

阳极磁屏蔽对阳极层霍尔推力器内磁极刻蚀的影响

赵杰 唐德礼 许丽 李平川 张帆 李建 桂兵仪

Effect of anode magnetic shield on inner magnetic pole etched in anode layer Hall thruster

Zhao Jie Tang De-Li Xu Li Li Ping-Chuan Zhang Fan Li Jian Gui Bing-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 215202 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190654

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190654>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于变均布霍尔系数的磁控热防护系统霍尔效应影响

Investigation of Hall effect on the performance of magnetohydrodynamic heat shield system based on variable uniform Hall parameter model

物理学报. 2017, 66(5): 054701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054701>

离子推力器推力密度特性

Thrust density characteristics of ion thruster

物理学报. 2018, 67(2): 022901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171507>

磁路和天线位置对2 cm电子回旋共振离子推力器性能影响的实验研究

Experimental study of magnetic circuit and antenna position influence on performance of 2 cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2019, 68(23): 235202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191122>

高超声速飞行器磁控热防护霍尔电场数值方法研究

Numerical solution procedure for Hall electric field of the hypersonic magnetohydrodynamic heat shield system

物理学报. 2017, 66(8): 084702 <https://doi.org/10.7498/aps.66.084702>

基于Al₂O₃/MoO₃复合阳极缓冲层的倒置聚合物太阳能电池的研究

Enhanced performance of inverted polymer solar cell based on Al₂O₃/MoO₃ as composite anode buffer layer

物理学报. 2018, 67(6): 067201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172311>

阳极磁屏蔽对阳极层霍尔推力器 内磁极刻蚀的影响*

赵杰^{1)2)†} 唐德礼¹⁾ 许丽¹⁾²⁾ 李平川¹⁾
张帆¹⁾ 李建¹⁾²⁾ 桂兵仪²⁾

1) (核工业西南物理研究院, 成都 610041)

2) (成都理工大学工程技术学院, 乐山 614007)

(2019年5月1日收到; 2019年8月7日收到修改稿)

利用 PIC 与溅射模拟相结合的方法, 研究阳极层霍尔推力器的阳极磁屏蔽对内磁极刻蚀速率的影响. 通过磁屏蔽技术, 改变了阳极表面的磁场位形分布, 提高了推力器磁镜场的磁镜比和中轴线上的正梯度的磁场宽度. 磁镜比是原来的 1.4 倍, 且增加了两个鞍形磁场区域. 在放电电压 900 V, 工作气压 2×10^{-2} Pa 时, 仿真结果表明: 在阳极磁屏蔽的情况下, 大部分轰击内磁极的离子能量概率分布范围在 40—260 eV 之间, 比无屏蔽下的 40—360 eV 下降了将近 100 eV; 入射角余弦值的最大概率分布从 0.1 附近的小范围 (入射角 84°) 扩展到 0.1—0.45 (入射角 84° — 63°) 的大范围; 阳极屏蔽后的内磁极最大刻蚀速率是 6.1×10^{-10} m/s, 比无磁屏蔽时的 16×10^{-10} m/s 降低了 38.2%. 无磁屏蔽下的仿真结果和实验结果具有很好的一致性.

关键词: 阳极层霍尔推力器, 磁屏蔽, 入射离子能量, 刻蚀速率

PACS: 52.75.Di, 29.25.Ni, 52.65.Rr

DOI: 10.7498/aps.68.20190654

1 引言

阳极层霍尔推力器以正交电磁场 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 约束大量的电子形成角向的霍尔漂移. 同时工质气体进入推力器放电室内, 并在阳极表面附近的磁镜磁场中与电子发生电离碰撞生成离子. 快速运动到推力器外与中和器的电子中和成高速的中性等离子体向外喷出, 对推力器形成持续稳定的推力^[1,2]. 随着实践 9A 成功验证, 我国电推进研究逐渐由基础理论研究转向工程应用研究, 并且多种电推进技术项目相继开展. 与此同时深空探测任务、大型空间站建设等航天任务对大功率、长寿命的电推进器的需求显得尤为重要. 其中推力器的寿命决定了其能否

完成既定的空间任务及服役过程中所能获得的最大总冲. 目前就技术成熟且满足实际轨道飞行要求的霍尔推力器系列来说, 其寿命大约在 7000 h 以上, 而要完成深空探测任务, 则需要研发出寿命达到 10000 h 以上的推力器^[3,4]. 通常有两个因素决定推力器的寿命: 推力器自身的寿命和中和器的寿命. 由于现在的空心阴极中和器技术已趋成熟, 其寿命均超过加速器寿命, 所以通常情况下电推力器的寿命主要由推力器自身寿命决定^[5]. 而推力器的自身寿命又主要取决于离子对推力器壁面的溅射刻蚀程度^[6,7]. 所以从电推进器发展至今, 其刻蚀问题就一直是国内外研究热点.

推力器的刻蚀一方面影响推力器的寿命, 另一方面其刻蚀产物还会影响推力器正常的工作参数,

* 国家自然科学基金 (批准号: 11775073) 和四川省科技厅项目 (批准号: 2019YJ0705) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaojie585@126.com

以及放电等离子体的稳定性^[8,9], 并且还会对太阳能电池板和光学器件有一定的影响. 器壁的刻蚀主要通过实验和仿真两种研究手段. 器壁的刻蚀是个非常缓慢的过程, 严重刻蚀通常需要上千小时, 传统的推力器使用寿命是通过推力器在真空室内长期运行来进行研究的. 比如在 1994 年, Garner 和 Brophy^[10] 对阳极层霍尔推力器 D-55 进行刻蚀实验研究, 经过 636 h 发现阳极沉积了一层不锈钢、碳、钼等材料, 最大厚度在 11 μm , 使用耐刻蚀材料代替不锈钢材料后, 推力器的寿命超过 5000 h. 2005 年, 有学者对 BPT-4000 霍尔推力器进行了另一个长时间实验, 结果表明 BPT-4000 能够在 1—4.5 kW 放电功率下正常工作 6750 h, 通过实验后的预测推力器的磁极之后要再工作几百个小时后才会暴露在放电等离子体中^[11–13]. 因为关于推力器的寿命研究是一个长时间、大消耗的实验研究, 随着计算机技术的发展, 使用模拟研究手段显得尤为必要. Sommier 等^[14] 以二维混合 PIC 模型为基础, 建立了霍尔推力器模拟专用程序 HPHall. John 和 Michael^[15] 对霍尔推力器以流体动力学为基础建立了刻蚀模型, 最后给出刻蚀速率的分布. 对于圆柱形阳极层霍尔推力器首先进行了器壁刻蚀机理分析, 得到推力器的工作状态和电磁场磁场位形是引起内磁极刻蚀较为严重的重要结论^[16]. 之后, 对引起内外磁极刻蚀的入射离子特性进行仿真和实验研究, 结果表明长时间高电压模式下的内磁极刻蚀较为严重. 为了研究溅射粒子行为, 对圆柱形阳极层霍尔推力器进行了实验研究, 结果表明溅射粒子主要集中在羽流中心线附近区域, 并且随着放电电压和电流的上升, 溅射粒子的密度逐渐增加^[17]. 故此, 本文通过阳极磁屏蔽技术得到更优的磁场位形, 达到降低推力器内磁极的刻蚀以及减少溅射粒子的目的. 通过 PIC 粒子模拟得到有无阳极磁屏蔽下的轰击内磁极的离子的入射角和能量、以及内磁极的刻蚀速率对比, 以此来研究阳极磁屏蔽技术对降低内磁极刻蚀的方法. 此研究结果对于降低器壁刻蚀, 提高圆柱形阳极层霍尔推力器的寿命有着非常重要的价值.

2 推力器结构和磁屏蔽磁场

2.1 磁屏蔽圆柱形阳极层霍尔推力器结构

图 1 是磁屏蔽圆柱形阳极层霍尔推力器的结

构示意图, 主要包括外磁极、内磁极、阳极磁屏蔽、阳极、内外屏蔽筒和磁钢等. 阳极位于放电室内, 有助于提高气体的电离. 为了防止永磁体的热退磁现象, 磁钢位于内屏蔽筒之外. 内外磁极之间形成磁镜形磁场位形, 并且在中心轴附近还有一个鞍形结构的磁场位形存在, 关于鞍形磁场的作用在参考文献 [18, 19] 中有了详细论述. 这样的磁场结构起两方面的作用: 一方面有效约束放电等离子体, 减少双极扩散导致的等离子体器壁复合损失; 另一作用是有效提高电子的碰撞概率. 图 1 的虚线框内是仿真模拟区域, 其中①是内磁极内表面, ②是内磁极上表面.

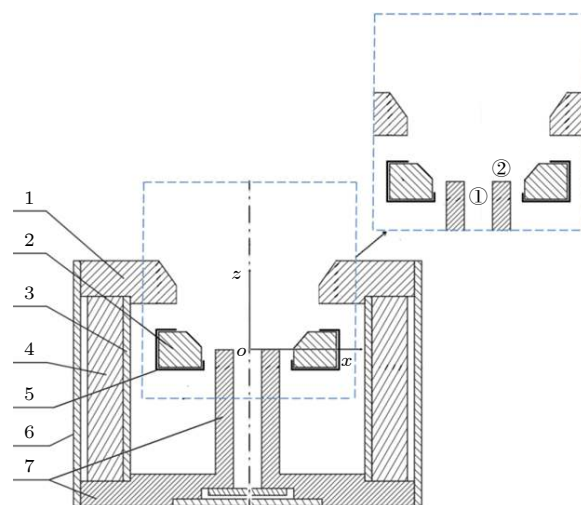


图 1 阳极层霍尔推力器结构示意图 (1, 外磁极; 2, 阳极; 3, 内屏蔽筒; 4, 磁钢; 5, 阳极磁屏蔽; 6, 外屏蔽筒; 7, 内磁极)

Fig. 1. Cross-sectional schematic diagram of the anode layer Hall thruster (1, outer magnetic pole; 2, anode; 3, inner shield; 4, permanent magnet; 5, anode magnetic shield; 6, outer shield; 7, inner magnetic pole).

2.2 磁场位形分布

在图 1 的阳极磁屏蔽结构下, 得到有无阳极层磁屏蔽时的磁场线分布 (如图 2 所示), 通过对比无阳极磁屏蔽的图 2(a) 和有阳极磁屏蔽的图 2(b) 可知, 阳极层磁屏蔽时穿过阳极的磁场线明显减少, 阳极表面存在更多的弯曲磁场线, 并且增加了内磁极和阳极之间的径向磁场分量. 由于圆柱形阳极层霍尔推力器内磁场位形是磁镜场分布, 其磁镜比为

$$\eta = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}, \quad (1)$$

其中 B_{\max} 是磁镜场最大磁通密度, B_{\min} 是磁镜场最小磁通密度. 文献 [19] 研究表明, 在阳极磁屏蔽下的磁镜比增加到原来的 1.4 倍, 并且提高了阳极

层表面正梯度磁场的范围. 从磁场位形来看, 阳极层磁屏蔽不仅增强了原来鞍形磁场对电子的有效约束, 而且出现了两个明显的附加鞍形磁场. 这样的磁场位形一方面有利于约束电子, 增强电子的有效碰撞, 提高工质气体的电离率, 另一方使得阳极与高温电子区保持了一定的距离, 为高功率霍尔等离子体推力器的设计提供可靠的参考数据.

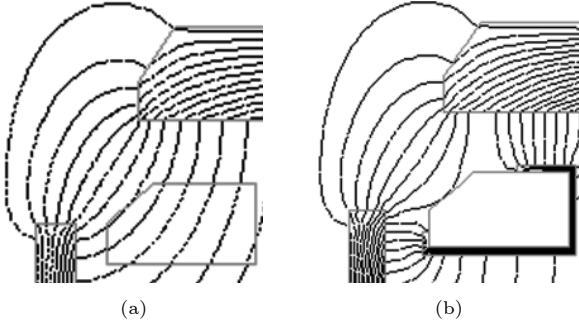


图 2 磁场线 (a) 无阳极磁屏蔽; (b) 有阳极磁屏蔽
Fig. 2. Magnetic field lines: (a) Without anode magnetic shield; (b) with anode magnetic shield.

3 模拟方法

为了研究阳极磁屏蔽后对降低内磁极刻蚀速率, 提高推力器寿命的作用, 本文利用 PIC 模拟方法对推力器内的放电等离子体进行三维建模仿真. 首先对图 2 圆柱形阳极层霍尔推力器的右上角区域进行三维几何建模, 三维仿真区域为边长为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的区域, 其中轴向长度为 60 mm . 通过磁场仿真得到三维磁场数据, 接着把三维几何模型和磁场数据导入到 PIC 模拟程

序中. 粒子间的碰撞采用蒙特卡罗, 通过如下公式计算一个时间步长内的碰撞概率:

$$P_m = 1 - \exp[-n_g \sigma_i(\varepsilon_m) v_m \Delta t], \quad (2)$$

其中 n_g 是气体密度, v_g 是粒子速度, ε_m 是粒子的能量, Δt 是时间步长, σ_i 是碰撞截面.

在此仿真中蒙特卡罗碰撞包括电离、激发、弹性散射以及电荷交换, 并且带电粒子是单电荷. 只有碰撞概率 P_m 大于随机数 R 的碰撞才可能发生. 在放电等离子体中, 电子、离子和中性粒子看作是单个动力学粒子, 其工质气体氙气是各向同性的. 初始中性气体粒子数密度为 $1.21 \times 10^{19} / \text{m}^3$, 空间步长为 0.5 mm , 时间步长为 $1 \times 10^{-10} \text{ s}$. 并且在初始时刻以 86400 宏电子作为种子电子, 其均匀分布在指定的区域内. 设置仿真区域六个面的边界条件为狄拉克边界条件, 仿真区域内的阳极通过函数加载放电电压. 循环跟踪大量带电粒子的运动, 再根据要求对这些带电粒子的物理量进行统计平均, 即可得到宏观等离子体的物质特性和运动过程, 具体的仿真流程如图 3 所示. 通过 PIC 模拟得到入射到内磁极上的离子能量 E_0 和入射角 θ 分布, 利用溅射模型获得一个入射离子溅射出来的原子数 $n(E_0, \theta, E_d)$:

$$n(E_0, \theta, E_d) = \text{Int} \left(\log_2 \frac{E_d + \frac{2m_1 m_2}{(m_1 + m_2)} E_0 \cos \theta}{E_d} + 0.5 \right), \quad (3)$$

式中 E_0 是入射离子的能量, θ 是入射角, E_d 是内磁极材料的能量阈值, m_1 是入射离子的质量, m_2 是刻蚀原子的质量.

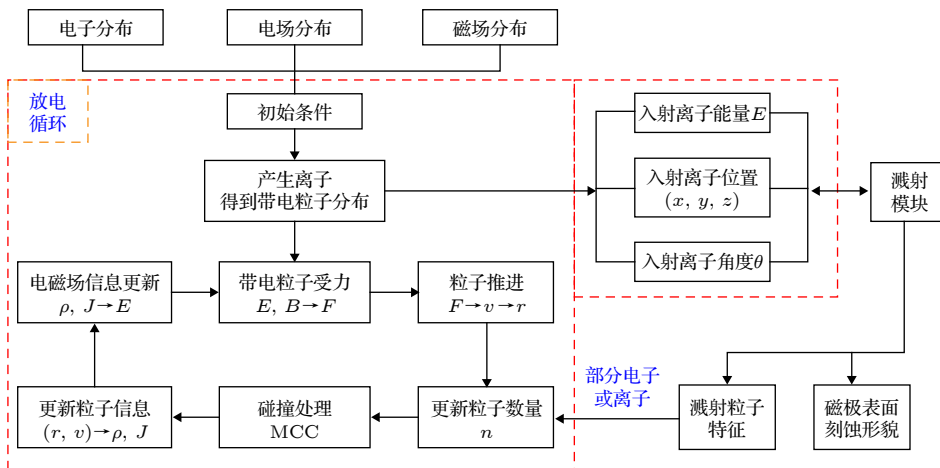


图 3 仿真流程

Fig. 3. Simulation process.

再结合推力器磁极的刻蚀深度 h 以及入射离子数量守恒公式可知:

$$\frac{(Ah) \cdot N}{n} = \frac{J_b \cdot \cos \theta \cdot A \cdot t}{q}, \quad (4)$$

其中 J_b 是以入射角 θ 入射到内磁极表面的离子束流密度, 内磁极面积为 A 的入射离子束流密度为 $J_b \cdot \cos \theta$, n 为 (3) 式得到的溅射出来的原子数, q 是离子电荷量, t 是溅射时间, N 是内磁极材料单位体积内的原子数.

通过 (3) 和 (4) 式即可得到刻蚀速率 E_s 表达式:

$$E_s = \frac{J_b \cdot \cos \theta}{N \cdot q} \cdot \text{Int} \left(\log_2 \frac{E_d + \frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} E_0 \cos \theta}{E_d} + 0.5 \right). \quad (5)$$

4 结果分析

通过 PIC 粒子模拟得到推力器中离子轨迹的分布如图 4 所示. 图 4 是取了左右各一个网格内的离子分布层, 从图 4 可知绝大多数离子被引出推力器, 一部分离子轰击到内磁极表面, 还有一部分离子轰击到外磁极上, 这一点从实验后的推力器刻蚀形貌也可明显看出, 由此可知内磁极的刻蚀程度决定了圆柱形阳极层霍尔推力器的寿命. 定性分析图 4 可以看出大部分轰击到内磁极上的离子都是入射到内磁极上表面和内磁极内表面, 并且大多数的离子以大角度轰击内磁极的两个面. 特别是内磁极上表面的两个边沿明显处于离子运动轨迹的范围内, 引起的刻蚀程度也必然相对较大些, 这一点已经从实验和仿真分析得到了验证 [16,20]. 为定量研究阳极磁屏蔽技术在降低内磁极刻蚀方面的作用, 分别统计入射到内磁极上的离子能量和入射角余弦值, 并且通过阳极层霍尔推力器刻蚀模型计算得到有无阳极磁屏蔽时内磁极内表面和内磁极上表面的刻蚀速率分布.

在推力器的放电电压为 900 V, 工作气压为 2×10^{-2} Pa, 无阳极磁屏蔽时得到轰击内磁极上的入射离子数量与总的入射离子比值为 0.27, 存在阳极磁屏蔽时的比值降低到 0.25. 说明了入射离子束流密度在阳极磁屏蔽下降低了, 由 (5) 式可知刻蚀速率就会降低. 入射离子的能量越高溅射就越明显, 这点与离子推力器的栅极刻蚀是一样的 [21]. 同时得到如图 5 所示的入射离子的能量概率分布, 可

知在无阳极磁屏蔽时入射离子的能量大部分在 40—360 eV 之间, 通过阳极磁屏蔽以后的入射离子能量在 40—260 eV 的范围, 由此可知通过阳极磁屏蔽可以使得入射离子的能量整体降低 100 eV. 并且在 260—600 eV 之间无阳极磁屏蔽的粒子能量概率分布要明显高于有阳极磁屏蔽时的离子能量概率分布. 由 (5) 式可知入射离子的能量 E_0 降低, 则刻蚀速率就会降低. 所以从入射到内磁极上的离子能量概率分布来看阳极磁屏蔽技术可很大程度上降低磁极的刻蚀速率, 提高磁极的寿命.

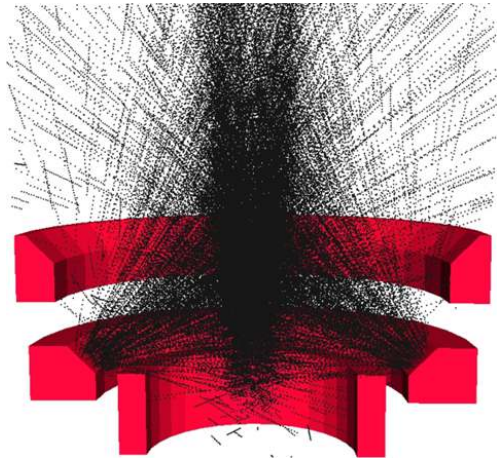


图 4 离子轨迹

Fig. 4. Ion trajectory.

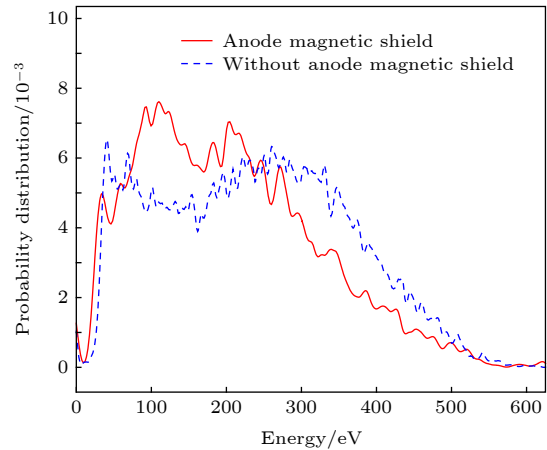


图 5 入射离子能量的概率分布

Fig. 5. Probability distribution of the incident ion energy.

图 6 是轰击离子入射到内磁极上表面和内表面的入射角余弦值的概率分布. 由图 6 可知无阳极磁屏蔽时最大概率分布位于入射角余弦值为 0.1 处 (入射角 84°), 且随着入射角余弦值的增加概率分布逐渐降低. 而阳极磁屏蔽下的入射角余弦值概率

分布主要在 0.1—0.45 (入射角 84° — 63°) 之间, 磁屏蔽的存在使得入射离子不沿着特定的一个小范围角度入射, 而是分散在内磁极表面上的各处入射, 这在一定程度上有利于降低内磁极的刻蚀.

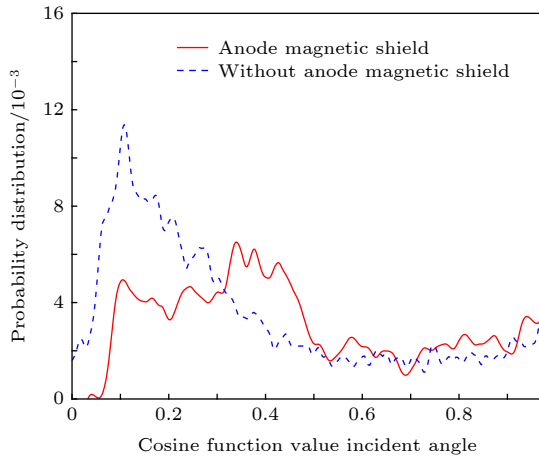


图 6 入射角余弦值的概率分布

Fig. 6. Probability distribution of the cosine of the incident angle.

图 7 为内磁极上表面的刻蚀速率在径向方向的分布, 沿着径向方向刻蚀速率是逐渐降低的. 无阳极磁屏蔽时, 最大刻蚀速率为 16×10^{-10} m/s, 在 0.019 m 处 (靠近内磁极内表面), 之后逐渐降低, 并在径向方向上的外边沿 0.0236—0.024 m 之间有一个明显的增加. 由图 7 可知阳极磁屏蔽时的刻蚀速率明显降低, 最大刻蚀速率为 6.1×10^{-10} m/s, 内磁极上表面的刻蚀速率比无阳极磁屏蔽时降低了 38.2%. 图 8 为内磁极内表面的刻蚀速率沿着轴向方向的分布情况, 在最底面的刻蚀速率接近于零, 从图 5 的离子轨迹图也可看出几乎没有离子入射到内磁极内表面的底面. 在轴向 -10 至 -4 mm 处的刻蚀速率几乎相同, 之后随着轴向方向的增加刻蚀速率逐渐增加, 在与内磁极上表面的交界处刻蚀速率达到最大值. 此刻蚀速率的分布与实验后的推力器内磁极刻蚀形貌类似 (如图 9 所示). 对比无阳极磁屏蔽的刻蚀速率走势与图 9 的 150 h 后的内磁极内表面和上表面的刻蚀形貌上是一致的. 一方面验证了此仿真计算方法的正确性, 另一方面也证实了阳极磁屏蔽技术不仅在提高引出束流能量方面有很重要的作用 [20], 而在降低内磁极的刻蚀方面也起到了很重要的作用. 对于降低内磁极的刻蚀速率, 提高推力器的寿命提供了一个可靠的研究方向.

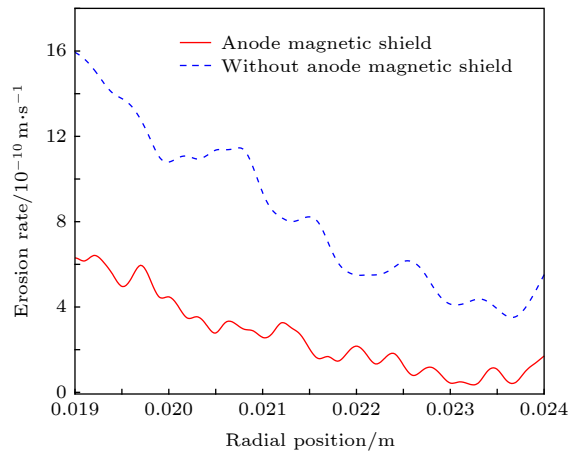


图 7 内磁极上表面刻蚀速率分布

Fig. 7. Distribution of etching rate on upper surface of inner magnetic pole.

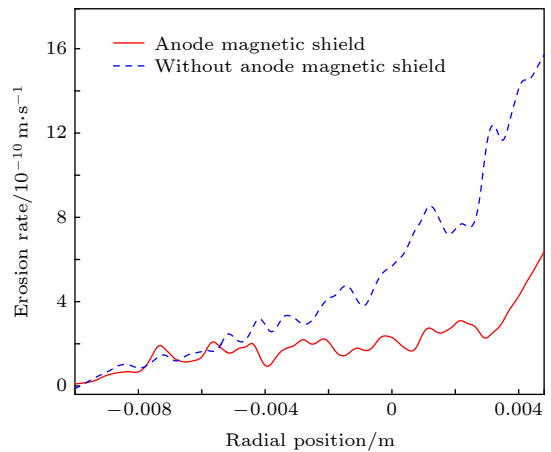


图 8 内磁极内表面刻蚀速率分布

Fig. 8. Distribution of etching rate on inner surface of inner magnetic pole.



图 9 实验后的内磁极刻蚀形貌图

Fig. 9. Photos of the inner magnetic pole after experiment.

5 总结

通过对阳极层霍尔推力器进行阳极层磁屏蔽技术设计, 改变阳极表面的磁场位形分布, 进而提

高了推力器磁镜场的磁镜比和中轴线上的正梯度的磁场宽度. 在 PIC 粒子模拟的基础上加入溅射仿真模块, 对放电电压 900 V, 气压 2×10^{-2} Pa 工况下的有无阳极磁屏蔽的推力器进行仿真刻蚀模拟, 结果表明: 在阳极磁屏蔽的情况下, 轰击内磁极的离子较大的能量概率分布范围在 40—260 eV 之间, 比无屏蔽下的 40—360 eV 下降了将近 100 eV; 入射离子从沿着 84° 附近的一个小范围的角度入射扩展到 63° — 84° 之间, 从而使得入射离子分散在内磁极表面上的各处入射. 阳极屏蔽后的内磁极最大刻蚀速率从 16×10^{-10} m/s 降低到 6.1×10^{-10} m/s, 降低了 38.2%. 对比无阳极磁屏蔽时的仿真结果和实验后的内磁极刻蚀形貌发现具有很好的一致性.

参考文献

- [1] Morozov A I, Savelyev V V 2000 *Rev. Plasma Phys.* **21** 203
- [2] Zhurin V V, Kaufman H R, Robinson R S 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** R15
- [3] Manzella D, Jankovsky R S, Hofer R R 2002 *38th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, Indiana, July 7–10, 2002 AIAA-2002-3676
- [4] Robert S J, David T J, Charles J S 2002 *38th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Indianapolis, Indiana, July 7–10, 2002 AIAA-2002-3675
- [5] Garrigues L, Hagelaar G J M, Bareilles J, Boniface C, Boeut J P 2003 *Phys. Plasmas* **10** 4886
- [6] Cao H J, Li Q G, Shan K, Cao Y, Zheng L 2015 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** 130
- [7] 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]
- [8] Ross J L, Sommerville J D, King L B 2010 *J. Propul. Power* **26** 1312
- [9] Zhao J, Tang D L, Geng S F 2009 *J. Astronautics* **30** 690 (in Chinese) [赵杰, 唐德礼, 耿少飞 2009 宇航学报 **30** 690]
- [10] Garner C E, Brophy J R 1994 *30th Joint Propulsion Conference and Exhibit* Indianapolis, June 27–29, 1994 AIAA-94-3010
- [11] Kristi de G, Jack F, Fred W, Brian B, John D 2004 *40th Joint Propulsion Conference and Exhibit* Fort Lauderdale, Florida, July 11–14, 2004 AIAA-2004-3603
- [12] Welander B, Carpenter C, Kristi D G 2006 *42th Joint Propulsion Conference and Exhibit* Sacramento, California, July 9–12, 2006 AIAA-2006-5263
- [13] Richard R H, Mikellides I G, Katz I, Goebel D M 2007 *30th International Electric Propulsion Conference* Florence, Italy, September 17–20, 2007 IEPC Paper 2007–267
- [14] Sommier E, Allis M K, Cappelli M A 2005 *Presented at the 29th International Electric Propulsion Conference* Princeton, October 31–November 4, 2005 p189
- [15] John T Y, Michael K 2005 *Presented at the 29th International Electric Propulsion Conference* Princeton, October 31–November 4, 2005 p13
- [16] Li H B, Tang D L, Nie J W 2015 *Nuclear Fusion & Plasma Phys.* **35** 181 (in Chinese) [李宏斌, 唐德礼, 聂军伟 2015 核聚变与等离子体物理 **35** 181]
- [17] Zhang F, Tang D L, Nie J W 2016 *J. Propulsion Technol.* **37** 386 (in Chinese) [张帆, 唐德礼, 聂军伟, 李平川 2016 推进技术 **37** 386]
- [18] Tang D L, Zhao J, Wang L S, Pu S H, Cheng C M, Chu P K 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 123305
- [19] Zhao J, Tang D L, Geng S F, Wang S Q, Liu J, Xv L 2010 *Plasma Sci. Technol.* **12** 109
- [20] Zhao J, Tang D L, Li P C 2018 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **38** 708 (in Chinese) [赵杰, 唐德礼, 李平川, 耿少飞 2018 真空科学与技术学报 **38** 708]
- [21] Zhou Z C, Wang M, Zhong X Q, Chen J J, Zhang T P 2015 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **35** 1088 (in Chinese) [周志成, 王敏, 仲小清, 陈娟娟, 张天平 2015 真空科学与技术学报 **35** 1088]

Effect of anode magnetic shield on inner magnetic pole etched in anode layer Hall thruster^{*}

Zhao Jie^{1)2)†} Tang De-Li¹⁾ Xu Li¹⁾²⁾ Li Ping-Chuan¹⁾

Zhang Fan¹⁾ Li Jian¹⁾²⁾ Gui Bing-Yi²⁾

1) (*Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China*)

2) (*Engineering and Technical College, Chengdu University of Technology, Leshan 614007, China*)

(Received 1 May 2019; revised manuscript received 7 August 2019)

Abstract

For anode layer Hall plasma thruster, the etching of inner magnetic pole is one of the key factors affecting its service life. In order to solve the problem of inner magnetic pole etching in anode layer Hall plasma thruster, the effect of anode magnetic shield on inner magnetic pole etched in anode layer Hall thruster is studied by combining particle simulation PIC with sputtering simulation. The magnetic shielding of anode changes the distribution of magnetic field configuration on the surface of the anode, and improves the magnetic mirror ratio of the magnetic mirror field of the thruster to the magnetic field width of the positive gradient on the central axis. The ratio of the magnetic mirror is 1.4 times that of the original one, and two additional saddle magnetic fields are added on both sides of the original saddle magnetic field region. It not only is conducive to confining electrons and improving the ionization rate of working gas, but also keeps a certain distance between the anode and the high temperature electron region, which provides the reliable reference data for the design of high power Hall plasma thruster. When the discharge voltage is 900 V and the working pressure is 2×10^{-2} Pa, the simulation results show that after the anode is shielded by the magnetic shield, the energy range of most of the incident ions on the inner magnetic pole is 40–260 eV, which is 100 eV lower than the energy range 40–360 eV in the case without shielding the anode. The probability distribution of particle energy without magnetically shielding the anode between 260 eV and 600 eV is obviously higher than that of ion energy with magnetically shielding the anode. The maximum probability distribution of cosine value of incident angle is extended from a small range near 0.1 (incident angle 84°) to a large range of 0.1–0.45 (incident angle 84° – 63°). The magnetic shielding makes the incident ions disperse on the surface of the inner magnetic pole, which is helpful in reducing the etching of inner magnetic pole. The maximum etching rate of inner magnetic pole after the anode has been magnetically shielded is reduced from 16×10^{-10} m/s to 6.1×10^{-10} m/s, which is 2.62 times lower. The comparison of simulation results with experimental results in the case without magnetically shielding the anode shows that they are in good agreement.

Keywords: anode layer Hall thruster, magnetic shield, incident ion energy, etching rate

PACS: 52.75.Di, 29.25.Ni, 52.65.Rr

DOI: 10.7498/aps.68.20190654

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11775073) and the Sichuan Provincial Foundation for Program of Science and Technology, China (Grant No. 2019YJ0705).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaojie585@126.com