \left( \frac{z}{M_i} - \frac{\pi}{4} \right) \frac{\exp(-\gamma_{\text{in}} z / M_i)}{(M_i z)^{1/2} r_d}, \quad (16) \end{aligned}$$

其中  $J$  表示贝塞尔函数,  $M_i = \frac{u_i}{c_{\text{is}}}$  为离子的马赫数.

## 3. 数值结果及讨论

基于上述物理模型, 数值模拟了等离子体二维鞘层特性及尘埃粒子在鞘层中的分布结构.

### 3.1. 鞘层电势分布

图 3 给出了等离子体密度分别为  $N_0 = 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  和  $N_0 = 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ , 电极在径向 ( $R$  方向) 和轴向 ( $z$  方向) 不同取值的鞘层电势的等势线分布图. 从图 3(a)(c)(e)(g) 可见, 当等离子体密度较大时 ( $N_0 = 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ) 鞘层变薄, 场强增大. 由图 3(a)(b) 可见, 当  $R_1$  很小、 $z_1$  较大时, 电极槽内都是鞘层区. 而从图 3(g)(h) 可见, 当  $z_1$  很小、 $R_1$  较大时, 显示的基本上是一维轴向鞘层, 只在柱边存在径向鞘层, 在这种势场分布情况下, 尘埃会形成晶格结构. 对其他的势场分布情况, 由于轴向和径向鞘层耦合在一起, 尘埃会形成复杂而有趣的分布结构.

### 3.2. 等离子体密度对粒子分布结构的影响

模拟中, 选取相同大小的尘埃粒子, 粒子的初始位置随机放置, 鞘层中尘埃粒子在各种力的作用下运动, 最后由于中性粒子的阻尼作用而达到稳定状态.

当  $N_0 = 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  时, 鞘层结构如图 3(e) 所示, 凹槽鞘层底部中心区域的等势面平行于电极底面. 在轴向, 尘埃的重力被电场力平衡, 受相同的轴向鞘层电场力的尘埃粒子就会在同一个平面上. 在径向, 由于尘埃粒子所在的中心区域受鞘层电势的影响相对较小, 尘埃粒子所受的力主要是它们之间的库仑力, 平衡时它们会形成尘埃晶格结构, 如图 4 所示. 当  $N_0 = 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$  时, 鞘层变厚, 如图 3(f) 所示, 鞘层的厚度覆盖整个凹槽电极, 等势面不平行于电极底面, 而是呈凹形, 此时尘埃粒子不能被平衡在一个平面上, 而是形成凹形球冠状分布, 如图 5 所示.

### 3.3. 粒子数对粒子分布结构的影响

图 6(a) 是  $N_0 = 2.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  时的鞘层等势线分布. 鞘层中尘埃粒子数不同, 其分布结构也不同. 如图 6(b) 所示, 当粒子数较少 (80 个) 时, 尘埃粒子分布在一层上. 这是由于粒子大小相同, 所受重力相同且与轴向静电力平衡之故. 当尘埃粒子数增多

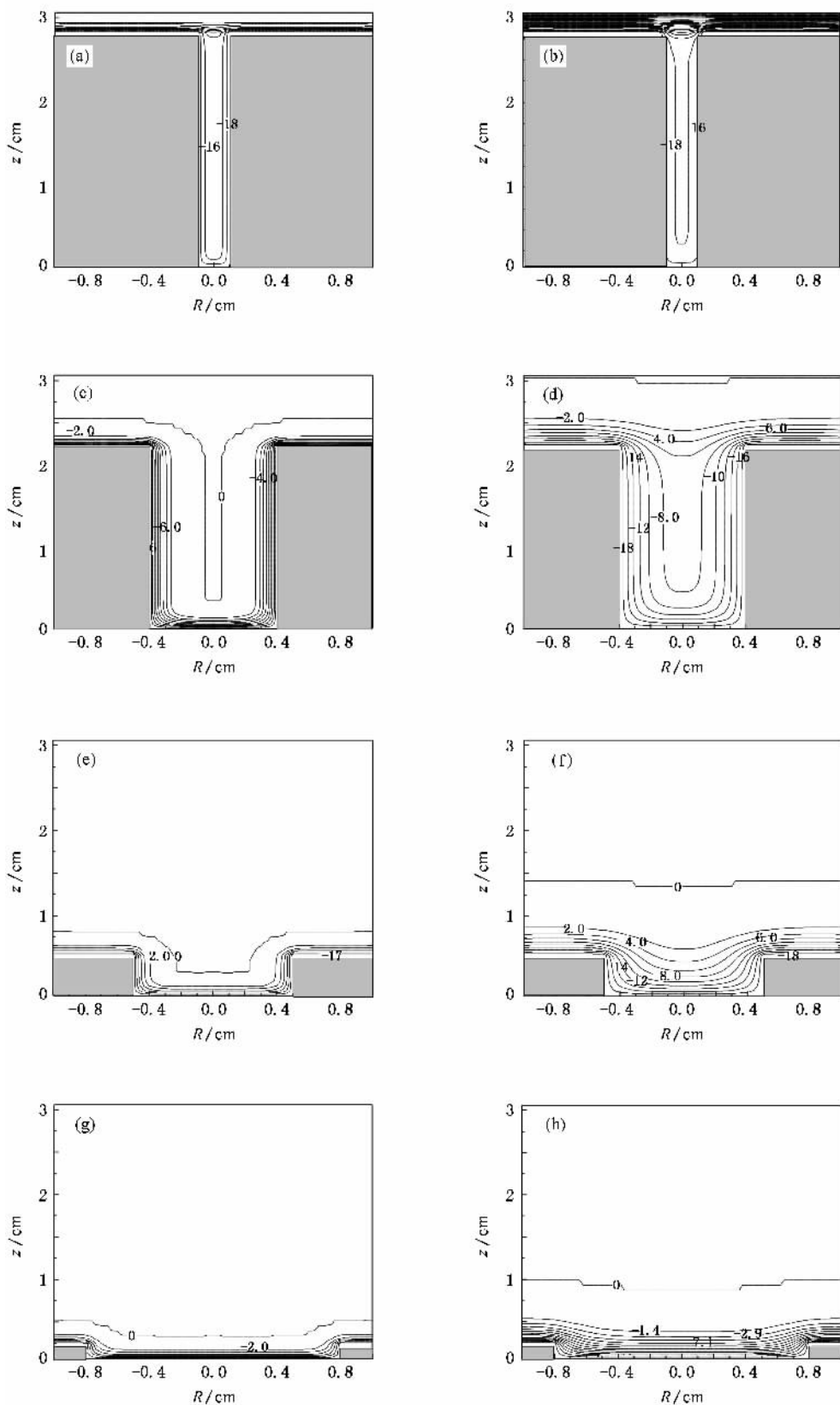


图3 二维鞘层电势的等势线分布图  $T_i = 0.10 \text{ eV}$ ,  $T_e = 2.0 \text{ eV}$ ,  $P_n = 100 \text{ Pa}$ ,  $\phi_0 = -20 \text{ V}$ . (a)(c)(e), (g)  $N_0 = 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$  (b)(d)(f)(h)  $N_0 = 2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$  (a)(b)  $R_1 = 0.1 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 2.8 \text{ cm}$ ; (c)(d)  $R_1 = 0.4 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 2.2 \text{ cm}$ ; (e)(f)  $R_1 = 0.5 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 0.5 \text{ cm}$ ; (g)(h)  $R_1 = 0.8 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 0.2 \text{ cm}$

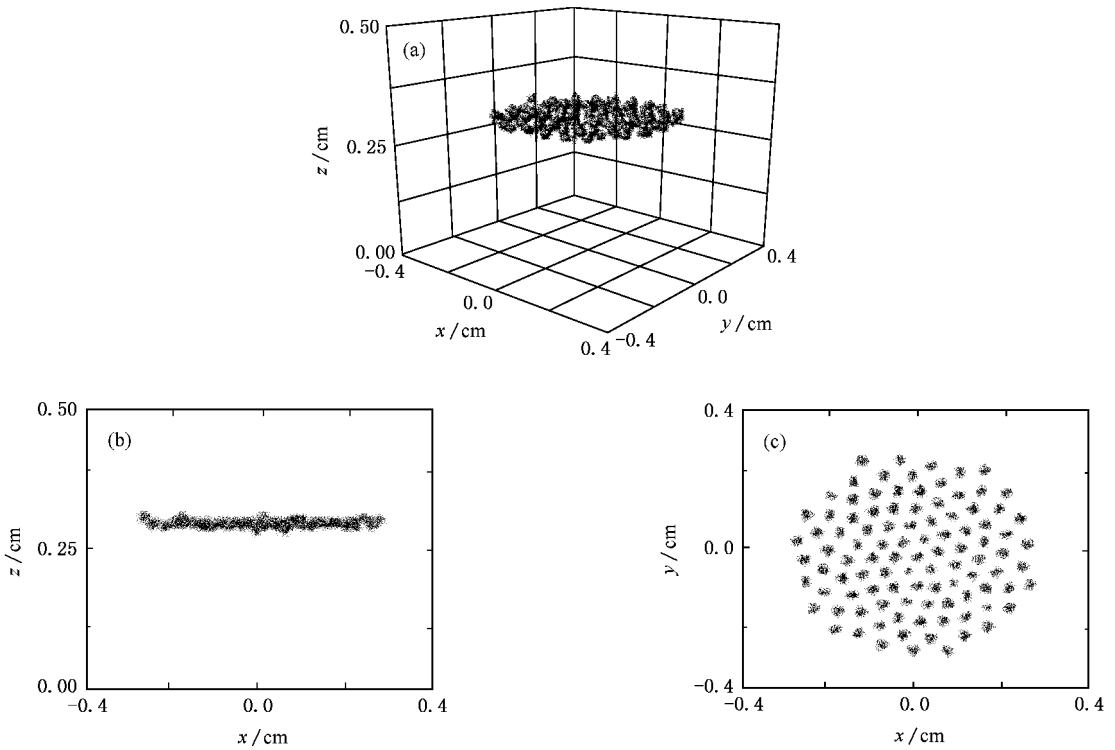


图4 尘埃粒子分布的单层结构  $R_1 = 0.5 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 0.5 \text{ cm}$ ,  $N_0 = 2.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ,  $r_d = 0.15 \mu\text{m}$ ,  $T_i = 0.10 \text{ eV}$ ,  $T_e = 2.0 \text{ eV}$ ,  $P_n = 100 \text{ Pa}$ ,  $\phi_0 = -20 \text{ V}$ . (a)三维图, (b)侧视图, (c)俯视图

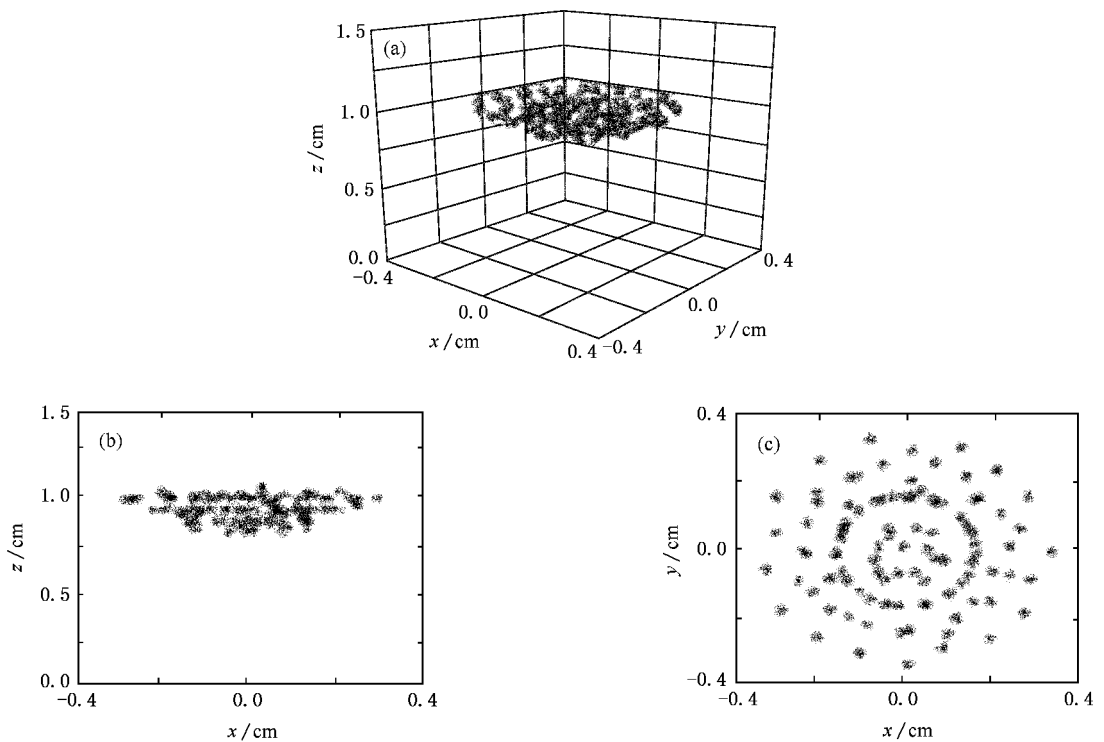


图5 尘埃粒子分布的球冠状结构  $R_1 = 0.5 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 0.5 \text{ cm}$ ,  $N_0 = 2.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $r_d = 0.15 \mu\text{m}$ ,  $T_i = 0.10 \text{ eV}$ ,  $T_e = 2.0 \text{ eV}$ ,  $P_n = 100 \text{ Pa}$ ,  $\phi_0 = -20 \text{ V}$ . (a)三维图, (b)侧视图, (c)俯视图

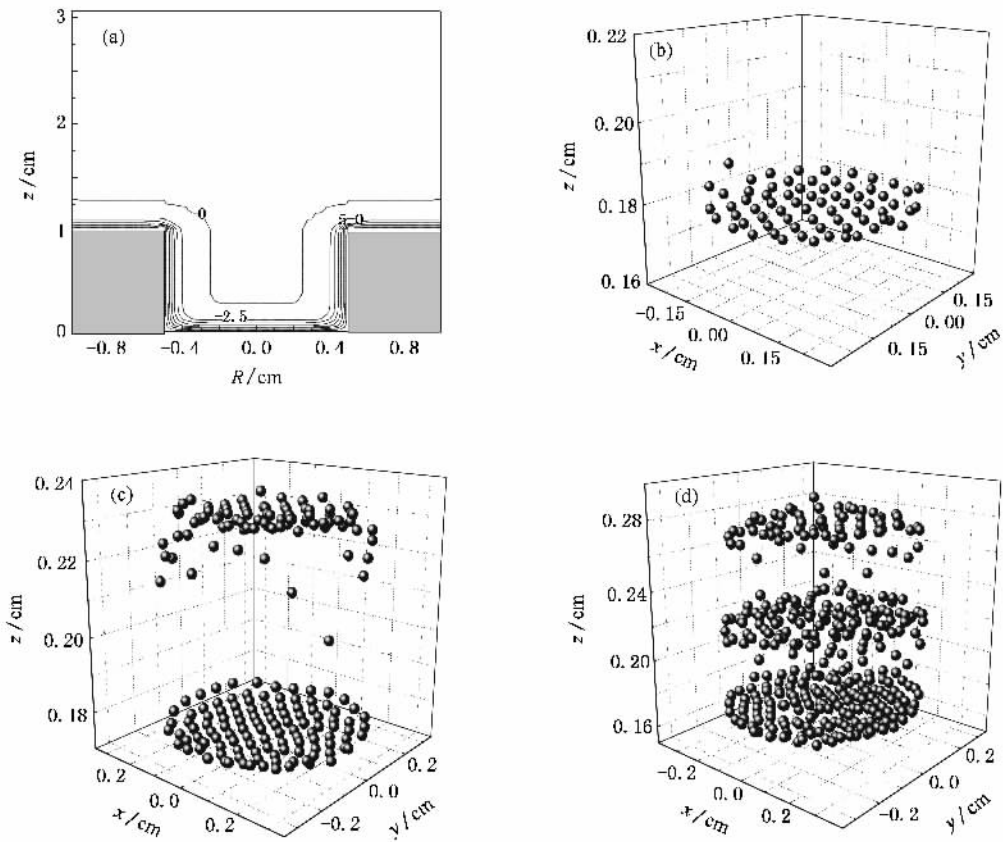


图 6 不同数目尘埃粒子的分布结构  $R_1 = 0.5 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 1.0 \text{ cm}$ ,  $N_0 = 2.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ,  $r_d = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $T_i = 0.10 \text{ eV}$ ,  $T_e = 2.0 \text{ eV}$ ,  $P_n = 100 \text{ Pa}$ ,  $\phi_0 = -20 \text{ V}$ . (a) 电势的等势线分布图, (b) 尘埃粒子数为 80, (c) 尘埃粒子数为 200, (d) 尘埃粒子数为 360

(200, 360 个) 时, 粒子分布为二层和三层, 如图 6 (c) (d) 所示. 这是因为随着粒子数的增多, 同一层粒子之间的库仑力增大, 粒子不再分布为一层. 若粒子分布为两层, 上层粒子受到的轴向鞘层场力与下层粒子施加的库仑力之和等于其受到的重力, 而下层粒子的平衡位置由其重力及上层粒子施加的库仑力、尾流力和轴向鞘层场力共同作用所确定. 若粒子分布为三层, 中层粒子的平衡位置由粒子的重力与轴向鞘层静电力、尾流力及上下两层尘埃的库仑力平衡所决定, 而径向鞘层电场力将尘埃粒子束缚在鞘层的中心区域.

### 3.4. 粒子大小对粒子分布结构的影响

图 7 (b) (c) (d) 显示了在图 7 (a) 所示的鞘层分布结构情况下不同大小的尘埃粒子在鞘层中的分布结构.

图 7 (b) 是半径  $r_d = 0.15 \mu\text{m}$  尘埃粒子的分布结

构. 从图 7 (b) 可以看出, 粒子分布在凹槽鞘层的上部  $z = 1.5 \sim 2.0 \text{ cm}$  范围, 平衡在凹槽鞘层上部场强较弱处, 粒子分布在凹形等势面之上, 大致呈中心圆对称分布, 分布半径为  $1 \text{ cm}$ . 这是由于粒子较轻, 鞘层轴向电场力足以平衡粒子的重力及粒子间的库仑力. 对  $r_d = 2.0 \mu\text{m}$  的尘埃粒子, 由于粒子较重, 就沉入凹槽鞘层深处的强鞘层场处, 分布于  $z = 0.3 \sim 1.2 \text{ cm}$  范围内, 分布半径约为  $0.1 \text{ cm}$ . 尘埃粒子分布呈中空“花瓶”状, 底部粒子受力最大, 瓶颈部的粒子受周边径向鞘层电场力的挤压而向中央轴线聚拢, 上部粒子分布呈凹形等势面形状, 如图 7 (c) 所示. 而图 7 (d) 中的粒子半径  $r_d = 4.0 \mu\text{m}$ , 由于粒子更重, 沉降于鞘层的最底部, 以获得足够的轴向鞘层电场力平衡粒子间的库仑力和重力, 故粒子分布于半径为  $0.2 \text{ cm}$  的范围内, 且分为上下两层, 分别位于  $z = 0.1 \text{ cm}$  和  $z = 0.15 \text{ cm}$  处.

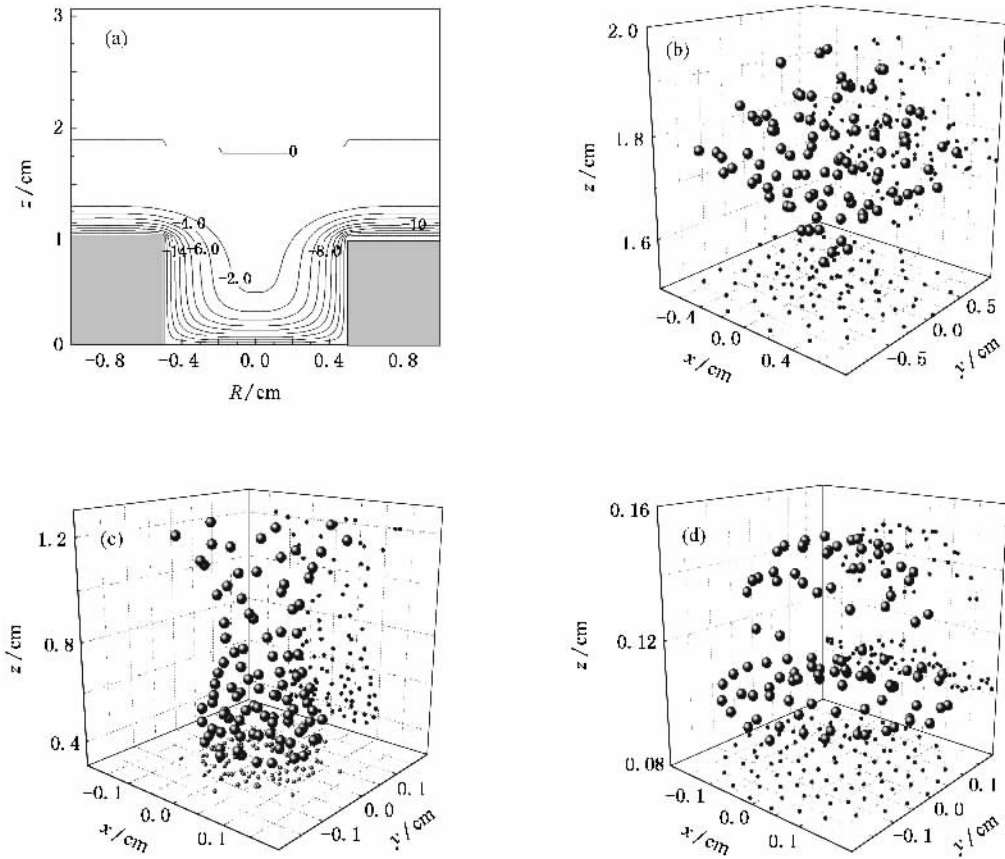


图7 不同大小尘埃粒子(100个)的分布结构  $R_1 = 0.5 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 1.0 \text{ cm}$ ,  $N_0 = 2.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_i = 0.10 \text{ eV}$ ,  $T_e = 2.0 \text{ eV}$ ,  $P_n = 100 \text{ Pa}$ ,  $\phi_0 = -20 \text{ V}$ . (a) 电势的等势线分布图, (b)  $r_d = 0.15 \mu\text{m}$ , (c)  $r_d = 2.0 \mu\text{m}$ , (d)  $r_d = 4.0 \mu\text{m}$

### 3.5. 电极尺寸对粒子分布结构的影响

图8显示了不同电极尺寸鞘层中尘埃粒子的分布结构。

从图8(a)(b)可见,由于柱槽状电极又细又长,故径向鞘层几乎重合在一起,粒子在轴向重力与鞘层电场力及粒子间的库仑力相平衡,在径向由于粒子所处的柱状空间极为狭长,鞘层内粒子径向间隔被压缩,粒子间径向库仑力增大而相互排斥,使粒子离开鞘层中间区域,被排挤至凹槽边缘,呈中空“圆桶”状分布,其分布半径为  $0.025 \text{ cm}$ ,轴向范围  $z = 0.2\text{—}1.6 \text{ cm}$ .这是一种有趣的分布,作者尚未见过这种分布的实验或模拟结果。

由图8(c)(d)可知,随凹槽半径的增加及深度的减少,鞘层内粒子分布的径向范围增大,分布半径为  $0.04 \text{ cm}$ ,轴向范围  $z = 0.7\text{—}1.8 \text{ cm}$ ,仍具有轴向中空特性.由于鞘层径向电场力的作用把粒子挤压在轴线周围的中心区域,成圆桶状集合.这些粒子

受鞘层轴向电场力及下部粒子团库仑力的作用,凹槽鞘层内无法容纳所有粒子,部分粒子被排挤出槽口上方,悬浮于鞘层中凹型等势面区域。

图8(e)(f)显示了随凹槽电极的进一步增大,凹槽鞘层变得又浅又宽,鞘层径向电场的约束力减小,粒子分布的圆桶状区域进一步增大,其分布半径为  $0.1 \text{ cm}$ ,轴向范围  $z = 0.6\text{—}1.5 \text{ cm}$ ,更多的粒子被挤出凹槽,粒子逐渐扩散,跃升至槽口的凹形等势面上,呈凹形分布。

如图8(g)(h)所示,当凹槽电极尺寸增大至  $R_1 = 0.9 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 0.1 \text{ cm}$  时,凹槽电极鞘层变得非常平坦,粒子在相同的轴向鞘层电场力作用下,所有的粒子分布在槽口上方  $z = 0.22 \text{ cm}$  处,分布半径为  $0.6 \text{ cm}$ .此时尘埃的重力被相同的轴向电场力平衡,尘埃粒子分布在同一个平面上.在径向,较小的径向鞘层电场力仅约束外围周边的粒子,而内部尘埃粒子所受的力主要是它们之间的库仑力,平衡时尘埃粒子就形成晶格结构且被束缚在中心区域。

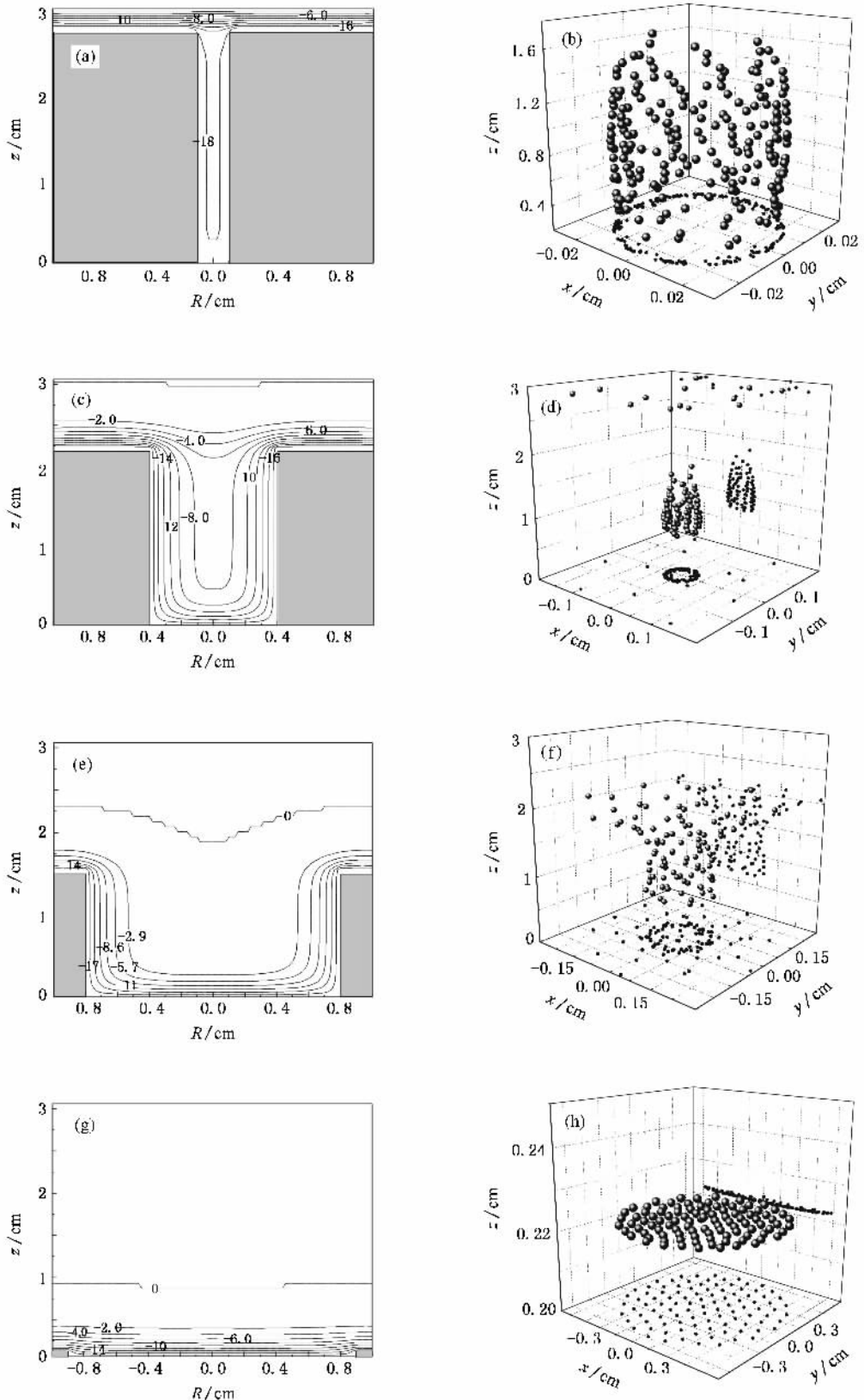


图8 不同电极尺寸鞘层中尘埃粒子(100个)的分布结构  $N_0 = 2.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $r_d = 0.15 \mu\text{m}$ ,  $T_i = 0.10 \text{ eV}$ ,  $T_e = 2.0 \text{ eV}$ ,  $P_n = 100 \text{ Pa}$ ,  $\phi_0 = -20 \text{ V}$ . (a)(c)(e)(g)为电势的等势线分布图 (b)(d)(f)(h)为尘埃粒子的三维分布图 (a)(b)  $R_1 = 0.1 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 2.8 \text{ cm}$ ; (c)(d)  $R_1 = 0.4 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 2.2 \text{ cm}$ ; (e)(f)  $R_1 = 0.8 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 1.5 \text{ cm}$ ; (g)(h)  $R_1 = 0.9 \text{ cm}$ ,  $z_1 = 0.1 \text{ cm}$



### 3.6. 尾流势对尘埃粒子分布结构的影响

为了讨论尾流效应对尘埃粒子分布结构的影响,数值模拟中针对鞘层中粒子分布为两层结构时,有无尾流势的作用进行了比较.

如图 9(a)所示,鞘层中尘埃粒子分布为两层.由图 9(b)可知,在有尾流势作用时,上层的每一个粒子都吸引一个下层相对应的粒子.图 10(a)显示出无尾流效应的尘埃分布.虽然也是两层,但上层的粒子对下层相对应的粒子没有吸引作用,如图 10(b)所示.以上所述表明,在有尾流势作用时,鞘层中分布的上层粒子对相应的下层粒子在轴向分量上有取向一致的吸引作用,而在无尾流势作用时这样的吸引作用不存在.这与 Takahashi 等<sup>[26]</sup>用激光束来操作三维尘埃晶格中指定尘埃粒子时所观察到的实验现象相一致.

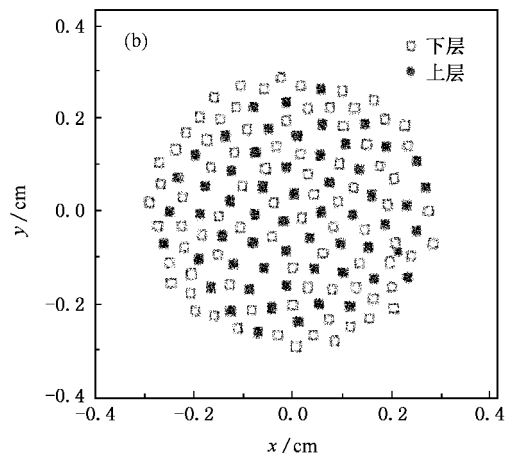
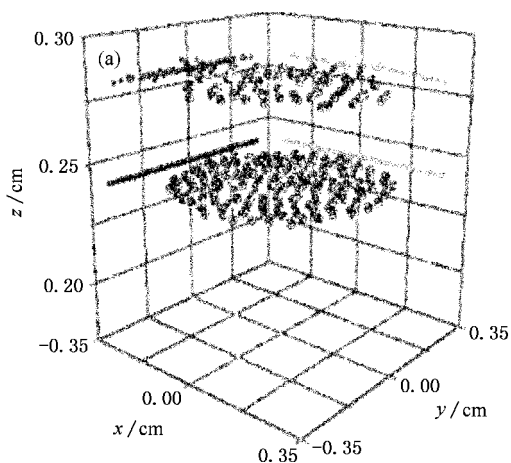


图 9 有尾流势作用时 200 个尘埃粒子的分布结构  $R_1 = 0.5$  cm,  $z_1 = 0.5$  cm,  $N_0 = 2.0 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>,  $r_d = 0.15$   $\mu$ m,  $T_i = 0.10$  eV,  $T_e = 2.0$  eV,  $P_n = 100$  Pa,  $\phi_0 = -20$  V. (a) 三维图, (b) 俯视图

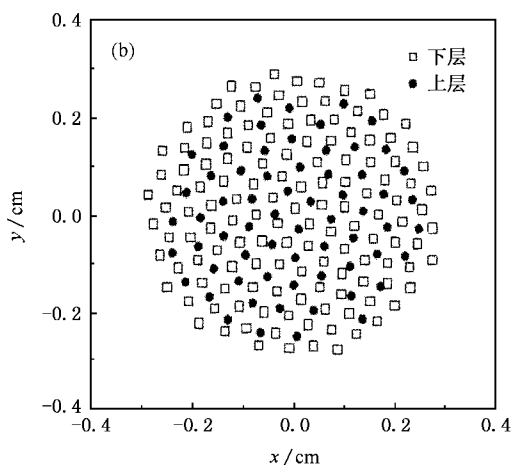
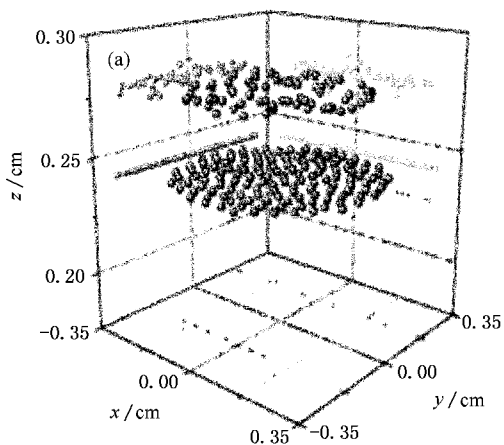


图 10 无尾流势作用时 200 个尘埃粒子的分布结构  $R_1 = 0.5$  cm,  $z_1 = 0.5$  cm,  $N_0 = 2.0 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>,  $r_d = 0.15$   $\mu$ m,  $T_i = 0.10$  eV,  $T_e = 2.0$  eV,  $P_n = 100$  Pa,  $\phi_0 = -20$  V. (a) 三维图, (b) 俯视图

## 4. 结 论

采用柱槽状电极的流体模型,数值模拟了等离子体二维鞘层特性.在此基础上,建立了描述尘埃粒子运动的三维动力学模型,研究了鞘层中尘埃粒子的分布结构.结果表明:电极鞘层形成一个势阱,可以束缚尘埃粒子,较大的粒子会沉入鞘层的底部.当等离子体密度大、鞘层薄时,鞘层电场增强,粒子平衡处的等势面平坦,粒子出现晶格分布.随着粒子数的增多会出现多层分布.当等离子体密度小、鞘层厚时,鞘层电场减弱,等势面是凹形的,粒子可呈球冠状分布.当柱槽状电极变得狭长时,径向鞘层电场力增大,粒子分布的径向范围被压缩,粒子呈中空圆桶状分布.在考虑尾流效应时,发现分布在鞘层中的上层粒子对相应的下层粒子在轴向分量上有取向一致的吸引作用.

- [ 1 ] Chu J H , Lin I 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 4009
- [ 2 ] Thomas H , Morfill G E , Demmel V 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 652
- [ 3 ] Hayashi Y , Tachibana K 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** L804
- [ 4 ] Melzer A , Trottenberg T , Piel A 1994 *Phys. Lett. A* **191** 301
- [ 5 ] Schollmeyer H , Melzer A , Homann A 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2693
- [ 6 ] Ivlev A V , Sutterlin R , Steinberg V 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4060
- [ 7 ] Zafiu C , Melzer A , Piel A 2001 *Phys. Rev. E* **63** 066403
- [ 8 ] Cheung F M H , Samarian A A , James B W 2003 *New J. Phys.* **5** 75
- [ 9 ] Kaw P K , Nishikawa K , Sato N 2002 *Phys. Plasmas* **9** 387
- [ 10 ] Hou L J , Wang Y N , Miskovic Z L 2005 *Phys. Plasmas* **12** 042104
- [ 11 ] Martín L V G , Gurudas G , Glenn J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5278
- [ 12 ] Liu J Y , Ma J X 1997 *Phys. Plasmas* **4** 2798
- [ 13 ] Wang Z X , Wang X G , Liu J Y 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 023302
- [ 14 ] Konopka U , Morfill G E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 891
- [ 15 ] Wang Z X , Wang X G , Liu J Y 2005 *Phys. Lett. A* **339** 96
- [ 16 ] Liu J Y , Wang D Z , Ma T C , Gong Y 1999 *Phys. Plasmas* **6** 1405
- [ 17 ] Liu J Y , Wang Z X , Wang X G 2003 *Phys. Plasmas* **10** 3507
- [ 18 ] Liu D Y , Liu J Y , Wang D Z 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1094 ( in Chinese ) [ 刘德泳、刘金远、王德真 2000 *物理学报* **49** 1094 ]
- [ 19 ] Ishihara O , Vladimirov S V 1996 *Phys. Plasmas* **4** 69
- [ 20 ] Winske D , Daughton W , Lemons D S 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2320
- [ 21 ] Lemons D S , Daughton M W , Winske 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2306
- [ 22 ] Wang Z X , Liu J Y , Liu Y , Wang X G 2005 *Phys. Plasmas* **12** 012104
- [ 23 ] Hebner G A , Riley M E , Greenberg K E 2002 *Phys. Rev. E* **66** 046407
- [ 24 ] Vivek V , Gregory A , Hebner 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 6451
- [ 25 ] Kilgore M D , Daugherty J E , Porteous R K 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 7195
- [ 26 ] Takahashi K , Oishi T , Shimomai K I 1998 *Phys. Rev. E* **58** 7805

## The distribution of dust particles in the plasma sheath \*

Duan Ping<sup>1,2)</sup> Liu Jin-Yuan<sup>1)†</sup> Gong Ye<sup>1)</sup> Zhang Yu<sup>1)</sup> Liu Yue<sup>1)</sup> Wang Xiao-Gang<sup>1)</sup>

1) *State Key Laboratory of Material Modification by Laser , Electron and Ion Beams , Institute of Advanced Science and Technology , School of Physics and Optoelectronic Technology , Dalian University of Technology , Dalian 116024 , China )*

2) *College of Physics Science and Technology , Dalian University , Dalian 116622 , China )*

( Received 14 April 2007 ; revised manuscript received 28 June 2007 )

### Abstract

A fluid sheath model of a cylindrical concave electrode and the distribution of the dust particles in the sheath have been stimulated. Factors , such as the number and the size of the dust particles , and the size of the electrode , which affect the distribution of the dust particles are considered. The result shows that the sheath is thin if the density of the plasma is high ; otherwise , the sheath is thick . And structure of one level is formed if the number of the dust is small , while multilevel structure is formed if the number of the dust is large. With various sizes of the electrode , the dust shows complex and interesting structures .

**Keywords :** dust particles , plasma sheath , electrode

**PACC :** 5225Z , 5240K , 5265

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10605008 ) and the Scientific Research Program of the Educational Bureau of Liaoning Province , China ( Grant No. 2005069 ).

† Corresponding author. E-mail : jyliu@dlut.edu.cn