

介质靶表面的充电效应对等离子体浸没离子注入过程中鞘层特性的影响^{*}

李雪春 王友年

(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)

(2003 年 9 月 26 日收到 2003 年 11 月 11 日收到修改稿)

针对等离子体浸没离子注入技术在绝缘体表面制备硅薄膜工艺, 采用一维脉冲鞘层模型描述介质靶表面的充电效应对鞘层厚度、注入剂量及靶表面电位等物理量的影响. 数值模拟结果表明: 随着等离子体密度的增高, 表面的充电效应将导致鞘层厚度变薄、表面电位下降以及注入剂量增加, 而介质的厚度对鞘层特性的影响则相对较小.

关键词: 等离子体浸没离子注入, 脉冲鞘层, 绝缘介质, 充电效应

PACC: 5265, 5240, 5225

1. 引 言

最近几年, 等离子体浸没离子注入(plasma immersion ion implantation, 简称 PIII)技术在材料表面改性和制备新型功能薄膜材料方面得到了广泛的应用, 相应地在理论上也进行了一定的研究^[1-11]. 在 PIII 材料表面改性技术中, 直接将靶浸没在等离子体中, 并在靶上施加负脉冲高电压. 这样靶周围形成一个脉冲鞘层, 该鞘层电场将电子排斥出鞘层区, 而等离子体中的离子则在鞘层电场的作用下朝靶表面作加速运动并注入到靶中, 从而达到材料表面改性的目的. 由于 PIII 技术具有设备结构简单、注入效率高优点, 其应用范围已由最初的金属材料表面改性^[1]扩展到高聚物、半导体等材料的表面改性^[2,3]. 特别是可将这种技术应用于集成电路中使用的微电子材料中, 如绝缘体材料表面的硅层(通常称为 SOI)和硅的埋层^[4,5]. 然而当靶材料为绝缘介质时, 电荷在介质表面的积累将产生充电效应, 因而会改变鞘层的厚度及介质表面的电位. 这样充电效应对材料表面改性的工艺产生很大的影响. 近几年, 一些作者在绝缘介质表面的充电效应对介质表面的影响方面进行了初步的理论分析和实验研究^[6-10], 然而这些研究并没有对等离子体参数对鞘层演化的特

性进行深入的讨论. 本文将利用一维平板鞘层模型, 对介质表面的充电效应进行较深入的研究, 讨论等离子体密度、绝缘介质的厚度对鞘层厚度、介质表面有效电位及介质表面积累电荷量的影响.

2. PIII 鞘层模型

考虑在密度为 n_0 的等离子体中放置一个金属平板, 平板的上面有一厚度为 d 的介质材料. 当在金属电极上施加一负脉冲高压($-V_0(t)$)时, 则在绝缘介质前面形成一瞬时鞘层. 等离子体中的离子在鞘层电场的作用下, 将朝介质表面做加速运动. 由于介质材料的导电性很差, 这样将在介质表面上积累起一层电荷, 如图 1 所示. 在介质表面积累的瞬时电量为^[7]

$$Q(t) = \int_0^t j_i(t') dt', \quad (1)$$

式中 $j_i(t)$ 为入射到介质表面的瞬时离子电流密度. 反过来, 这种积累的正电荷层将产生一个相反的电场, 从而降低介质表面的电位. 考虑到这种电荷积累效应后, 介质表面的瞬时有效电位为

$$V_s(t) = V_0(t) - Q(t)c_0, \quad (2)$$

式中 $c_0 = \epsilon_0 \epsilon_r / d$ 为单位面积的介质电容, ϵ_r 是介质的介电常数.

*教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金资助的课题.

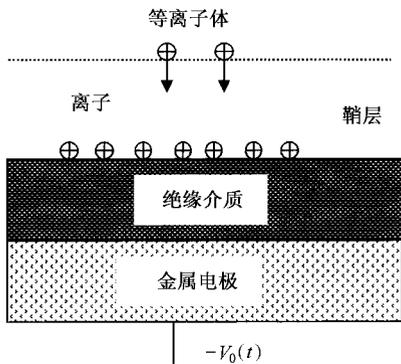


图 1 鞘层示意图

为了计算积累的电荷量 我们建立鞘层随时间演化的动力学模型. 由于鞘层的扩展以及离子以 Bohm 速度穿越鞘层 则进入鞘层边界的离子流密度为^[7]

$$j_i = qn_0 \left(\frac{ds}{dt} + u_B \right), \quad (3)$$

式中 q 为离子的电量, $s(t)$ 为鞘层的瞬时厚度, $u_B = \sqrt{T_e/M}$ 为 Bohm 速度, T_e 是等离子体的电子温度, M 是离子的质量. 另一方面, 假设鞘层的扩展过程是准静态的, 这样入射到介质表面的离子流密度服从 Child-Langmuir 定律,

$$j_i = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2q}{M}} \frac{V_s^{3/2}}{s^2}. \quad (4)$$

忽略鞘层中的碰撞效应 鞘层在扩展时离子流密度应守恒. 这样, 由方程 (3) 和 (4) 可以得到鞘层厚度演化的方程为

$$\frac{ds}{dt} = \frac{4}{9} \frac{\epsilon_0}{n_0 q} \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{V_s^{3/2}}{s^2} - u_B. \quad (5)$$

将方程 (1) (2) 和 (3) 联立, 则介质表面的瞬时电荷积累量 $Q(t)$ 和瞬时电位可以分别用鞘层的瞬时厚度来表示,

$$Q(t) = n_0 q [s(t) - s_0 + u_B t], \quad (6)$$

$$V_s(t) = V_0(t) - \frac{qn_0}{c_0} [s(t) - s_0 + u_B t], \quad (7)$$

式中 $s_0 = \sqrt{2\epsilon_0 V_0(0)/qn_0}$ 为初始鞘层厚度. 这样, 方程 (5)–(7) 构成了一套确定鞘层的瞬时厚度、介质表面电位和电荷积累量的自治非线性方程组.

3. 计算结果及讨论

在以下讨论中, 假设施加在金属电极上的电压为一理想的矩形负脉冲波形, 并取脉冲电压的幅值

为 $V_0 = -40 \text{ kV}$, 脉冲持续时间 $t_p = 30 \mu\text{s}$. 我们以氮等离子体为例, 取 $T_e = 1 \text{ eV}$, 等离子体密度 n_0 是一个可调的输入参数. 对于氮等离子体, 离子的主要成分是 N_2^+ . 另外, 假设金属电极上的绝缘介质为 SiO_2 膜, 其介电常数为 $\epsilon_r = 4$, 介质层的厚度 d 也是一个可调输入参数.

图 2 (a) 和 (b) 分别显示了不同的等离子体密度和介质层厚度对鞘层厚度随时间演化的影响, 其中鞘层厚度以 Debye 长度 $\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{n_0 q}}$ 为单位. 从图 2 (a) 可看出: 当离子密度较小时, 鞘层厚度随时间不断增大, 但扩展的速度逐渐减慢. 当离子密度较大时, 鞘层厚度先随时间迅速增大, 而后却随时间不断减小, 且离子密度越大减小的速度越快. 这是因为当离子密度较小时, 介质表面积累的离子数较少, 介质表面的有效电位变化相对较慢, 即充电效应的影响较小, 而当离子密度较大时, 介质表面积累的离子数增多, 介质表面的有效电位变化相对较快, 以至鞘层的形状发生了改变, 即充电效应的影响较大. 因此选择适当的放电机制以控制离子密度是提高注入效果的有效方法. 从图 2 (b) 可以看出: 当介质层的厚度

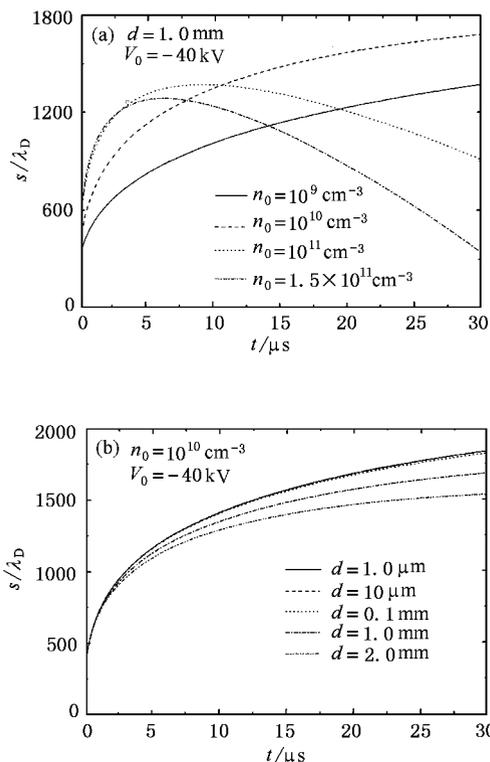


图 2 等离子体密度 (a) 和介质层厚度 (b) 对鞘层的瞬时厚度 $s(t)$ 随时间演化的影响

在 $1\ \mu\text{m}$ — $2\ \text{mm}$ 之间改变时,鞘层的厚度随介质层厚度的增加而减小,当介质层的厚度小于 $0.1\ \text{mm}$ 时,其影响可以忽略.

类似地,我们在图 3(a)和(b)给出了等离子体密度和介质层厚度对表面电位随时间演化的影响.从图 3 可以看出:随着等离子体密度和介质层厚度的增加,表面电位快速下降.这种由充电效应引起的表面电位下降将严重影响离子在介质中的深度.

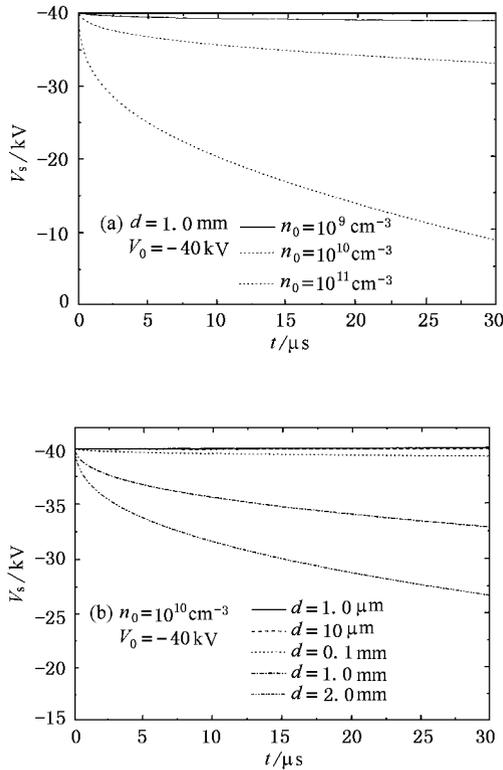


图 3 等离子体密度(a)和介质层厚度(b)对表面电位 $V_s(t)$ 随时间演化的影响

最后,我们在图 4(a)和(b)给出了等离子体密度和介质层厚度对每个脉冲中离子的注入剂量 $\Phi_s(t) = \frac{1}{q} \int_0^t j_i(t') dt'$ 的影响.从图 4(a)可以看出,尽管由于充电效应造成离子注入速度(或能量)的下降,但当等离子体密度增加时,注入剂量仍随着增

加.然而由图 4(b)可以看出,当等离子体密度 n_0 一定时,离子的注入剂量却随着介质层厚度增加而略微有所下降.

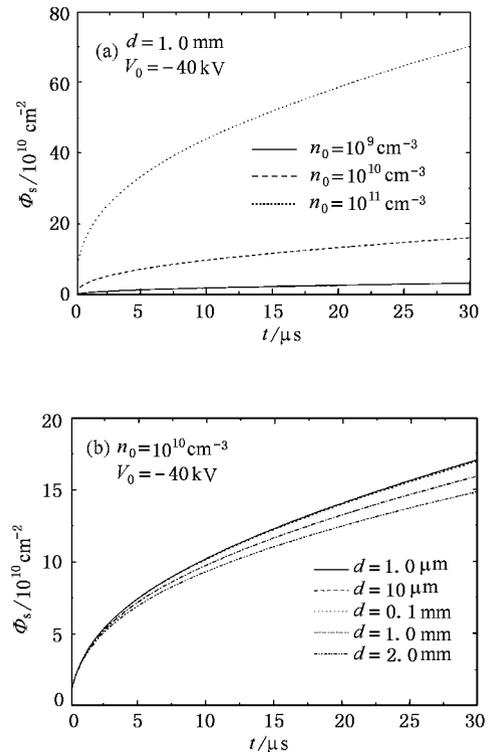


图 4 等离子体密度(a)和介质层厚度(b)对离子注入剂量 $\Phi_s(t)$ 随时间演化的影响

4. 结 论

本文利用动力学鞘层模型对一维平面介质靶的等离子体鞘层的特性进行了数值模拟,得到了鞘层厚度、介质表面的有效电位及离子注入到介质表面的剂量随时间的演化曲线.结果表明在 PIII 过程中,等离子体密度对充电效应的影响很大,而介质厚度的影响则较小.需要指出的是,本文忽略了二次电子发射效应对鞘层演化的影响,进一步的研究需要考虑这种效应.

[1] Conrad J R , Radlike J L , Dodd P A *et al* 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 4591
 [2] Wu Z , Shi Y , Xie H 1995 *Surf. Engin.* **11** 53
 [3] Chu P K , Cheng N W , Chan C 1996 *Semi. Inter.* **6** 165
 [4] Current M I *et al* 2001 *Surf. Coat. Technol.* **136** 138

[5] Wang X *et al* 2001 *Current Appl. Phys.* **1** 225
 [6] Emmert G A 1994 *J. Vac. Sci. Technol. B* **12** 880
 [7] Qin S *et al* 1995 *J. Vac. Sci. Technol. B* **13** 1994
 [8] Tian X *et al* 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **187** 485
 [9] Linder B P , Cheung N W 1996 *IEEE Trans. Plasma Scima.* **24** 1383

- [10] Lacoste A , Coeur F L , Amal Y *et al* 2001 *Surf. Coat. Technol.* **135** 268
- [11] Liu C S *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 109 (in Chinese) [刘成森等 2003 物理学报 **52** 109]

Effects of charging at dielectric surfaces on the characteristics of the sheath for plasma immersion ion implantation^{*}

Li Xue-Chun Wang You-Nian

(*Department of Physics , State Key Laboratory for Modification by Laser , Ion and Electron Beams , Dalian University of Technology , Dalian 116024 , China*)

(Received 26 September 2003 ; revised manuscript received 11 November 2003)

Abstract

Using the one-dimensional dynamic sheath model , the effects of charging at a planar dielectric surface in plasma immersion ion implantation are studied. The temporal evolution of the sheath thickness , the effective potential at the surface of the dielectric and the ion dose accumulated on it are obtained for different plasma densities and dielectric thicknesses. The numerical results demonstrated that due to the charging effects , the plasma density has a profound impact on doping result during plasma immersion ion implantation , but the thickness of the dielectric has no significant effect on it.

Keywords : plasma immersion ion implantation , pulse sheath , dielectric , charging effects

PACC : 5265 , 5240 , 5225

^{*} Project supported by the Trans-Century Training Program Foundation for the Talents from the Ministry of Education of China.