

轴流式射频 PCVD 沉积质量 分布的动力学分析*

刘大明

华中理工大学物理系;华中理工大学激光国家重点实验室,武汉,430074

刘祖黎

华中理工大学物理系,武汉,430074

姚凯伦¹⁾

华中理工大学物理系,武汉,430074

李再光

华中理工大学激光国家重点实验室,武汉,430074

1990年6月11日收到

在用静电探针诊断了轴流式射频等离子体激活化学汽相沉积(PCVD)反应器中等离子体电子温度、电子密度轴向分布的基础上,提出与主要工艺参数相联系的二元流体动力学模型。以等离子体参量的轴向分布和变化规律为中介量,从动力学的角度分析主要工艺参数影响PCVD沉积质量分布的规律。将模型用于沉积 SnO_2 薄膜的过程,理论计算与实验结果符合较好。

PACC: 6855; 8115H; 8115J

一、引 言

在等离子体激活化学汽相沉积(PCVD)过程中,等离子体作为活化源,其空间分布和变化规律必将通过反应动力学过程影响沉积的最终结果。对扩散控制的轴流式PCVD过程(即沉积主要受扩散控制。此时可略去基片表面等离子体鞘层的影响和表面的吸附、脱附、活化、沉积、蚀刻等过程,设扩散到基片的活性粒子均沉积下来),有关文献运用流体连续性方程,对沉积速率和沉积质量分布等进行了数值计算或解析分析。讨论的主要差别在于对活性粒子产生频率 ν 分布的不同假定(相当于对等离子体分布的假定)。Chen^[1]是假定 ν 在管的轴向均匀,在径向具有某种层流状态的分布。Turban等人^[2]在分析射频放电、电感式电极、沉积SiN薄膜的过程中,假定 ν 在某一区域内均匀(称为等离子体区域,其位置要根据具体的沉积过程,由光学的方法确定),在其余区域为零,讨论了不同

* 国家自然科学基金资助的课题。

1) 中国高等科学技术中心(世界实验室),北京,100080。

Peclet 数 ($Pe = R_0 u / D$, 为衡量对流与扩散权重的一个无量纲常数。其中 R_0 为管的半径, u 为气体流速, D 为扩散系数)时的沉积质量分布。Weling 在分析微波等离子体沉积 SiO_2 光纤的静态质量分布时^[3], 采用了与 Turban 相类似的假定, 讨论了不同 Peclet 数、不同 g 、不同 D 时的结果。并将理论结论用于直流辉光放电 CVD 过程, 分析了静态和轴心阳极轴向运动时动态的沉积质量分布^[4]。

然而, 上述工作由于没有研究管内等离子体的实际分布, 其结论必然是相对近似的; 且等离子体区域的确定没有和主要的工艺参数相联系, 这就难以从理论上预计不同工艺参数时的沉积结果。在 PCVD 过程中, 等离子体参量的分布是较为复杂, 并随放电方式的不同、反应器的布置不同、沉积过程工艺参数的不同而变化的。这种变化自然影响到沉积结果。为此, 本文在用静电探针诊断了轴流式射频 PCVD 反应器中等离子体电子温度、电子密度轴向分布的基础上, 提出 g 的轴向分布与主要工艺参数相联系的二元流体动力学模型。从动力学的角度来分析沉积质量分布的规律及其与主要工艺参数之间的联系。

二、流体动力学模型

在 PCVD 过程中, 必然有一种气体成分过量很多, 如氧化反应中的 O_2 。而另一种成分只占很少的份额。用 C_1 表示少量成分的摩尔浓度, C_2 表示由其产生的活性粒子摩尔浓度。并用 D 表示活性粒子在气体中的扩散系数, u 表示气体的平均流速(团流近似)。

则在不考虑 C_1 分子扩散项时^[3], 流体连续性方程为

$$u \frac{dC_1}{dz} = -gC_1, \quad (1)$$

$$D \nabla^2 C_2 - u \frac{\partial C_2}{\partial z} = -gC_1. \quad (2)$$

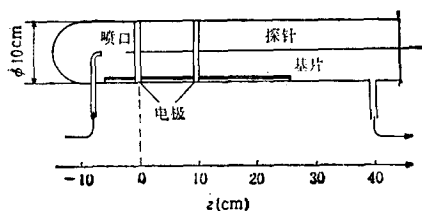


图1 轴流式 PCVD 反应器

为得到活性粒子产生频率 g , 用静电探针法对轴流式射频 PCVD 反应器中 O_2 等离子体进行诊断。详细结果已另文发表^[5], 这里只介绍有关的结论。反应器布置如图1所示, 环状电容式电极, 射频电源功率由输出电流 I 反映, 频率为 40MHz, 单、双探针可轴向移动,

从而诊断出等离子体参量的轴向分布。诊断中 I 和系统真空度 P 为可变参数。

三种不同放电条件下电子温度 T_e 的轴向分布如图2所示, 可见 T_e 在轴向变化不大。结果还表明 T_e 随 I 的增加而略有升高, 随 P 的增加而略有下降。这说明当输出功率加大时, 电子从射频场获得的能量略有增加; 而气体平均自由程减小时, 电子与气体粒子的碰撞概率增大, 其具有的平均能量又略有下降。图3为相同条件下电子密度 n_e 的轴向分布。可见 n_e 在电极区域变化不大, 在电极区域外近似按指数规律下降。当 I, P 增加时, n_e 都有所增大。这可能是因为 I 的增加导致 T_e 的升高和 P 的增加导致平均自由程的减小都使电子与中性粒子之间碰撞概率增加的缘故。诊断还显示出在不同放电条件下, 等离子体发光分布变化很大, 有时甚至电极内外辉度无明显差别, 但 T_e, n_e 的分布仍呈上述趋势。这说明凭观察辉光来判定等离子体区域是不太可靠的。

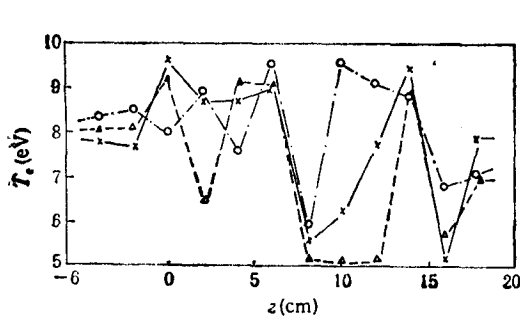


图2 电子温度的轴向分布 $\times$ 为 0.5 Torr, 80 mA, $\bar{T}_e = 7.83$ eV; Δ 为 1 Torr, 80 mA, $\bar{T}_e = 7.29$ eV; $\circ$ 为 1 Torr, 120 mA, $\bar{T}_e = 8.22$ eV

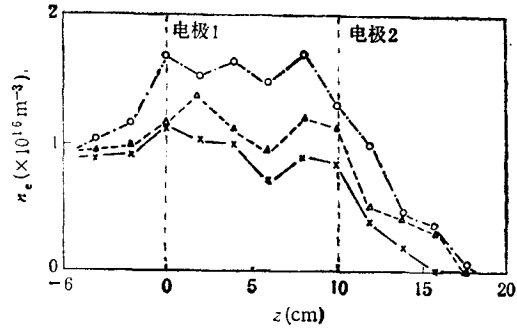


图3 电子密度的轴向分布 $\times$ 为 0.5 Torr, 80 mA; Δ 为 1 Torr, 80 mA; $\circ$ 为 1 Torr, 120 mA

根据诊断得到的结果,假定 T_e , n_e 具有下列分布:

$$T_e \propto I^{\frac{1}{2}} P^{-\frac{1}{10}}, \quad (3)$$

$$n_e \propto \begin{cases} I^{\frac{1}{2}} P^{\frac{1}{4}} e^{bl^{\frac{1}{2}} P z} & z < 0; \\ I^{\frac{1}{2}} P^{\frac{1}{4}} & 0 \leq z \leq l; \\ I^{\frac{1}{2}} P^{\frac{1}{4}} e^{-dP(z-l)} & z > l, \end{cases} \quad (4)$$

式中 l 为两电极间距; b, d 为与具体装置有关的结构常数。

由于 $T_e \gg T_i$, 且等离子体电离度很低, (在沉积条件下, 电离度不大于 10^{-6}) 可以认为中性粒子与高能电子间的非弹性碰撞是产生活性粒子的主要途径。活性粒子产生频率可以写为

$$g = k n_e, \quad (5)$$

式中 $k = \int |\mathbf{v}| \sigma(\mathbf{v}) f_e(\mathbf{v}) d\mathbf{v}$, 这里 $\mathbf{v}$ 为电子相对于中性粒子的相对速度, 可以近似取为电子的热运动速度。对于所考虑的碰撞, 活化截面 σ 近似取为一常数。对于冷等离子体, 可以认为电子处于自身的平衡态, $f_e(\mathbf{v})$ 取麦克斯韦分布, 则可得

$$k = \sigma \sqrt{\frac{8KT_e}{\pi m_e}}. \quad (6)$$

由 (3)–(6) 式, 可以将 g 写为

$$g = \begin{cases} a I^{\frac{3}{2}} P^{\frac{1}{4}} e^{bl^{\frac{1}{2}} P z} & z < 0; \\ a I^{\frac{3}{2}} P^{\frac{1}{4}} & 0 \leq z \leq l; \\ a I^{\frac{3}{2}} P^{\frac{1}{4}} e^{-dP(z-l)} & z > l, \end{cases} \quad (7)$$

式中 a 为与装置布置及所研究的反应均有关的一个常数。

将 (7) 式代入方程 (1), (2), 并令

$$a I^{\frac{3}{2}} P^{\frac{1}{4}} = \alpha, \quad (8)$$

$$b l^{\frac{1}{2}} P = \beta, \quad (9)$$

$$d P = \gamma. \quad (10)$$

则得到所需的二元流体动力学模型。

对 C_1 :

$$u \frac{dC_1}{dz} = \begin{cases} -\alpha e^{\beta z} C_1 & z < 0; \\ -\alpha C_1 & 0 \leq z \leq l; \\ -\alpha e^{-\gamma(z-l)} C_1 & z > l. \end{cases} \quad (11)$$

边界条件为 $C_1(z = -z_0) = C_1^0$, C_1 在 $z = 0$, $z = l$ 处连续。式中 $-z_0$ 为喷口位置, C_1^0 为 C_1 在喷口处的摩尔浓度。

对 C_2 :

$$D \nabla^2 C_2 - u \frac{\partial C_2}{\partial z} = \begin{cases} -\alpha e^{\beta z} C_1 & z < 0; \\ -\alpha C_1 & 0 \leq z \leq l; \\ -\alpha e^{-\gamma(z-l)} C_1 & z > l. \end{cases} \quad (12)$$

边界条件为 $C_2(R = 0, z = -z_0) = 0$, $C_2(R = R_0, z) = 0$, $C_2(R, z \rightarrow \infty) = 0$, $\left(\frac{\partial C_2}{\partial R}\right)_{R=0} = 0$, $C_2(R = 0, z)$ 为有限值; $C_2, \frac{\partial C_2}{\partial z}$ 在 $z = 0, z = l$ 处连续。

由该模型,即可从动力学的角度研究 PCVD 沉积质量分布随主要工艺参数变化的规律。虽然其中的定量关系还略嫌粗糙,但它基本上能反映出诸工艺参数影响动力学过程,进而影响沉积结果的规律。

三、模 型 解

由方程(11)和 C_1 的边界条件,可直接解出

$$C_1 = \begin{cases} C_1^0 \exp \left[\frac{\alpha}{u\beta} (e^{-\beta z_0} - e^{\beta z}) \right] & z < 0; \\ C_1^0 \exp \left[\frac{\alpha}{u\beta} (e^{-\beta z_0} - 1 - \beta z) \right] & 0 \leq z \leq l; \\ C_1^0 \exp \left[\frac{\alpha}{u\beta} \left(e^{-\beta z_0} - 1 - \beta l - \frac{\beta}{\gamma} - \frac{\beta}{\gamma} e^{-\gamma(z-l)} \right) \right] & z > l. \end{cases} \quad (13)$$

将(13)式代入方程(12),并令 $R = R_0 \rho$, 利用 C_2 的边界条件和贝塞耳函数的性质,用常数变易法可得到 C_2 的解。

$$C_2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_i^0 \rho)}{\lambda_i^0 J_1(\lambda_i^0) D} A_i(z) & z < 0; \\ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_i^0 \rho)}{\lambda_i^0 J_1(\lambda_i^0) D} B_i(z) & 0 \leq z \leq l; \\ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_i^0 \rho)}{\lambda_i^0 J_1(\lambda_i^0) D} F_i(z) & z > l, \end{cases} \quad (14)$$

式中 J_0, J_1 为零阶、一阶贝塞耳函数, λ_i^0 为零阶贝塞耳函数的第 i 个零点。

$$\begin{aligned} A_i(z) = & \omega_i \exp \left(\eta_i^+ \frac{z}{R_0} \right) - \left[f_{1i}(-z_0) \exp \left(\eta_i^- \frac{z_0}{R_0} \right) \right. \\ & \left. + \omega_i \exp \left[(\eta_i^- - \eta_i^+) \frac{z_0}{R_0} \right] \right] \exp \left(\eta_i^- \frac{z}{R_0} \right) + f_{1i}(z), \end{aligned} \quad (15)$$

$$B_i(z) = \theta_i \exp\left(\eta_i^+ \frac{z}{R_0}\right) + \left\{f_{1i}(0) - h_{1i}(0) + \left[1 - \exp\left[(\eta_i^- - \eta_i^+) \frac{z_0}{R_0}\right]\right] \omega_i - f_{1i}(-z_0) \exp\left(\eta_i^- \frac{z_0}{R_0}\right) - \theta_i\right\} \exp\left(\eta_i^- \frac{z}{R_0}\right) + h_{1i}(z), \quad (16)$$

$$F_i(z) = \left\{\theta_i \left[\exp\left[(\eta_i^+ - \eta_i^-) \frac{l}{R_0}\right] - 1\right] + f_{1i}(0) - h_{1i}(0) + \omega_i \left[1 - \exp\left[(\eta_i^- - \eta_i^+) \frac{z_0}{R_0}\right]\right] - f_{1i}(-z_0) \exp\left(\eta_i^- \frac{z_0}{R_0}\right) + [h_{1i}(l) - s_{1i}(l)] \exp\left(-\eta_i^- \frac{l}{R_0}\right)\right\} \exp\left(\eta_i^- \frac{z}{R_0}\right) + s_{1i}(z), \quad (17)$$

$$\omega_i = \frac{1}{(\eta_i^+ - \eta_i^-)} \left\{[h_{2i}(0) - f_{2i}(0)] - [h_{1i}(0) - f_{1i}(0)] \eta_i^- - [s_{1i}(l) - h_{1i}(l)] \eta_i^- \exp\left(-\eta_i^- \frac{l}{R_0}\right) + [s_{2i}(l) - h_{2i}(l)] \exp\left(-\eta_i^+ \frac{l}{R_0}\right)\right\}, \quad (18)$$

$$\theta_i = \frac{\exp\left(-\eta_i^- \frac{l}{R_0}\right)}{(\eta_i^+ - \eta_i^-)} \{[h_{1i}(l) - s_{1i}(l)] \eta_i^- + [s_{2i}(l) - h_{2i}(l)]\}, \quad (19)$$

$$\eta_i^\pm = \frac{1}{2} (Pe \pm \sqrt{Pe^2 + 4\lambda_i^2}), \quad (20)$$

$$Pe = \frac{R_0 u}{D}, \quad (21)$$

$$f_{1i}(z) = \frac{2k_1 u}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\alpha}{u\beta}\right)^n \frac{n\beta}{(\eta_i^+ - n\beta R_0)(\eta_i^- - n\beta R_0)} \exp(n\beta z), \quad (22)$$

$$f_{2i}(z) = \frac{2k_1 u}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\alpha}{u\beta}\right)^n \frac{n^2 \beta^2 R_0}{(\eta_i^+ - n\beta R_0)(\eta_i^- - n\beta R_0)} \exp(n\beta z), \quad (23)$$

$$h_{1i}(z) = -\frac{2k_2 u^2}{(\alpha R_0 + \eta_i^+ u)(\alpha R_0 + \eta_i^- u)} \exp\left(-\frac{\alpha}{u} z\right), \quad (24)$$

$$h_{2i}(z) = \frac{2k_2 u \alpha R_0}{(\alpha R_0 + \eta_i^+ u)(\alpha R_0 + \eta_i^- u)} \exp\left(-\frac{\alpha}{u} z\right), \quad (25)$$

$$s_{1i}(z) = -\frac{2k_3 u}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\alpha}{u\gamma}\right)^n \frac{n\gamma}{(\eta_i^+ + n\gamma R_0)(\eta_i^- + n\gamma R_0)} \exp[-n\gamma(z-l)], \quad (26)$$

$$s_{2i}(z) = \frac{2k_3 u}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\alpha}{u\gamma}\right)^n \frac{n^2 \gamma^2 R_0}{(\eta_i^+ + n\gamma R_0)(\eta_i^- + n\gamma R_0)} \exp[-n\gamma(z-l)], \quad (27)$$

$$k_1 = \alpha R_0^2 C_1^0 \exp\left(\frac{\alpha}{u\beta} \exp(-\beta z_0)\right), \quad (28)$$

$$k_2 = k_1 \exp\left(-\frac{\alpha}{u\beta}\right), \quad (29)$$

$$k_3 = k_2 \exp\left[-\frac{\alpha}{u} \left(l + \frac{1}{\gamma}\right)\right]. \quad (30)$$

设沉积时间为 τ , 沉积膜摩尔质量为 M , 则得沉积质量轴向分布为

$$m(z) = -\tau M D \left(\frac{\partial C_1}{\partial R}\right)_{R=R_0}. \quad (31)$$

将(14)式代入(31)式,并利用贝塞耳函数性质 $\left[\frac{\partial J_0(\lambda_i \rho)}{\partial \rho}\right]_{\rho=1} = -\lambda_i J_1(\lambda_i)$, 得

$$m(z) = \begin{cases} \frac{\tau M}{R_0} \sum_{i=1}^{\infty} A_i(z) & z < 0; \\ \frac{\tau M}{R_0} \sum_{i=1}^{\infty} B_i(z) & 0 \leq z \leq l; \\ \frac{\tau M}{R_0} \sum_{i=1}^{\infty} F_i(z) & z > l. \end{cases} \quad (32)$$

四、结果与讨论

将(8),(9),(10)式及(15)–(30)式代入(32)式,即可从动力学的角度讨论 PCVD 主要工艺参数,如放电电流 I , 系统真空度 P , 气体流量 Q , 少量成分气体初始浓度 C_i^0 等影响沉积质量分布(也即沉积速率分布)的规律。其中待定常数 a, b, d 要根据具体的装置布置和化学反应过程,由诊断和沉积实验数据的拟合得到,与工艺参数无关。

由于电离度很低,活性粒子应主要是中性粒子。扩散系数 D 可以仅考虑中性的活性粒子相对于过量气体成分的两体扩散。利用刚球模型^[6],扩散系数为

$$D = 0.35307 \left(\frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1 \mu_2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{r^2} \frac{T^{1.5}}{P} \quad (\text{cm}^2/\text{s}), \quad (33)$$

式中 μ_1, μ_2 为分子量; $r = \frac{1}{2}(r_1 + r_2)$, 以 Å 为单位,对双原子分子, $r_i = 1.2(r_{\text{原子}i}^{\text{共价}} + r_{\text{原子}i}^{\text{非共价}})$, 对三原子分子, $r_i = r_{\text{原子}1}^{\text{共价}} + r_{\text{原子}2}^{\text{共价}} + r_{\text{原子}3}^{\text{共价}}$; P 以 Torr 为单位; T 为系统宏观温度,以 K 为单位。对 O_2 等离子体,在所感兴趣的主要沉积区域——电极区域,测量得出其温度轴向相对差值小于 5%,故以其平均值代入。当 I, P 值在实验调节范围内变动时, T 在 370–430K 范围内变化,也即相对变化小于 15%。

对气体流速,计算得出喷口及反应管内的气流雷诺数均远小于临界值^[2],说明团流近似是合理的。

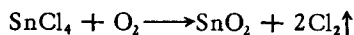
$$u = \frac{TP_0Q}{60\pi R_0^2 T_0 P} \quad (\text{cm/s}). \quad (34)$$

式中 P_0, T_0 为标准状态下的压力、温度值; T, P, P_0, T_0 单位与上述同, R_0 以 cm 为单位。

得到了沉积质量分布 $m(z)$, 还可以计算出气体的反应沉积效率 E_D , 它是衡量 PCVD 实用性的重要指标之一。设气体出口位置为 L , 则 E_D 为

$$E_D = \frac{2}{R_0 u C_i^0 \tau M} \int_{-z_0}^L m(z) dz. \quad (35)$$

作为分析实例,在图 1 所示的装置上沉积 SnO_2 薄膜,装置布置为 $z_0 = 10.0\text{cm}$, $l = 14.0\text{cm}$, $L = 30.0\text{cm}$. 反应方程式为



测试表明沉积物为透明导电 SnO_2 膜^[8]。对该过程,待定系数分别取为: $a = 0.53 \times 10^{-2} \text{mA}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{Torr}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{s}^{-1}$; $b = 0.26 \times 10^{-1} \text{mA}^{-\frac{1}{2}} \cdot \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$; $d = 0.15 \text{Torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。活性粒子考虑为激发态 Sn 原子,也即扩散系数考虑 $D_{\text{Sn} \rightarrow \text{O}_2}$ 。

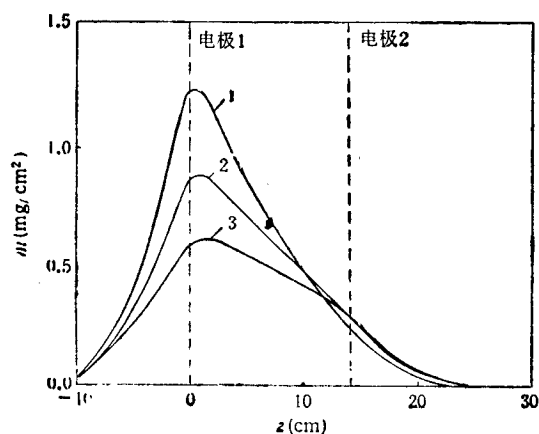


图4 不同输出电流时的沉积质量分布 在标准状态下, 通量 $Q = 25 \text{cm}^3/\text{min}$, $P = 2.1 \text{Torr}$; $C_1^0 = 0.220 \times 10^{-6} \text{mol/cm}^3$; $\tau = 0.108 \times 10^{-6} \text{s}$; 曲线1为 $I = 330 \text{mA}$, $E_D = 0.71$; 曲线2为 $I = 165 \text{mA}$, $E_D = 0.61$; 曲线3为 $I = 82.5 \text{mA}$, $E_D = 0.48$

图4为计算得到的不同放电电流时的沉积质量分布。当 I 增大时,由于射频场提供的能量增加, T_e 升高, n_e 增大,导致活化率的提高。沉积速率和效率也就会提高。图4说明当 I 按等比规律增加时,沉积速率最大值近似以等差规律增大。同时指出其主要变化出现在第一电极附近区域。这是扩散控制假设条件下的结果。如果考虑等离子体对基片的蚀刻作用,当射频功率超过某一阈值时,蚀刻作用就会随着功率的提高而显著增强,沉积速率的增加就是逐渐衰减的,甚至会出现负值。但这已超出假设的范畴。图4还说明当 I 适当减小时,虽然沉积速率和效率均会下降,但电

极及其附近区域膜的均匀性会明显改善,这些结论是与实验结果相符的。

如果仅仅改变系统的真空度(由于 Q 不变,意味着必须改变气体流速,这可通过调节抽气阀做到),则沉积质量分布如图5所示。可见 P 的变化对沉积速率最大值影响不大。但 P 降低时,轴向平均沉积速率会加快,膜的均匀性在整个管中都会改善,只是 E_D 会有所下降。这是由于 P 降低时,一方面等离子体中平均自由程增大,碰撞概率减小,在电极区域活化率下降;在电极区域外,电子复合率下降导致 n_e 增大, n_e 的增大又使得活化率提高,故活性粒子浓度的整个轴向分布会变得较为均匀。另一方面, P 的下降伴随着 u 的提高,而 SnCl_4 的流量随 u 的提高而增大。故平均沉积速率加快,均匀性改善, E_D 下降。这些结论对工艺研究非常有意义。

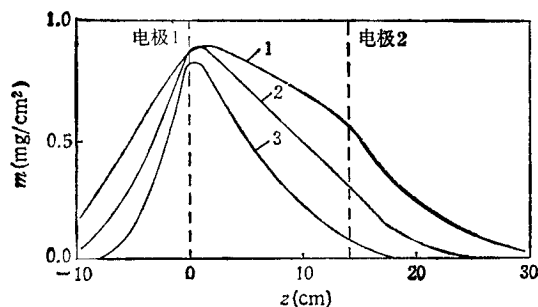


图5 真空度不同时的沉积质量分布 在标准状态下, 通量 $Q = 25 \text{cm}^3/\text{min}$; $C_1^0 = 0.220 \times 10^{-6} \text{mol/cm}^3$; $I = 165 \text{mA}$; $\tau = 0.108 \times 10^{-6} \text{s}$; 曲线1为 $P = 1.0 \text{Torr}$, $E_D = 0.42$; 曲线2为 $P = 2.1 \text{Torr}$, $E_D = 0.61$; 曲线3为 $P = 4.2 \text{Torr}$, $E_D = 0.73$

仅改变 C_1^0 时的三种沉积质量分布如图6所示。可见当 C_1^0 成倍增加时,虽然 E_D 保持不变,沉积速率最大值却基本上成倍增加。这是与实验结果相一致的。当然,沉积速率太快时会影响成膜的结构,如膜的致密性变差,表面电阻增大,甚至在基片上出现粉状沉积物。这些问题必须将表面过程联系起来才能讨论。

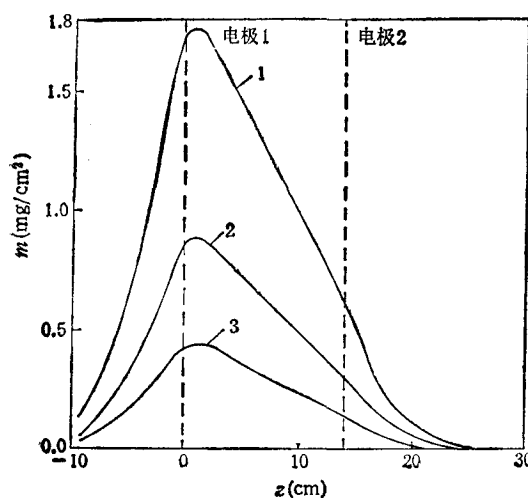


图6 C_i^0 不同时的沉积质量分布 在标准状态下, 通量 $Q = 25 \text{ cm}^3/\text{min}$, $P = 2.1 \text{ Torr}$; $I = 165 \text{ mA}$; $\tau = 0.108 \times 10^3 \text{ s}$; $E_D = 0.61$; 曲线1为 $C_i^0 = 0.441 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^3$; 曲线2为 $C_i^0 = 0.220 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^3$; 曲线3为 $C_i^0 = 0.110 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^3$

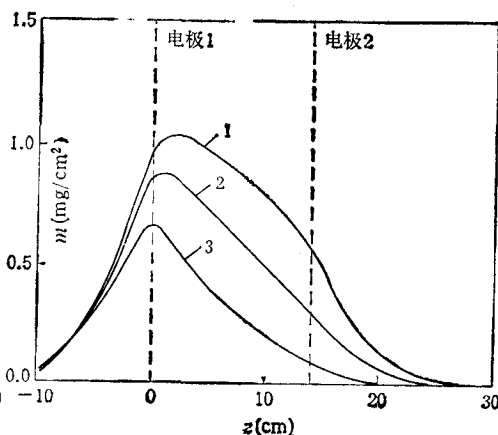


图7 Q 不同时的沉积质量分布 $P = 2.1 \text{ Torr}$; $I = 165 \text{ mA}$; $C_i^0 = 0.220 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^3$; $\tau = 0.108 \times 10^3 \text{ s}$; 曲线1为在标准状态下, 通量 $Q = 50 \text{ cm}^3/\text{min}$, $E_D = 0.41$; 曲线2为在标准状态下, 通量 $Q = 25 \text{ cm}^3/\text{min}$, $E_D = 0.61$; 曲线3为在标准状态下, 通量 $Q = 13 \text{ cm}^3/\text{min}$, $E_D = 0.73$

当 P , C_i^0 均保持不变, 仅改变 Q 时, 则仅 u 发生变化。由于此时 g 的分布不变, Q 的增大只会导致电极区域沉积速率的加快和均匀性的改善, 在电极区域外, 虽然沉积速率也会有所提高, 但均匀性会变得更差。这种情况见图7。

图8为同一实验条件下理论计算与实验结果的比较。沉积质量由沉积前后基片的质量差得出。实验参数见图中所注。理论计算与实验结果符合说明该分析方法的有效性。

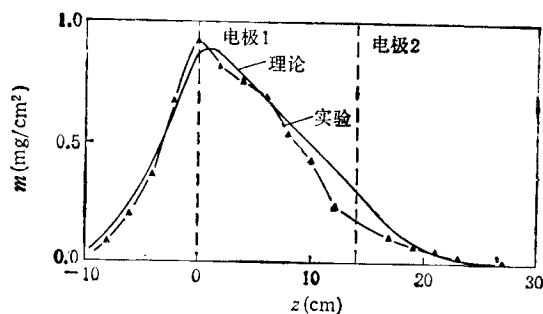


图8 理论与实验的比较 在标准状态下, 通量 $Q = 25 \text{ cm}^3/\text{min}$; $P = 2.1 \text{ Torr}$; $I = 165 \text{ mA}$; $C_i^0 = 0.220 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^3$; $\tau = 0.108 \times 10^3 \text{ s}$; $E_D = 0.61$; $T = 374 \text{ K}$

- [1] I. Chen, *Thin Solid Films*, **41**(1983), 101.
- [2] G. Turban and Y. Catherine, *Thin Solid Films*, **57**(1978), 43.
- [3] F. Weling, *J. Appl. Phys.*, **57**(1985), 4441.
- [4] F. Weling, *Collog. Phys. France*, (C-5) (1989), 73.
- [5] Daming Liu and Zuli Liu, *Vacuum*, **40**(1990), 503.
- [6] F. Weling, ISPC-7, Eindhoven, July, (1985), 165.
- [7] 刘大明, 硕士论文, 华中理工大学, (1987).

- [8] Liujuan Zou, Zuli Liu, Daming Liu *et al.*, Proceedings of The First China-Japan Symposium on Plasma Chemistry, Chengdu, China, April, (1988), p. 226.

A KINETIC ANALYSIS OF THE DEPOSITION MASS DISTRIBUTION IN AN AXIAL-FLOW RF PCVD REACTOR

LIU DA-MING

*Department of Physics, National Laboratory of Laser, Huazhong
University of Science and Technology, Wuhan, 430074*

LIU ZU-LI

YAO KAI-LUN

Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

LI ZAI-GUANG

National Laboratory of Laser, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

(Received 11 June 1990)

ABSTRACT

On the basis of the diagnostics about the axial distribution of plasma electron temperature and electron density in an axial flow RF PCVD reactor by using electrical probe, a model for two-dimension fluid kinetics concerned with major PCVD parameters is proposed. A kinetic analysis about how deposition profiles are influenced by major PCVD parameters is presented by means of the analysis of plasma parameters. The model has been applied to study the deposition process of SnO_2 films obtained from a gases mixture of SnCl_4 and O_2 . The theoretical calculation are in good agreement with the experiments of deposition.

PACC: 6855; 8115H; 8115J