

碰撞参数对磁化电负性等离子体鞘层结构的影响

刘惠平 邹秀 邹滨雁 邱明辉

Effect of collision parameter on magnetized electronegative plasma sheath structure

Liu Hui-Ping Zou Xiu Zou Bin-Yan Qiu Ming-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 245201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.245201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.245201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二次电子分布函数对绝缘壁面稳态鞘层特性的影响

Effect of wall secondary electron distribution function on the characteristics of stable sheath near a dielectric wall

物理学报.2016, 65(3): 035202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.035202>

激波风洞设施中的等离子体包覆目标电磁散射实验研究

Backscattering measurements of plasma coated target in high-enthalpy wind tunnel

物理学报.2015, 64(20): 205205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.205205>

霍尔推进器壁面材料二次电子发射及鞘层特性

Characteristics of wall materials secondary electron emission and sheath in Hall thruster

物理学报.2014, 63(8): 085204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085204>

电子温度对霍尔推进器等离子体鞘层特性的影响

Effect of electron temperature on the characteristics of plasma sheath in Hall thruster

物理学报.2013, 62(20): 205205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205205>

电子温度各向异性对霍尔推力器中等离子体与壁面相互作用的影响

Effect of electron temperature anisotropy on plasma-wall interaction in Hall thruster

物理学报.2012, 61(20): 205202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.205202>

碰撞参数对磁化电负性等离子体鞘层结构的影响*

刘惠平^{1)2)†} 邹秀²⁾ 邹滨雁²⁾ 邱明辉²⁾

1)(大连交通大学材料科学与工程学院, 大连 116028)

2)(大连交通大学理学院, 大连 116028)

(2016年6月8日收到; 2016年8月12日收到修改稿)

数值研究了离子马赫数的取值和碰撞参数对由热电子、热负离子和冷正离子构成的磁化电负性等离子体鞘层结构的影响. 通过理论推导得到了鞘层模型的玻姆判据的表达式, 并得到了不同离子马赫数情况下鞘层的正离子密度分布和净电荷分布曲线, 还进一步得到了几个不同碰撞参数下鞘层的带电粒子密度、净电荷以及电势分布曲线. 结果表明: 离子马赫数取值不同对应不同的鞘层结构; 碰撞使鞘层中正离子密度增加, 使电子密度更快减小到零, 对负离子密度分布影响不明显; 碰撞使净电荷密度的峰值幅度增加并向鞘层边缘移动, 使鞘层中电势值升高并使鞘层厚度减小.

关键词: 鞘层结构, 电负性, 碰撞, 磁场

PACS: 52.40.Kh, 52.25.Xz

DOI: 10.7498/aps.65.245201

1 引言

在等离子体加工业中经常会用到电负性分子(如 SF_6 或 O_2)或者由电负性原子(如O或F)构成的分子放电, 如等离子体刻蚀、化学气相沉积以及反应散射表面涂层等, 在放电过程中会产生大量的负离子, 我们把含有负离子的等离子体称为电负性等离子体, 电负性等离子体鞘层已成为国内外学者们研究的热点之一. 已经有很多工作研究了电负性等离子体鞘层结构: 1992年, Yamada和Yoshida^[1]用塞格捷夫势研究了玻姆系统的结构不稳定的问题; Fernandez-Palop等^[2,3]分别于1995和1996年采用电子和负离子的麦克斯韦分布, 研究了平面探针附近出现的电负性鞘层, 得到了鞘层玻姆判据的表达式, 并得到了鞘层中电场、电势、粒子密度、鞘层厚度、漂浮势的空间分布以及粒子对平面的撞击能量等; 1998年, Amemiya等^[4]研究了由热电子、负离子和从电极发射的二次电子构成的电负性等

离子体鞘层的双层结构, 计算了鞘层边缘的离子能量和电极表面的电场分布, 数值模拟了电势、电场、空间电荷密度和漂浮势; Li等^[5]和Wang等^[6]分别于2000年和2003年采用了包含热电子、热负离子以及冷离子的一维无碰撞等离子体鞘层模型, 电子和负离子均采用玻尔兹曼分布, 研究了鞘层的电负性(等离子体中负离子与电子的密度比)和温度比(电子与负离子的温度比)对鞘层中带电粒子密度、鞘层厚度、玻姆判据和电势等物理量的影响; 2008年, Hatami等^[7]研究了包含电子、负离子和两种正离子的电负性磁鞘模型, 通过数值模拟得到了电势、各种带电粒子在鞘层区域的密度和动能分布情况; 2010年, Gong等^[8]构造了一个强电负性等离子体中平面电极附近形成的鞘层模型, 数值研究了负离子对强电负性等离子体鞘层中的空间电势、净电荷分布和鞘层宽度的影响.

以上的研究都没有考虑鞘层中被加速的正离子和作为背景的中性粒子之间的碰撞问题. 但是在某些情况下, 比如对于高压等离子体, 碰撞问题

* 国家自然科学基金(批准号: 10605008, 51372026)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lhpdjtu.edu.cn

是不可忽略的, 它会引鞘层判据^[9-17]和鞘层结构^[18-21]的明显改变. 其中在2012年, Yasserian和Aslaninejad^[19]采用流体模型研究了碰撞电负性等离子体磁鞘的结构, 研究发现碰撞和磁场都会使鞘层中电荷分布出现一个峰值, 而负离子的出现会引起这个峰的坍塌. 在他们的研究中, 采用的离子马赫数是关于鞘层电负性和负离子温度的函数, 并且只考虑了恒定碰撞频率下正离子垂直入射鞘层的情况. 我们认为, 离子马赫数取值不同本身就会影响鞘层结构, 在讨论其他变量对鞘层结构的影响时, 离子马赫数采用的是包含变量的参数还是取固定的值会产生不同的结果. 如采用是负离子温度的函数的离子马赫数来研究负离子温度对鞘层中净电荷分布的影响, 其结果是负离子温度和离子马赫数共同的影响. 在本文中, 我们首先在理论分析的基础上得到了鞘层玻姆判据的表达式, 然后讨论了离子马赫数的取值问题对鞘层结构的影响, 并讨论了在离子马赫数取固定值时碰撞参数对磁化电负性等离子体鞘层结构的影响. 得到的结果对理论和实验都有一定的价值.

2 鞘层模型和基本方程

碰撞的磁化电负性等离子体鞘层模型如图1所示, 我们假设鞘层为平板鞘层, 恒定的外加磁场位于 $x-z$ 平面内并与 x 方向成 θ 角. 假设鞘层中包含三种带电粒子: 热的电子和负离子(温度分别为 T_e 和 T_- , 带电量均为 $-e$), 冷的正离子(带电量为 e).

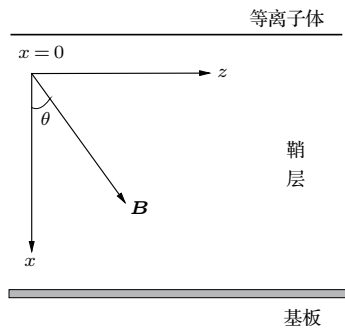


图1 碰撞的磁化电负性等离子体鞘层模型示意图

Fig. 1. Geometry of the collisional magnetized electronegative plasma sheath model.

电子密度和负离子密度均满足玻尔兹曼分布^[9-21]:

$$n_e = n_{e0} \exp\left(\frac{e\phi}{T_e}\right), \quad (1)$$

$$n_- = n_{-0} \exp\left(\frac{e\phi}{T_-}\right), \quad (2)$$

式中 n_{e0} 和 n_e 分别为鞘层边缘和鞘层区域电子的数密度, n_{-0} 和 n_- 分别为鞘层边缘和鞘层区域负离子的数密度, ϕ 为鞘层区域的电势. 冷的正离子的运动满足流体的连续性方程和运动方程:

$$\nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) = 0, \quad (3)$$

$$m_i (\mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = -e \nabla \phi + \frac{e \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}}{c} - m_i (n_n \tau v_i) \mathbf{v}_i, \quad (4)$$

式中的 n_i , m_i 和 \mathbf{v}_i 分别是离子的数密度、质量和速度; n_n 是中性气体密度; $\nu_{in} = n_n \tau v_i$ 为传递动量的正离子和中性粒子碰撞频率; $\tau = \tau_s (v_i/c_{is})^\rho$ 是动量传递截面($c_{is} = (T_e/m_i)^{1/2}$ 是正离子声速; τ_s 为以正离子声速测量的横截面; ρ 是无量纲化的参数, 取值范围为 $-1-0$, 其中 $\rho = 0$ 对应恒定的平均自由程, $\rho = -1$ 对应恒定的碰撞频率).

我们采用一维空间和三维速度坐标系^[6-21], 鞘层中的带电粒子密度与电势之间通过泊松方程联系起来:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{e(n_i - n_e - n_-)}{\epsilon_0}. \quad (5)$$

令 $\alpha = n_{-0}/n_{i0}$ 表示鞘层边缘负离子与正离子密度比, 且引入下列无量纲化参数来简化方程: $\eta = -e\phi/T_e$, $\xi = x/\lambda_D$, $\mathbf{u}_i = \mathbf{v}_i/c_{is}$, $N_e = n_e/n_{e0}$, $N_i = n_i/n_{i0}$, $N_- = n_-/n_{-0}$ 和 $\nu = \lambda_D n_n \tau_s$. 这里 $\lambda_D = [T_e/(4\pi n_{e0} e^2)]^{1/2}$ 是电子德拜长度, $\omega_{ic} = eB/m_i c$ 是正离子回旋频率, $\sigma = T_e/T_-$ 是电子与负离子的温度比, ν 是净碰撞参数.

令 $\hat{B}_0 = \hat{x} \cos \theta + \hat{z} \sin \theta$, 并利用鞘边准中性条件: $x = 0$ 时, $n_{i0} = n_{e0} + n_{-0}$, 由方程(1)–(5)可得

$$N_e = \exp(-\eta), \quad (6)$$

$$N_- = \exp(-\sigma\eta), \quad (7)$$

$$N_i = \frac{M_i}{u_{ix}}, \quad (8)$$

$$u_{ix} \frac{\partial u_{ix}}{\partial \xi} = \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \gamma_i \delta_i^{1/2} u_{iy} \sin \theta - \nu u_{ix}^{2+\rho}, \quad (9)$$

$$u_{ix} \frac{\partial u_{iy}}{\partial \xi} = \gamma_i \delta_i^{1/2} (u_{iz} \cos \theta - u_{ix} \sin \theta) - \nu u_{iy}^{2+\rho}, \quad (10)$$

$$u_{ix} \frac{\partial u_{iz}}{\partial \xi} = -\gamma_i \delta_i^{1/2} u_{iy} \cos \theta - \nu u_{iz}^{2+\rho}, \quad (11)$$

$$\frac{d^2 \eta}{d\xi^2} = \delta_i N_i - N_e - \delta_- N_-, \quad (12)$$

式中 $M_i = v_{ix0}/c_{is}$ 是离子马赫数; γ_i 是正离子回旋频率与正离子等离子体频率 $\omega_{pi} = (4\pi n_{i0} e^2/m_i)^{1/2}$ 之比, 即 $\gamma_i = \omega_{ic}/\omega_{pi}$; $\delta_i = n_{i0}/n_{e0}$; $\delta_- = n_{-0}/n_{e0}$.

利用边界条件鞘层边缘 $x = 0$ 时, $\eta \rightarrow 0$, $N_i \rightarrow 1$, $\partial \eta / \partial \xi = E_0 \neq 0$, $(\partial u_{ix} / \partial \xi)_{x=0} \geq 0$ 和 $(\partial \eta / \partial \xi)_{x=0} = E_0 > 0$, 由方程 (6)–(12) 以及文献 [15], 可以得到碰撞的电负性等离子体磁鞘的玻姆判据

$$\left(\frac{E_0 + \gamma_i \delta_i^{1/2} u_{iy0} \sin \theta}{\nu + \Delta E_0} \right)^{1/2} \leq M_i \leq \left(\frac{E_0 + \gamma_i \delta_i^{1/2} u_{iy0} \sin \theta}{\nu} \right)^{1/2} \quad (\rho = 0), \quad (13)$$

$$\left[\left(\frac{1}{\Delta} + \frac{\nu^2}{4\Delta^2 E_0^2} + \frac{\gamma_i \delta_i^{1/2} u_{iy0} \sin \theta}{\Delta E_0} \right)^{1/2} - \frac{\nu}{2\Delta E_0} \right] \leq M_i \leq \frac{E_0 + \gamma_i \delta_i^{1/2} u_{iy0} \sin \theta}{\nu} \quad (\rho = -1), \quad (14)$$

式中 $\Delta = (1 + \delta_- \sigma) / \delta_i$.

3 数值结果与讨论

(13) 和 (14) 式即为碰撞的磁化电负性等离子体鞘层的玻姆判据. 因为我们在相关工作中 [15] 已经详细讨论了碰撞的磁化电负性等离子体鞘层的玻姆判据, 所以本文不再赘述. 在这里重点讨论离子马赫数 M_i 的取值对鞘层结构的影响. 为讨论方便, 我们考虑无碰撞情况下正离子垂直进入磁鞘. 图 2 为离子马赫数取不同值但都满足鞘层判据时的正离子密度分布曲线, 将 $M_i = 1.1$ 和 $M_i = 0.9$ 的曲线分别与 $M_i = 1.0$ 的曲线进行比较, 可以看出, $M_i = 1.1$ 的曲线一开始比 $M_i = 1.0$ 的曲线高, 但是很快变低, 而 $M_i = 0.9$ 的曲线正好相反. 这说明, 虽然同是满足鞘层判据的取值, 但是离子马赫数的取值不同会影响鞘层结构.

图 3 为鞘层中净电荷分布图像, 可以说明离子马赫数取变量和取固定值时对鞘层结构的影响. 图 3(a) 中三条曲线的离子马赫数取满足各组参数情况下玻姆判据的相同值 $M_i = 1.0$, 即三条曲线正离子进入鞘层时 x 方向速度相同. 从图 3(a) 可以

看出, 随着负离子浓度增加 (α 增大) 或者负离子温度降低 (σ 增大), 鞘层中净电荷峰值均向鞘边靠近, 且随着负离子浓度增加, 净电荷峰值明显增大, 这个结论与文献 [6] 中不考虑磁场影响时完全一致. 图 3(b) 的离子马赫数按照文献 [19] 的取法, 取 $M_i = 1/\sqrt{1 - \alpha + \alpha\sigma}$ 是满足玻姆判据的, 但是

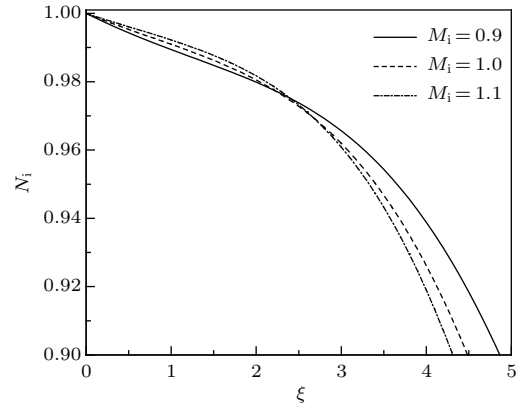


图 2 鞘层正离子密度分布曲线 ($\nu = 0$, $\alpha = 0.05$, $\sigma = 5$, $\theta = 30^\circ$, $B = 0.2$ T, $E_0 = 0.01$)

Fig. 2. Positive ion density curves of the sheath ($\nu = 0$, $\alpha = 0.05$, $\sigma = 5$, $\theta = 30^\circ$, $B = 0.2$ T, $E_0 = 0.01$).

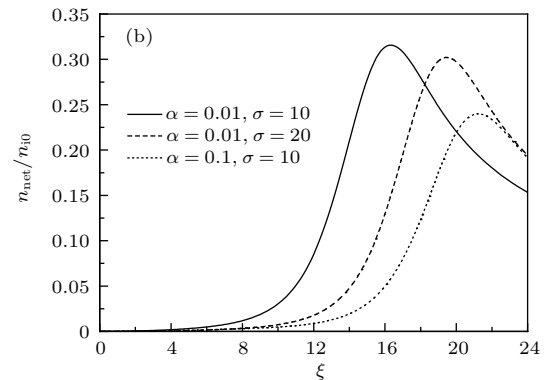
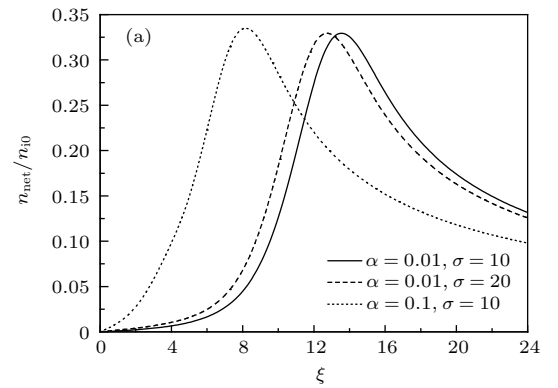


图 3 鞘层净电荷分布曲线 ($\nu = 0$, $\theta = 20^\circ$, $B = 0.05$ T, $E_0 = 0.01$) (a) $M_i = 1.0$; (b) $M_i = 1/\sqrt{1 - \alpha + \alpha\sigma}$

Fig. 3. The net charge distribution curves of the sheath ($\nu = 0$, $\theta = 20^\circ$, $B = 0.05$ T, $E_0 = 0.01$): (a) $M_i = 1.0$; (b) $M_i = 1/\sqrt{1 - \alpha + \alpha\sigma}$.

三条曲线因为 α 和 σ 的取值不完全相同,所以离子马赫数不同,即离子进入鞘层的 x 方向速度不同.从图3(b)可以看出,随着负离子浓度增加(α 增大)或者负离子温度降低(σ 增大),鞘层中净电荷峰值减小且远离鞘边,这个结论与文献[19]中得到的结论“负离子会引起鞘层中净电荷峰值的坍塌”一致,但与从图3(a)得到的结论完全相反.在研究参数对鞘层结构的影响时,离子马赫数取为包含该参数的变量和取固定的值,会得到不同的结果,是因为一个参数的变化造成鞘层结构的实际变化可以分解为两部分内容,一是该参数的变化直接造成鞘层结构的改变,二是该参数的变化造成玻姆判据的改变而引起鞘层结构的改变[15,22].因此若研究参数的改变直接造成鞘层结构的变化,离子马赫数应取为固定的值.

在下面的数值研究中,我们取离子马赫数为满足各组参数情况下玻姆判据的值 $M_i = 0.85$,离子等离子体密度 $n_{i0} = 5.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$,电子温度 $T_e = 3.48 \times 10^4 \text{ K}$,无量纲化参数 $\rho = 0$,磁场强度和角度分别为 $B = 0.2 \text{ T}$ 和 $\theta = 30^\circ$,负离子浓度和温度分别为 $\alpha = 0.25$ 和 $\sigma = 25$,并假设正离子进入鞘层时不仅有 x 方向的速度 $u_{ix0} = 0.85$,还有 y 方向的速度 $u_{iy0} = -E_0 \sin \theta / \gamma_i$, z 方向速度为 $u_{iz0} = u_{ix0} \tan \theta$ [17,23].图4—图6分别为碰撞参数 $\nu = 0, 0.2$ 和 0.4 [12,18,19]时鞘层中带电粒子的密度分布、净电荷分布、电势分布图像.

从图4可以看出:与鞘层中不考虑碰撞相比,碰撞使正离子密度下降变慢,且随着碰撞参数增加,正离子密度下降得更慢;与鞘层中不考虑碰撞相比,碰撞使电子密度很快减小到零,且随着碰撞参数增加,电子密度更快减小到零;与没有碰撞相比,碰撞没有使负离子密度有明显的变化,但是其密度与电子密度相比,在鞘层边缘就以很快的速度下降到零.鞘层中因为没有电子与中性粒子间的电离碰撞,所以鞘层中正离子流守恒.在方程(9)中,碰撞项为负值,对于在鞘层中运动的正离子而言是一种拖拽力,所以存在碰撞或者碰撞参数的增加都会使正离子 x 方向运动的速度减小,正离子 x 方向速度减小会导致正离子密度积累,所以其密度下降变得缓慢.我们仅仅考虑了正离子与中性粒子间的碰撞,而碰撞会影响到电子的密度分布是因为与不考虑碰撞相比,碰撞使鞘层中正离子密度增加,正离子密度增加会导致鞘层中净电荷密度增加(如

图5所示),碰撞使鞘层中净电荷密度峰值增大变宽且向鞘层边缘移动,结论与文献[19]中正离子垂直进入鞘层且不考虑负离子和磁场时的结论一致.鞘层中净电荷密度增加,又会使电势 η 增加(如图6所示)及电场值增大.由方程(6)可知电子密度是电势 η 的指数衰减,电势 η 增加会加快其密度下降,所以正离子与中性粒子间的碰撞使电子密度更快地下降到零.由方程(7)可知,虽然负离子密度也是以电势 η 的指数衰减,但是因为其指数上 η 还要乘上倍率 σ ,所以其密度会比电子以更快的速度在鞘层边缘下降到零,以至于碰撞参数的影响没有体现出来.电势 η 增加引起的电场值增大,又会使正离子受到的电场力增大而加速正离子,使其速度增加,

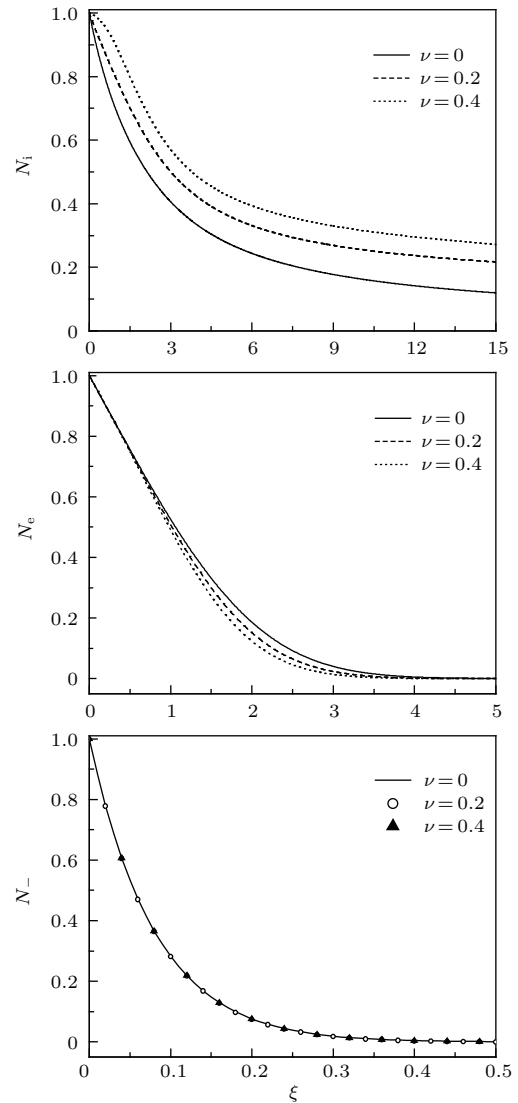


图4 碰撞参数对鞘层带电粒子密度分布的影响
Fig. 4. The effect of collision parameter on normalized density distribution of each plasma species.

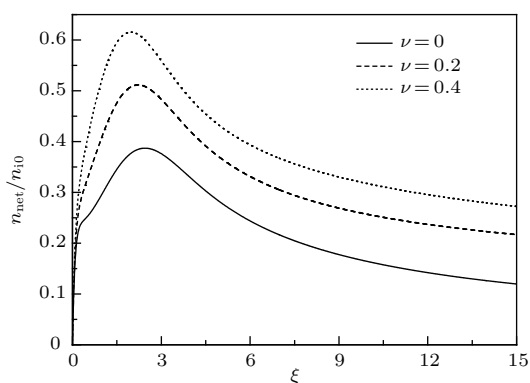


图5 碰撞参数对鞘层净电荷分布的影响
Fig. 5. The effect of collision parameter on net space charge distribution of the sheath.

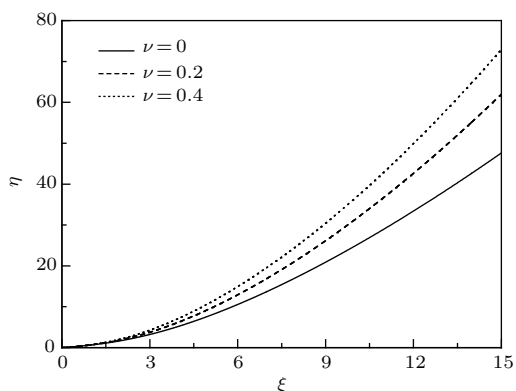


图6 碰撞参数对鞘层静电势分布的影响
Fig. 6. The effect of collision parameter on the spatial potential distribution of the sheath.

密度下降, 净电荷的密度分布在出现了峰值之后又会下降。从图6还可以看出, 随着碰撞参数增加, 鞘层厚度减小。

4 结 论

本文建立了一个碰撞的磁化电负性鞘层结构模型, 采用数值模拟的方法讨论了离子马赫数和碰撞参数对鞘层结构的影响。研究结果表明: 1) 离子马赫数的取值不同, 对应不同的鞘层结构, 因此在研究其他参数对鞘层结构的影响时, 离子马赫数取包含该参数的变量还是取固定的值, 会得到不同的结果; 2) 碰撞参数通过影响正离子密度分布而影响鞘层结构; 碰撞使鞘层中正离子密度分布增加, 使鞘层中电子密度更快下降到零, 而对负离子密度分

布影响不明显; 碰撞使鞘层中净电荷密度和电势分布增加, 并使鞘层厚度减小。

参考文献

- [1] Yamada H, Yoshida Z 1992 *J. Plasma Phys.* **48** 229
- [2] Fernandez-Palop J I, Ballesteros J, Colomer V, Hernandez M A, Dengra A 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 2937
- [3] Fernandez-Palop J I, Colomer V, Ballesteros J, Hernandez M A, Dengra A 1996 *Surf. Coat. Technol.* **84** 341
- [4] Amemiya H, Annaratone B M, Allen J E 1998 *J. Plasma Phys.* **60** 81
- [5] Li M, Michael A V, Steven K D, Michael J B 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 248
- [6] Wang Z X, Liu J Y, Zou X, Liu Y, Wang X G 2003 *Chin. Phys. Lett.* **20** 1537
- [7] Hatami M M, Shokri B, Niknam A R 2008 *Phys. Plasmas* **15** 123501
- [8] Gong Y, Duan P, Zhang J H, Zou X, Liu J Y, Liu Y 2010 *Chin. J. Com. Phy.* **27** 883 (in Chinese) [宫野, 段萍, 张建红, 邹秀, 刘金远, 刘悦 2010 计算物理 **27** 883]
- [9] Liu J Y, Wang Z X, Wang X G 2003 *Phys. Plasmas* **10** 3032
- [10] Zou X, Ji Y K, Zou B Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1902 (in Chinese) [邹秀, 籍延坤, 邹滨雁 2010 物理学报 **59** 1902]
- [11] Ghomi H, Khoramabadi M, Shukla P K, Ghorannevis M 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 063302
- [12] Ghomi H, Khoramabadi M 2010 *J. Plasma Phys.* **76** 247
- [13] Zou X, Liu H P, Qiu M H, Sun X H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 125201
- [14] Ghomi H, Khoramabadi M 2011 *J. Fusion Energ.* **30** 481
- [15] Qiu M H, Liu H P, Zou X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155204 (in Chinese) [邱明辉, 刘惠平, 邹秀 2012 物理学报 **61** 155204]
- [16] Hatami M M, Shokri B 2013 *Phys. Plasmas* **20** 033506
- [17] Li J J, Ma J X, Wei Z A 2013 *Phys. Plasmas* **20** 063503
- [18] Yasserian K, Aslaninejad M, Borghei M, Eshghabadi M 2010 *J. Theor. Appl. Phys.* **4** 26
- [19] Yasserian K, Aslaninejad M 2012 *Phys. Plasmas* **19** 073507
- [20] Shaw A K, Kar S, Goswami K S 2012 *Phys. Plasmas* **19** 102108
- [21] Moulick R, Mahanta M K, Goswami K S 2013 *Phys. Plasmas* **20** 094501
- [22] Liu H P, Zou X, Zou B Y, Qiu M H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 035201 (in Chinese) [刘惠平, 邹秀, 邹滨雁, 邱明辉 2012 物理学报 **61** 035201]
- [23] Wang T T, Ma J X, Wei Z A 2015 *Phys. Plasmas* **22** 093505

Effect of collision parameter on magnetized electronegative plasma sheath structure*

Liu Hui-Ping^{1)2)†} Zou Xiu²⁾ Zou Bin-Yan²⁾ Qiu Ming-Hui²⁾

1) (School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

2) (School of Science, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

(Received 8 June 2016; revised manuscript received 12 August 2016)

Abstract

The structure of an electronegative plasma sheath in an oblique magnetic field is investigated. Moreover, the collisions between positive ions and neutral particles are taken into account. It is assumed that the system consists of hot electrons, hot negative ions, and cold positive ions. Also the negative ions and the electrons are assumed to be described by the Boltzmann distributions of their own temperatures, and the accelerated positive ions are treated by the continuity and momentum balance equations through the sheath region. In addition, it is assumed that the collision cross section has a power law dependence on the positive velocity. After theoretical derivation, an exact expression of sheath criterion is obtained. The numerical simulation results include the density distributions of the positive ions for different invariable ion Mach numbers satisfying Bohm criterion, and the comparison of net space charge distribution between variable and invariable ion Mach numbers. Furthermore, three kinds of charged particle densities, the net space charges, and the spatial electric potentials in the sheath are studied numerically for different collision parameters under the condition of the fixed ion Mach number. The results show that the ion Mach number has not only the lower limit but also the upper limit. The ion Mach number affects the sheath structure by influencing the distribution of the positive ion density, and different conclusions can be obtained because ion Mach number is adopted as variable or invariable value when discussing the effects of the other variables which can result in a variety of the ion Mach numbers on the sheath formation. The reason is that the actual sheath structure modification brought on by the variation of a parameter can be divided into two parts. One is the sheath formation change caused directly by the variation of the parameter, and the other is the sheath formation change caused by the Bohm criterion modification which the variation of the parameter results in. Therefore, an identical ion Mach number should be adopted when studying the direct effects of a parameter variety on plasma sheath structure. In addition, it is concluded that the collisions between positive ions and neutral particles make positive ion density curve higher and electron density curve lower than the case without collisions. Negative ion density does not change significantly no matter whether there exists collision. Besides, there is a peak in the profile of the net space charge while in the presence of ion-neutral collision, and the net space charge peak moves toward the sheath edge. The spatial potential increases and the sheath thickness decreases on account of the presence of the collisions between ions and neutral particles.

Keywords: sheath structure, electronegative, collision, oblique magnetic field

PACS: 52.40.Kh, 52.25.Xz

DOI: [10.7498/aps.65.245201](https://doi.org/10.7498/aps.65.245201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10605008, 51372026).

† Corresponding author. E-mail: lhpdjtu.edu.cn