

霍尔推进器壁面材料二次电子发射及鞘层特性*

段萍^{1)†} 覃海娟¹⁾ 周新维¹⁾ 曹安宁¹⁾ 刘金远²⁾ 卿少伟³⁾

1)(大连海事大学物理系, 大连 116026)

2)(大连理工大学物理与光电工程学院, 大连 116024)

3)(重庆大学动力工程学院, 重庆 400030)

(2013年10月28日收到; 2013年11月27日收到修改稿)

霍尔推进器放电通道等离子体与壁面相互作用形成鞘层, 不同壁面材料的二次电子发射对推进器鞘层特性具有重要影响. 本文针对推进器壁面鞘层区域建立二维物理模型, 研究了氮化硼 (BN)、碳化硅 (SiC) 和氧化铝 (Al_2O_3) 三种不同壁面材料的二次电子发射特性, 在改进 SiC 材料二次电子发射模型的基础上, 采用粒子模拟方法, 讨论了壁面二次电子发射系数与电子温度和磁场强度的关系, 研究了三种材料 (BN, SiC 和 Al_2O_3) 的鞘层特性. 结果表明: 修正的二次电子发射模型拟合曲线与实验曲线几乎一致; 在相同电子温度下, 三种材料 (BN, SiC 和 Al_2O_3) 的二次电子发射系数和壁面电子数密度依次增大, 而鞘层电场和鞘层电势降依次减小. BN 材料具有合适的二次电子发射系数, 使得霍尔推进器能在低电流下稳态工作.

关键词: 霍尔推进器, 壁面材料, 鞘层二次电子发射

PACS: 52.40.Kh, 52.65.Rr, 52.40.-w

DOI: 10.7498/aps.63.085204

1 引言

霍尔推进器又称为稳态等离子体推进器 (stationary plasma thruster, SPT), 主要应用于实现航天器的姿态控制、位置保持、轨道转移等空间推进任务^[1-4], 其工作原理如图 1 所示. 目前, 我国 XX-9A 卫星已于 2012 年 10 月 14 日发射入轨^[5]. 霍尔推进器放电过程在两个绝缘套筒之间的狭窄通道中进行, 通道两端施加了约几百伏的放电电压. 通道中电子在径向磁场和轴向电场的作用下沿周向做霍尔漂移运动, 约束电子横越磁场的传导^[6-8], 离子在轴向电场的作用下加速喷出从而产生推力. 霍尔推进器通道壁面一般由绝缘陶瓷材料构成, 高能电子轰击绝缘陶瓷壁面有二次电子产生, 不同的壁面材料其二次电子发射系数不同. 二次电子发射影响霍尔推进器的鞘层特性, 进而影响霍尔推进器的效率、比冲和寿命等性能指标^[9,10]. 因此, 研究不

同壁面材料对霍尔推进器鞘层特性的影响具有重要意义.

Morozov 和 Savelyer^[11,12] 首先通过实验研究了 BN, SiC, Al_2O_3 和 C 的二次电子发射系数与入射电子能量的关系, 并且提出了这 4 种材料的二次电子发射线性模型, 此后, 他又对二次电子发射模型进行了改进. 哈工大在 Morozov 改进模型的基础上考虑了电子发生非弹性反射的情况, 提出了 BN 和 Al_2O_3 新的二次电子发射模型. 大多数霍尔推进器鞘层特性研究都涉及壁面材料的二次电子, 且大部分采用 BN 二次电子发射模型. 如 Tacogna 等^[13] 采用 BN 二次电子发射模型, 研究了 Xe 正一价和正二价对霍尔推进器鞘层特性的影响; 文献^[14] 也是采用 BN 二次电子发射模型, 研究了电子温度各向异性对壁面的影响等. 本文考虑当电子打到壁面发射非弹性反射的情况, 对 SiC 二次电子发射模型进行了改进, 针对霍尔推进器壁面鞘层

* 国家自然科学基金 (批准号: 11275034, 11375039, 11175052, 11005025) 和辽宁省科学技术计划重点项目 (批准号: 2011224007) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: duanping591@sohu.com

区域建立二维物理模型, 采用粒子模拟 (PIC) 方法, 研究了霍尔推进器三种不同器壁材料 (BN, SiC 和 Al_2O_3) 的二次电子发射规律及对鞘层特性的影响.

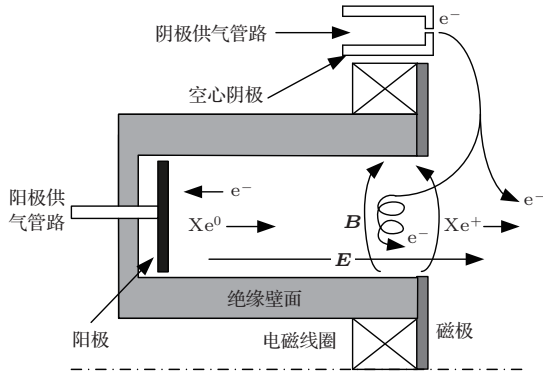


图1 霍尔推力器的工作原理及其结构

2 物理模型

2.1 基本方程

在霍尔推进器通道内, 由于等离子体自洽产生的磁场远小于外加磁场, 可以忽略. 针对霍尔推进器等离子体鞘层建立静电模型, 其麦克斯韦方程组为

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad \left(\frac{1}{c} = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \right), \quad (2)$$

式中 $\mathbf{E}$ 为电场矢量, $\mathbf{B}$ 为磁场矢量, μ_0 为真空磁导率, ε_0 为真空介电常数, ρ 为电荷密度. 电场是电势的梯度, 因此有

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi. \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (1) 式得泊松方程:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}. \quad (4)$$

在静电模型中, 根据网格电荷密度解泊松方程求出网格电势, 减少了计算量^[15].

在柱坐标系下, 包含轴向 z 和径向 r 的二维泊松方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{e}{\varepsilon_0} (n_i - n_e), \quad (5)$$

式中, ϕ 为电势, n_i 和 n_e 分别为离子和电子的数密度, e 为单位电荷. 在平行于 z, r 方向分别以等空间步长划分网格, 用 i, j 分别表示 z 和 r 方向的网格计

数, (5) 式采用中心差分代替微分的方法得

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1}}{2\Delta r} + \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{(\Delta r)^2} \\ & + \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{(\Delta z)^2} \\ & = -\frac{e}{\varepsilon_0} (n_i - n_e)_{i,j}, \end{aligned} \quad (6)$$

化简可得

$$\begin{aligned} & \frac{(\Delta r)^2}{(\Delta z)^2} (\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j}) - 2 \left(1 + \frac{(\Delta r)^2}{(\Delta z)^2} \right) \phi_{i,j} \\ & + \left(\frac{r_{i,j+1/2}}{r_{i,j}} \phi_{i,j+1} + \frac{r_{i,j-1/2}}{r_{i,j}} \phi_{i,j-1} \right) \\ & = -\frac{e}{\varepsilon_0} (n_i - n_e)_{i,j} (\Delta r)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

对于单个粒子的运动, 在电磁场作用下的运动方程为

$$\frac{d}{dt} m \mathbf{v} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{v}, \quad (9)$$

式中, m 为带电粒子质量, $\mathbf{v}$ 为速度矢量, $\mathbf{x}$ 为位置矢量. 在程序中求解时, 采用 Boris 算法快速简单, 具有二阶精度, 求解格式如下:

$$\mathbf{v}^- = \mathbf{v}^{t-\Delta t/2} + \frac{e\Delta t \mathbf{E}^t}{2m}, \quad (10)$$

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v}^- + \mathbf{v}^- \times \mathbf{t}^t, \quad (11)$$

$$\mathbf{v}^+ = \mathbf{v}^- + \mathbf{v}' \times \frac{2\mathbf{t}^t}{1 + \mathbf{t}^t \times \mathbf{t}^t}, \quad (12)$$

$$\mathbf{v}^{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}^+ + \frac{e\Delta t \mathbf{E}^t}{2m}, \quad (13)$$

式中 $\mathbf{t}^t = e\Delta t \mathbf{B}^t / (2m)$, 上标 t 表示时刻.

模拟区域 (如图2所示) 取轴向方向 $z = 20\lambda_D$ 和径向方向 $r = 10\lambda_D$. 网格在空间上均匀划分, 空间步长为 $\Delta z = \Delta r = 0.5\lambda_D$, 时间步长为 $\Delta t = 0.1\omega_p^{-1}$, λ_D 为德拜长度, ω_p 为等离子体频率. 模拟区域中的参数: 电子密度 $n_e = 10^{18}/\text{m}^3$, 电子温度 $T_e = 18 \text{ eV}$, 磁场强度 $B = 0.02 \text{ T}$ ($1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$), 根据公式可以计算出电子的拉莫尔半径 ($r_c \approx 0.5 \text{ mm}$) 大于模拟区域的径向长度 ($r \approx 0.3 \text{ mm}$), 所以在模拟区域中认为电子是非磁化的. 因为离子的质量远远大于电子的质量, 离子的回旋半径远远大于模拟区域径向长度, 因此在模拟区域内取离子为背景粒子. 周期性边界电势满足 $\partial\Phi/\partial z = 0$; 在等离子体边界电势满足 $\Phi = 0$; 由 $\mathbf{E} = -\delta/\varepsilon_0$ 得绝缘壁面边界电势, 式中 δ 为绝缘壁

面电荷密度. 在准中性区域内 ($r = r_0 - 3\lambda_D$) 电子随机均匀布置, 电子速度服从麦克斯韦分布^[16].

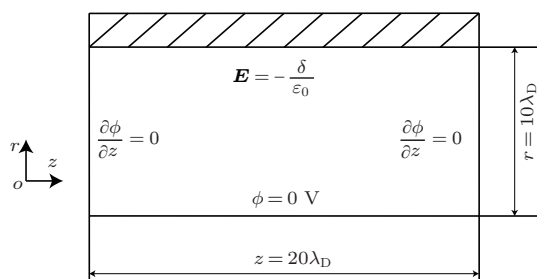


图2 模拟区域和边界条件

2.2 二次电子发射模型

Morozov 和 Savelyer^[11,12] 通过实验研究了 BN, Al_2O_3 , SiC 和 C4 种材料的二次电子发射系数与入射电子能量的变化规律 (如图 3 所示), 同时建立了 4 种材料的二次电子发射模型^[17,18].

2006 年, 哈尔滨工业大学疏舒等人, 针对 BN 和 Al_2O_3 壁面材料, 采用概率统计的方法, 改进了 Morozov 二次电子发射模型^[19,20], 其二次电子发射系数拟合与实验曲线如图 4 和图 5 所示.

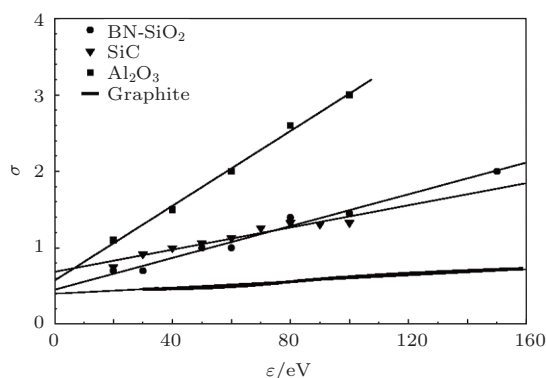


图3 壁面材料二次电子发射与入射电子能量的实验图

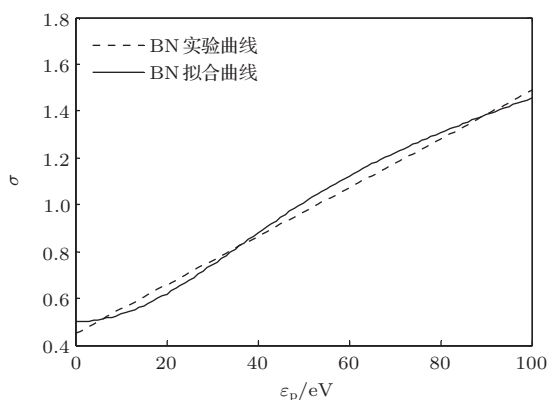


图4 BN 二次电子发射系数拟合与实验曲线

本文在考虑电子与壁面发生非弹性反射的基础上, 对 SiC 材料二次电子发射模型进一步修正. 由于电子在模拟区域中运动时会和壁面碰撞, 当一个电子打到 SiC 绝缘壁面后, 电子可能积累在壁面上、发生非弹性反射、打出一个电子、打出两个电子 4 种情况. 4 种情况对应的概率分别为

$$W_0(\varepsilon) = P_0 \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{\alpha_0^2}\right), \quad (14)$$

$$W_r(\varepsilon) = P_r \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{\alpha_r^2}\right), \quad (15)$$

$$W_2(\varepsilon) = 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{\alpha_2^2}\right), \quad (16)$$

$$W_1(\varepsilon) = 1 - W_0(\varepsilon) - W_r(\varepsilon) - W_2(\varepsilon), \quad (17)$$

式中, ε 为入射电子能量, 其中 $P_0 = 0.31$, $P_r = 0.69$, $\alpha_0 = 34.6616$, $\alpha_r = 30$, $\alpha_2 = 143.4993$, 其拟合曲线与实验曲线对比如图 6 所示.

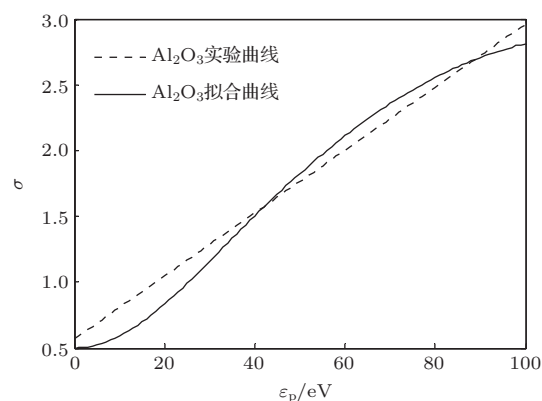


图5 Al_2O_3 二次电子发射系数拟合与实验曲线

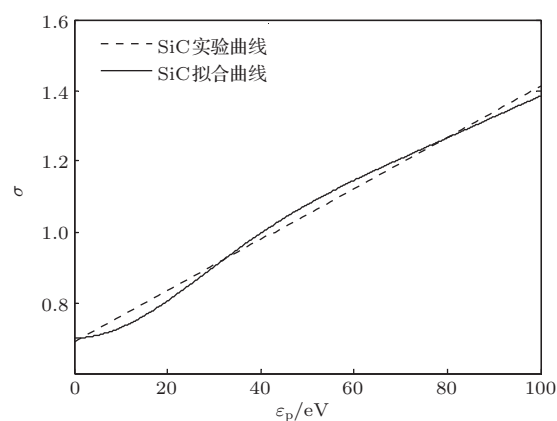


图6 SiC 二次电子发射系数拟合与实验曲线

由图 6 可知, 修正后的 SiC 壁面材料二次电子发射模型拟合曲线与实验曲线符合得很好. 在此, BN 和 SiC 材料的二次电子发射系数为 $\sigma = W_r + 2W_2 + W_1$, 而 Al_2O_3 材料具有高二次

电子发射系数, 考虑电子轰击壁面打出3个二次电子的可能性(W_3), 其二次电子发射系数为 $\sigma = W_r + 2W_2 + W_1 + 3W_3$.

3 数值结果与讨论

采用修正后的二次电子发射模型, 研究了推进器鞘层电子温度和磁场强度对不同壁面材料二次电子发射系数的影响, 并且比较这三种材料 (BN, SiC 和 Al_2O_3) 作为壁面材料时推进器的鞘层特性.

3.1 电子温度对壁面材料二次电子发射系数的影响

图7表示在不同电子温度下, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料的二次电子发射系数与电子温度的关系. 将图7与图3比较可知, 电子温度在15—30 eV时, BN, SiC 和 Al_2O_3 这三种材料的二次电子发射曲线和实验曲线(图3)一致, 因此, 其拟合出来的参数是合理的. 由图7可知, 随着电子温度的升高, BN, SiC 和 Al_2O_3 材料的二次电子发射系数都增大, 其原因是由于电子温度升高, 使到达壁面处电子的能量增加, 因此, 从壁面出射的二次电子数目增多; 当电子温度相同时, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种材料的二次电子发射系数依次增大. 这是由于不同材料其放电特性不同, 较高能量电子打到 Al_2O_3 壁面时, 能打出三个二次电子, 而当壁面材料为BN或SiC材料时, 最多只能打出两个二次电子, 因此 Al_2O_3 材料的二次电子发射系数最大.

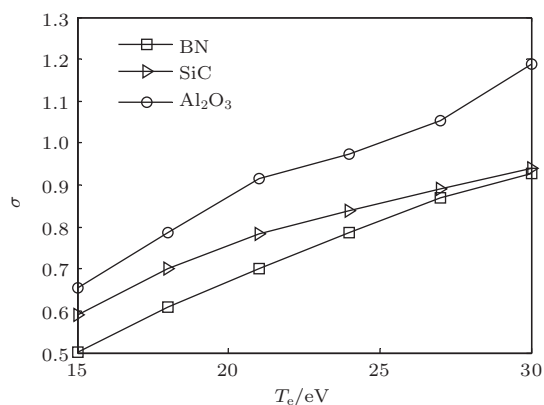


图7 电子温度对二次电子发射系数的影响

3.2 磁场强度对壁面材料二次电子发射系数的影响

图8表示磁场强度对BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料二次电子发射系数的影响. 由图8可知, 由于磁场方向垂直于壁面, 对电子束缚作用较小, 磁场强度对三种材料的二次电子发射系数几乎没有影响. 但是, 在相同磁场强度情况下, BN, SiC 和 Al_2O_3 材料的二次电子发射系数依次增大.

3.3 壁面材料对鞘层特性的影响

图9表示在相同电子温度下, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种壁面材料鞘层内电子数密度随径向的变化曲线. 由图9可知, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种材料, 作为壁面材料, 电子数密度随径向的变化趋势相同, 都是沿着壁面按指数形式下降, 且在壁面附近达到最小值, 但其变化量大小不同. 由图9可知当电子温度相同时, BN材料壁面附近电子数密度最少, 原因是在所研究的电子温度范围内, BN材料的二次电子发射系数最小, BN材料壁面发射出的二次电子数目最少, 导致其壁面附近的电子数密度减少.

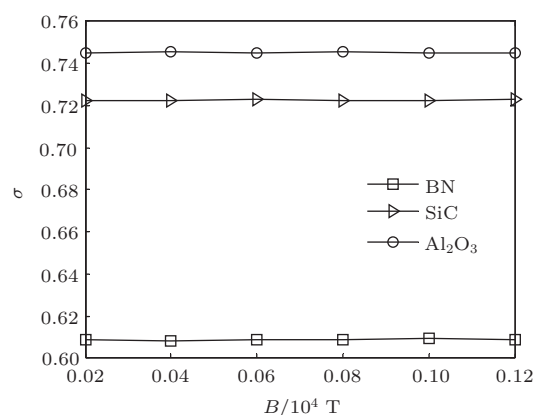


图8 磁场强度对二次电子发射系数的影响

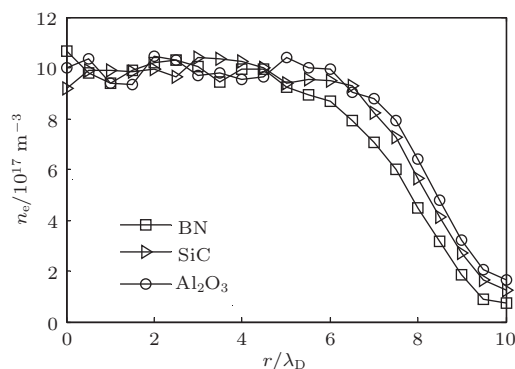


图9 电子数密度随径向的变化曲线 ($r/\lambda_D = 10$)

图 10 表示不同壁面材料对鞘层电场的影响. 由图 10 可知, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种材料的鞘层电场依次减小. 根据 (2) 和 (3) 式, 可知鞘层内部的电场表达为

$$\frac{dE}{dr} = \frac{e}{\varepsilon_0}(n_i - n_{e1} - n_{e2}), \quad (18)$$

式中 n_{e1} 表示一次电子, n_{e2} 表示二次电子. 显然电场的梯度和一次电子、二次电子和离子密度有关. 由 (18) 式可知, 二次电子发射系数越大, 二次电子越多, 则电场的梯度越小, 从而电场越小, 所以二次电子发射系数越大, 鞘层电场越小. BN 材料的二次电子发射系数最小, 鞘层电场最大, 而鞘层电场越大, 对离子的径向运动阻碍越大, 离子越不容易打到壁面上, 从而离子越容易沿轴向加速喷出, 因此 BN 材料最适合做推进器壁面材料.

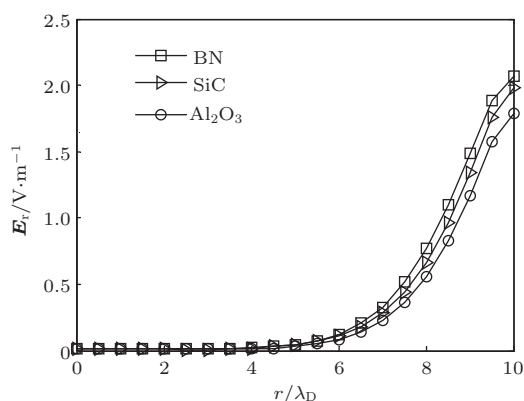


图 10 壁面材料对鞘层电场的影响 ($r/\lambda_D = 10$)

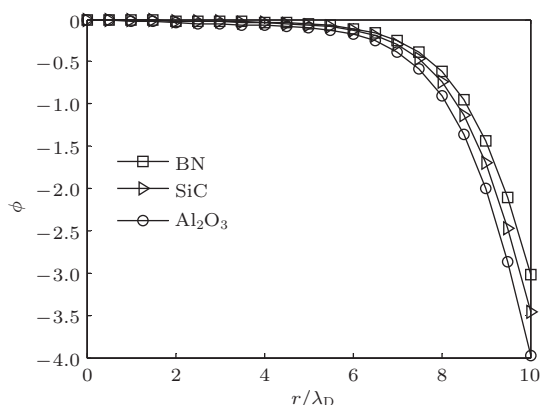


图 11 鞘层电势降沿径向的变化曲线 ($r/\lambda_D = 10$)

图 11 表示在相同电子温度下, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料鞘层电势降沿径向的变化曲线. 图 11 表明, 在电子温度相同的情况下, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料的鞘层电势降均沿着径向方向按指数形式下降, 但是下降的量大小不同, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料的鞘

层电势降依次减小. 其原因是 BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料的二次电子发射系数依次增大, 壁面附近的二次电子数密依次增加, 电子带有负电荷, 使得 BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料的鞘层电势降依次减小, 即 BN 材料的鞘层电势降最大. 当二次电子发射系数较大时, BN 材料鞘层势垒最大, 慢电子不易穿越鞘层势垒打到壁面而抑制二次电子的发射, 从而形成了一个负反馈调节机制. 由此可知 BN 材料具有合适的二次电子发射系数, 使得霍尔推进器能在低电流下稳态工作.

4 结 论

本文研究了 BN, SiC 和 Al_2O_3 三种不同壁面材料的二次电子发射特性, 建立了 SiC 材料的二次电子发射模型. 在数值拟合二次电子发射模型基础上, 讨论了壁面二次电子发射系数与电子温度的关系. 数值结果表明: 当电子温度为 15—30 eV 时, 数值模拟曲线和实验曲线一致, 三种材料 (BN, SiC 和 Al_2O_3) 二次电子发射系数依次增大, 且呈线性变化, 说明拟合的二次电子发射模型合理. 在修正后的二次电子发射模型基础上, 采用 PIC 方法, 研究了三种壁面材料 (BN, SiC 和 Al_2O_3) 的鞘层特性. 数值结果表明: 在相同电子温度下, BN, SiC 和 Al_2O_3 三种材料的二次电子发射系数和壁面电子数密度依次增大, 鞘层电场和鞘层电势降依次减小. BN 材料的鞘层电场最大, 而鞘层电场越大, 对离子的径向运动阻碍越大, 离子越不容易打到壁面上, 从而使离子越容易沿轴向加速喷出. 因此 BN 材料最适合做推进器壁面材料. 当二次电子发射系数较大时, BN 材料鞘层势垒最大, 导致慢电子不易穿越鞘层势垒打到壁面而抑制二次电子的发射, 从而形成了一个负反馈调节机制, 使得二次电子发射系数不会过大. 由此可知 BN 材料具有合适的二次电子发射系数, 使得霍尔推进器能在低电流下稳态工作.

参考文献

- [1] Jankovsky R S, Jacobson D T, Sarmiento C J, Pinero L R, Sarmiento C J 2002 *38th Joint Propulsion Conference and Exhibit Indianapolis Indiana*, July 7–10, 2002 AIAA-2002-3675
- [2] Steven R O, John M S 2000 *3rd International Spacecraft Propulsion Conference Cannes, France*, October 10–13, 2000 NASA/TM-2001-210676

- [3] Mao G W, Fu X P, Chen M L 2008 *Mech. Sci. Technol. Aerosp. Engineer.* **27** 853 (in Chinese) [毛根旺, 付西鹏 2008 机械科学与技术 **27** 853]
- [4] Brandhorst H W, O'Neill M J, Alan Jones P, Joseph Cassady R 2002 *Acta Astronaut.* **51** 57
- [5] Kang X L, Yu S L, Qiao C X, Zhao Z, Hang G R, Qiu G, Chen H H, Zhang Y 2012 *Proceeding of the 8th Chinese Electric Propulsion Conference* Beijing China November 16–18, 2012 180 (in Chinese) [康小录, 余水淋, 乔彩霞, 赵震, 杭观荣, 邱刚, 陈海辉, 张岩 2012 第八届中国电推进技术学术研讨会北京, 中国, 11月16—18, 2012 p180]
- [6] Sydorenko D, Smolyakov A 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 815824
- [7] Sydorenko D, Smolyakov A, Kaganovich I 2008 *Phys. Plasmas* **15** 053506
- [8] Yu D R, Zhang F K, Li H, Liu H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1844 (in Chinese)[于达仁, 张凤奎, 李鸿, 刘辉 2009 物理学报 **58** 1844]
- [9] Gascona N, Dudeck M 2003 *Phys. Plasmas* **16** 053906
- [10] Sydorenko D 2006 *Ph. D. Dissertation* (Saskatoon: Saskatchewan University of Saskatchewan) pp16–17
- [11] Morozov A I, Savelyev V V 2001 *Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference* Pasadena, USA, October 14–19, 2001 p95
- [12] Morozov A I, Savelyev V V 2004 *Phys. Plasmas* **30** 330
- [13] Taccogna F 2012 *AIP Conf. Proc.* **15** 011390
- [14] Qing S W, E P, Duan P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 205202 (in Chinese)[卿绍伟, 鄂鹏, 段萍 2012 物理学报 **61** 205202]
- [15] Shao F Q 2002 *Plasma Particle Simulation* (Beijing: Science Press) p12 (in Chinese) [邵福球 2002 等离子体粒子模拟 (北京: 科学出版社) 第12页]
- [16] Zhao X Y, Liu J Y, Duan P, Li S G 2012 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **32** 279 (in Chinese) [赵晓云, 刘金远, 段萍, 李世刚 2012 真空科学与技术学报 **32** 279]
- [17] Barral S, Makowski K, Peradzyński Z, Gascon N, Dudeck M 2003 *Phys. Plasmas* **10** 4137
- [18] Dunaevsky A, Raites Y, Fisch N J 2003 *Phys. Plasmas* **10** 2574
- [19] Zhang F K, Ding Y J, Qing S W, Wu X D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 125201
- [20] Shu S 2006 *M. S. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology of China) (in Chinese) [疏舒 2006 硕士论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]

Characteristics of wall materials secondary electron emission and sheath in Hall thruster^{*}

Duan Ping^{1)†} Qin Hai-Juan¹⁾ Zhou Xin-Wei¹⁾ Cao An-Ning¹⁾
Liu Jin-Yuan²⁾ Qing Shao-Wei³⁾

1) (Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

2) (School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

3) (Institute of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(Received 28 October 2013; revised manuscript received 27 November 2013)

Abstract

Hall thruster plasma discharge channels interact with wall forming sheath, and different secondary electron emission coefficients of wall material can considerably affect sheath characteristics. In this paper, we establish a two-dimensional physical model in wall sheath area to study the secondary electron emission characteristics of three different wall materials which are boron nitride (BN), silicon carbide (SiC) and aluminium oxide (Al_2O_3), and SiC material secondary electron emission model is improved. On the basis of improved secondary electron emission model, the relationship between the wall secondary electron emission coefficient and both electron temperature and magnetic field intensity is discussed by the particle in cell simulation method, and the different sheath properties of three materials (BN, SiC and Al_2O_3), are also investigated. The results show that fitting curve is consistent with the experimental results; at the same electron temperature, the values of secondary electron emission coefficient and electron density of three materials (BN, SiC and Al_2O_3) increase but the values of sheath electric field and sheath potential drop decrease in their sequence. The BN material has the appropriate secondary electron radiation coefficient, which makes the thruster work steadily under low current condition.

Keywords: Hall thruster, wall material, sheath secondary emission

PACS: 52.40.Kh, 52.65.Rr, 52.40.-w

DOI: 10.7498/aps.63.085204

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11275034, 11375039, 11175052, 11005025) and the Key Program of Science and Technology of Liaoning Province, China (Grant No. 2011224007).

[†] Corresponding author. E-mail: duanping591@sohu.com