# 基于 PIC-MCC 方法的溅射离子泵抽速计算方法

王耀之, 刘奕新, 张华鹏, 张志军 (东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110004)

摘要:基于溅射离子泵潘宁放电单元的实际工作条件,采用 PIC-MCC 方法建立了相应的仿真模型,并利用开 源代码 picFoam 对单个潘宁放电单元进行了模拟分析。结合仿真结果与现有理论,通过计算离子入射参数,得到 了溅射出的钛原子数量,并进一步结合阳极筒参数计算单个潘宁放电单元的抽速和溅射离子泵的整体抽速。分 析了不同工作压力下离子的入射位置、入射能量及入射角度的分布规律,计算了单个潘宁放电单元的抽速。最终, 基于阳极筒的排列方式得出溅射离子泵的整体抽速,计算结果与理论值对比显示出良好的一致性。

关键词:溅射离子泵; PIC-MCC 方法; 潘宁放电; 人射参数; 抽速计算

中图分类号:TB752 文献标志码:A 文章编号:1006-7086(2025)03-0405-07 DOI: 10.12446/i.issn.1006-7086.2025.03.017

# Calculation Method of Sputtering Ion Pump Pumping Speed Based on PIC-MCC Method

WANG Yaozhi, LIU Yixin, ZHANG Huapeng, ZHANG Zhijun (School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastren University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Based on the actual operational conditions of the sputtering ion pump's Penning discharge unit, a corresponding simulation model was established by utilizing the PIC-MCC (Particle-In-Cell Monte Carlo Collision) method. The PIC-MCC method is a powerful numerical approach. The Article-In-Cell part enables accurate tracking of charged particles' trajectories in electromagnetic fields, while the Monte Carlo collision part effectively simulates various collision processes between particles, such as elastic and inelastic collisions. After establishing the simulation model using the PIC-MCC method, the open-source code picFoam was employed to perform simulations on a single Penning discharge unit. Through a series of simulations, a large amount of data on ion incident parameters was collected. These parameters included ion velocity, direction, and position.Integrating these simulation results with well-established theoretical frameworks in the field of vacuum physics, the number of sputtered titanium atoms was accurately calculated. Furthermore, by taking into account the geometric and physical parameters of the anode cylinder, which has a significant impact on the electric field distribution and ion movement within the discharge unit, the pumping speed of a single Penning discharge unit and the overall pumping speed of the sputtering ion pump were computed. In addition, a detailed analysis was carried out on the distribution patterns of ion incidence positions, incident energies, and incident angles under different working pressures. These analyses revealed the influence of pressure on the performance of the Penning discharge unit. The results demonstrated that the computed values of the pumping speed of a single Penning discharge unit and the overall pumping speed of the sputtering ion pump were in excellent agreement with the theoretical values. This research not only provides a more in-depth understanding of the sputtering ion pump's working mechanism but also offers practical guidelines for the design and optimization of sputtering ion pumps.

Key words: sputter-ion pump; PIC-MCC method; Penning discharge; incident parameters; pumping speed calculation

0 引言

溅射离子泵是一种气体捕集类真空获得设备。

自 1958 年 Hall 完成了对溅射离子泵的改良后,溅 射离子泵由单筒结构,改为了多筒结构,抽气性能

#### 收稿日期:2024-11-04

基金项目:国家自然科学基金(U20A20292);中国航空工业空气动力研究院高超声速气动力与热技术重点实验室基金; 中国科学院环境光学与技术重点实验室开放基金(2005DP173065-2022-02)

作者简介: 王耀之, 硕士研究生。E-mail: 275244767@qq.com

得到大幅提升,广泛应用于航空航天、物理实验等 诸多领域中<sup>[1]</sup>。

目前,关于溅射离子泵抽速的理论计算已形成 较为完备的体系,但这些理论大多基于经验公式进 行计算。相比之下,利用模拟仿真方法对溅射离子 泵抽速进行研究的相关理论尚未完善,且该领域的 研究仍有较大的发展空间。Malev 等<sup>[2]</sup> 根据 Popov 的潘宁放电理论首次给出了计算溅射离子泵抽速 以及溅射离子泵极限压力的方法,但该方法并未考 虑阴极板与阳极筒之间的间隔对抽速的影响,且在 工作压力较低的情况下误差较大。Hartwig 等<sup>[3]</sup> 根 据 Suhuurman 的放电理论给出了一种较为完备的 溅射离子泵抽速计算方法,该方法通过磁场强度判 断潘宁放电模式,进而计算单个潘宁放电单元的理 论抽速,但该方法并未考虑离子入射后产生的溅射 产额对抽速的影响,存在一定误差。何炜等<sup>[4]</sup>总结 前人理论,根据 Suhuurman 气体放电理论, Sigmund 溅射理论和 Langmuir 的吸附理论给出了一种更加 准确的计算抽速的方法,但是在该方法中入射离子 的入射参数差异未被考虑。宁久鑫等<sup>[5]</sup> 通过使用 COMSOL 软件模拟潘宁放电过程与离子入射过程, 通过离子电流计算了溅射离子泵抽速,但在低压力 环境下采用 COMSOL 的流体力学模型模拟等离 子体会出现较大误差。Ha 等<sup>16</sup>采用 PIC-MCC 算法 OOPIC 分析了单一压力下入射阴极板的氮气 离子分布,并计算了相应的溅射产额,但没有给出 不同工作压力下溅射离子泵的抽速变化。耿健等<sup>[7]</sup> 使用 VSIM 的二维模型模拟潘宁放电, 通过 PIC-MCC 方法得到了入射离子的入射能量、入射角度 等入射参数,并结合何炜等的计算方法计算出溅射 离子泵抽速,但二维模型可能会对潘宁放电结果带 来一定误差,需要在其基础上,使用三维模型进行 模拟。

本文使用基于 OpenFOAM 开发的 PIC-MCC 模拟代码 picFoam<sup>[8]</sup> 对溅射离子泵单个潘宁放电单 元进行模拟,并结合现有理论计算,总结 PIC-MCC 计算溅射离子泵的抽速的方法。并通过统计模拟 结果,分析离子入射参数分布对溅射离子泵抽速的 影响。

# 1 PIC-MCC 理论

## 1.1 粒子碰撞模型

在以氮气为背景气体的潘宁放电空间中,存在 以下粒子:(1)电子 e、(2)氮气离子  $N_2^+$ 、(3)氮气离 子 N<sub>2</sub><sup>++</sup>、(4)氮离子 N<sup>+</sup>以及(5)中性气体分子 N<sub>2</sub>。 由于碰撞产生氮气离子 N<sub>2</sub><sup>++</sup>以及氮离子 N<sup>+</sup>所需电 子能量较大,故不考虑空间中 N<sub>2</sub><sup>++</sup>以及 N<sup>+</sup>的存在<sup>[9]</sup>。 在 PIC-MCC 方法中并不需要考虑空间中存在的所 有碰撞,可使用 Tomonor 等<sup>[10]</sup>的方法通过计算不 同物质之间的密度比,判断可以忽略的碰撞反应。

经过计算,在  $10^{-5}$ ~ $10^{-3}$  Pa 工作压力范围内,需 要考虑的碰撞反应为:电子与氮气分子的电离碰撞  $e + N_2 \rightarrow N_2^+ + 2e$ ,电子与氮气分子的弹性碰撞  $e + N_2 \rightarrow N_2 + e$ ,电子与氮气分子的激发碰撞  $e + N_2 \rightarrow N_2^* + e$ ,电子与氡气分子的激发碰撞  $e + N_2 \rightarrow N_2^* + e$ ,电子与电子的碰撞:  $e + e \rightarrow e + e^{[11]}$ 。

1.1.1 库伦碰撞模型

潘宁放电中电子与电子之间的库伦碰撞是单 个电子失去能量的主要途径<sup>[12]</sup>。在 PIC-MCC 方法 中,带电粒子之间的碰撞采用 Nanbu 提出的方法进 行计算。在这种方法中,粒子之间的多次小散射角 碰撞被累计为一种独特的大散射角碰撞。这种计 算方法需要模拟空间中碰撞粒子足够多,且由于在 速度的计算中,假设粒子为非相对论状态,并采用 了非相对论状态下的计算公式,因此需要空间中粒 子不处于相对论状态<sup>[13]</sup>。

在溅射离子泵潘宁放电的模拟中,电子的数量 较多且平均能量约为 300 eV,未处于相对论状态。 基于这样的特性, Nanbu 的计算方法能够在潘宁放 电模拟中展现出良好的适用性。

1.1.2 电子与中性分子的碰撞

作为潘宁放电中离子的主要来源,电子与中性 分子的碰撞的计算影响着溅射离子泵的抽速计算 精准度。

在 picFoam 中,电子与中性分子之间的碰撞计 算使用了无碰撞方法<sup>[14]</sup>,这种方法根据单个粒子不 发生碰撞所经历的时间分布来计算单个粒子发生 碰撞的概率。粒子碰撞后的速度以及电离碰撞后 产生的电子速度通过对粒子碰撞前能量进行随机 分配得到。

无碰撞方法适用于在均匀电场下的粒子碰撞 计算,在溅射离子泵的潘宁放电模拟中,由于溅射 离子泵中所加的电场远大于放电过程中等离子体 本身产生的电磁场,电场随时间的变化较小,因此 无碰撞方法适用于溅射离子泵的潘宁放电模拟。

1.2 仿真模型

1.2.1 几何模型

单个潘宁放电单元采取经典的圆筒状阳极结构<sup>[15]</sup>,该溅射离子泵单个潘宁放电单元如图1所示,

模拟空间由阳极筒、阴极板组成,潘宁放电单元中 的具体参数如表1所列。



图 1 溅射离子泵中单个潘宁放电单元几何结构

Fig. 1 Geometric structure of a single Penning discharge unit in a sputtering ion pump

表1 溅射离子泵单个潘宁放电单元参数

 Tab. 1 Parameters of a single Penning discharge unit

 in a sputtering ion pump

尺寸名称	值
阳极筒半径/mm	10
阴阳极间距/mm	6
阳极筒长度/mm	19
磁感应强度/T	0.15
工作电压/V	5 000

在溅射离子泵的实际工作中,由于阳极、阴极 外接电路,阳极与阴极的电压稳定保持不变,因此 在 picFoam 的模拟中对阳极、阴极边界选择恒定电 压模型,保证阳极、阴极电压稳定不变。

1.2.2 网格划分

在进行仿真前需要对几何模型进行网格划分, 对于 PIC-MCC 方法,需要保证模拟空间内网格长 度小于等离子体的德拜长度 $\lambda_{D}^{[16]}$ 。在 5 000 V 电压 的条件下平均电子温度T 约为 300 eV,电子在空间 中的电子最大密度 $n_e$ 约为 2×10<sup>16</sup> m<sup>-3</sup>,平均密度 $\overline{n_e}$ 为 3.5×10<sup>15</sup> m<sup>-3</sup>。计算得到潘宁放电等离子体的德 拜长度 $\lambda_{D}$ 约为 0.875 mm,即在模拟空间中网格的 最大尺寸应该小于 0.875 mm。使用网格划分软件 ICEM 绘制结构化网格,空间中网格平均尺寸为 0.37 mm,最大网格尺寸为 0.51 mm,符合要求。

1.2.3 边界条件

溅射离子泵潘宁放电模拟的时间步长Δt由等 离子体的等离子体频率ω<sub>p</sub>、电子回旋频率ω<sub>e</sub>约束。 潘宁放电模拟的时间步长Δt与电子等离子体频率 ω<sub>p</sub>的乘积应小于 0.2, 与电子回旋频率ω<sub>p</sub>的乘积也 应小于 0.2。通过计算得到等离子体频率 $\omega_p$ 为 2.5×10<sup>9</sup> rad/s,电子回旋频率 $\omega_e$ 为 2.89×10<sup>9</sup> rad/s,即潘宁放电模拟的时间步长应小于 7.9×10<sup>-11</sup> s 与 6.9×10<sup>-11</sup> s,最终选取时间步长为 1×10<sup>-11</sup> s。

## 2 溅射离子泵抽速计算方法

在通过仿真模拟获得离子电流(入射离子数) 以及离子的入射参数等相关参数后,需要通过这些 参数对溅射离子泵抽速进行计算。根据 Jepesen 的 分析,溅射离子泵在稳定状态下抽除氮气的主要工作 原理是附着在阳极筒壁上钛原子对氮气分子的化学 吸附,因而在计算对氮气的抽速时只需考虑附着在 阳极筒壁上的钛原子对氮气的化学吸附即可<sup>[17]</sup>。

2.1 附着在阳极筒壁上的活性钛原子数计算

在离子入射阴极板(钛板)后,阴极板表面的钛 原子被溅射出来,被溅射出的原子数目被称为溅射 产额。溅射产额与离子入射参数相关,对于溅射产 额的计算,使用优化的 Sigmund 溅射理论<sup>[18-19]</sup>计算 离子入射时的溅射产额*Y*(φ)。

根据 Ha 等<sup>[6]</sup>的理论, 被溅射出钛原子附着在 阳极筒壁上的概率与其被溅射出的位置r有关, 即 为*J*(*r*)。

结合从阴极板被溅射出的钛原子数,可以计算 得到附着在阳极筒壁上的活性钛原子数,将不同半 径下的溅射产额Y(r)与附着概率J(r)的乘积累加, 得到附着在阳极筒壁上的活性钛原子数N<sub>Ti</sub>。

2.2 单个潘宁放电单元抽速计算

计算单个潘宁放电抽气单元的抽速,采用何炜 等<sup>[4]</sup>的理论,阳极壁面上钛原子覆盖率保持动态平 衡。平衡状态下阳极壁面上每秒吸附的氮气分子 数*N*<sub>a</sub>应等于溅射出的钛原子每秒所覆盖的氮原子 数*N*<sub>b</sub>,以此建立方程并对其求解,溅射离子泵单个 潘宁放电单元对氮气的抽速*s*为:

$$s = \frac{6 \times 10^{-23} N_{\text{Ti}} \left[ g + 2 - (g^2 + 4g)^{\frac{1}{2}} \right]}{p} \tag{1}$$

式中: s为溅射离子泵单个潘宁放电单元对氮气的 抽速, L/s; g为辅助参数,  $g = 3 \times 10^{-23} \frac{N_{\text{T}}}{AP}$ ; p为工作 压力, Pa; A为阳极壁面面积, m<sup>2</sup>。

至此,通过仿真结果与其他相关参数计算得到 了溅射离子泵单个潘宁放电单元对氮气的抽速。

2.3 对单个潘宁放电单元抽速修正

以上计算只考虑了阳极壁面上活性钛原子对 氮气分子的吸附速率,并没有考虑放气现象对潘宁 放电单元的影响。在实际工作中,当放电空间内的 放电强度过大,空间温度会随之上升,阳极壁面的 放气现象会加剧,会对抽速产生较大的影响。因此, 为了进一步提高抽速计算的精准度,需要考虑放气 现象对抽速的影响。

使用 COMSOL 中的传热模块与电流模块,模 拟获得溅射离子泵工作时的温度。温度模拟中所 需要的放电强度,通过积累轰击到阳极、阴极的带 电粒子获得。获得溅射离子泵工作温度后,计算获 得阳极表面的放气量<sup>[20]</sup>,修正后的抽速即为 2.2 节 中计算结果与放气量的差值。

2.4 溅射离子泵抽速计算

在实际工作中溅射离子泵内部有多个潘宁放 电单元进行抽气工作,在计算溅射离子泵整体抽速 时可以认为所有相同的放电单元拥有相同的抽速, 结合 Hartwig 的流导修正模型<sup>[2]</sup>, 溅射离子泵的整体抽速 $S_{\text{eff}}$ 即为:

$$S_{\rm eff} = ns \frac{\tanh(D)}{D}$$
 (2)

式中: *S* eff 为溅射离子泵的整体抽速, L/s; *n*为溅射 离子泵中阳极筒数量; *D*为流导系数。

流导系数D与抽气单元参数有关。抽气单元 是指多个阳极筒排列组成的结构,单个抽气单元有 着多个潘宁放电单元。

2.5 计算过程与步骤

溅射离子泵抽速计算方法的流程如图 2 所示, 通过模拟方法得到入射离子参数,并计算溅射产额, 获得附着在阳极筒壁上的活性钛原子数。结合阳 极壁面的放气量,计算单个潘宁放电单元抽速。最 后通过流导修正,对溅射离子泵整体抽速进行计算。



# 图 2 溅射离子泵抽速计算方法的流程图



## 3 结果与分析

#### 3.1 离子电流

离子电流是表征溅射离子泵工作性能的重要 指标,由离子在电磁场的作用下轰击阴极产生。在 仿真计算中,离子电流通过统计入射离子数得到, 即入射离子数与点电荷的乘积。而在实验测试中, 电流通过测量整个放电回路的电流得到,即为电子 电流与离子电流的和,这也是实验测试值偏小的原 因,如图 3~6 所示。

将通过仿真模拟获得的离子电流与耿健等<sup>[7]</sup> 的实验结果相对比,对比结果如图 3 所示,仿真电 流与实验测量结果变化趋势相似,都是随着工作压 力的下降而减小。

















Fig. 5 Distribution of ion incident energy under different working pressures





3.2 入射参数

离子入射阴极后的入射参数对溅射离子泵的 抽速起着关键作用,为了获得更加准确的结果,需 要对入射参数的分布进行分析与讨论。

### 3.2.1 入射位置分布

通过 picFoam 得到的离子入射位置分布如图 4 所示,该分布与 Ha 等<sup>[6]</sup>得到的结果是一致的。从 图中可以得知,在溅射离子泵潘宁放电单元中,大 部分的离子都在阳极筒的中轴线附近入射阴极,且 入射离子密度随着半径的增大而减小。大部分的 离子在中心处入射是溅射离子泵实际使用中阴极 板被击穿的主要原因。

#### 3.2.2 入射能量分布

不同半径下入射离子的平均能量分布如图 5 所示,从图中可以得知,离子入射能量随着半径的 增大而增大,这与 Ha 等<sup>[6]</sup>的结果相同,而根据 Ha 等 的理论,这种能量的增大可能是在半径较大位置的 边缘处,电场因靠近阳极板而变强,边缘附近离子 的能量进而变大。

## 3.2.3 入射角度分布

离子的入射角度是离子的入射阴极板时,离子 速度方向与阳极筒中轴线的夹角。不同半径下入 射离子的平均角度分布如图 6 所示,离子的入射角 度总体上呈先递减后递增的复杂形状,这种变化与 离子的速度有关,在半径较小时离子的径向速度占 主导,入射角度较大,而随着半径的增大径向速度 也随之增大,轴向速度逐渐占主导,入射角度降低, 但是在半径较大的边缘区域内,由于电场变强径向 速度再次占主导,入射角度再次增大<sup>[6]</sup>。从离子的 入射角度分布可以得到,入射粒子的入射角度都较 低,而根据田野<sup>[21]</sup>的结论,入射角度越接近粒子入 射时产生最大溅射产额的夹角θ<sub>max</sub>,溅射产额越大, 而根据田野的结论,最大溅射产额夹角约为 70°,这 说明大部分的入射离子都以较低的效率溅射钛 原子。

3.3 抽速计算

结合第2节内容,依据入射离子数以及离子的入射参数,对单个溅射离子泵潘宁放电单元的抽速展开计算,并将计算结果与Hartwig的理论结果<sup>[2]</sup>作对比,对比结果如图7所示,计算结果与理论结果变化趋势相同,一致性良好。

由图 7 可以发现, 抽速随工作压力的变化出现 了拐点。拐点在 Hartwig 的理论抽速计算中同样出 现, 在其理论中, 拐点被认为是磁场与工作压力共 同导致的, 当放电空间中磁场保持不变时, 存在 一个可以获得最佳抽速的工作压力,称为过渡压力。 在磁场条件不发生变化的前提下, 当工作压力大于 过渡压力时, 抽速会随工作压力的减小而增大, 当 工作压力小于过渡压力时,抽速会随着工作压力的 减小而减小<sup>[2]</sup>。







为了进一步探究抽速计算结果的精准度,采用 与刘亦兵等<sup>[22]</sup>研制的LH-300型冷阴极泵相似的 阳极筒排列方式对溅射离子泵整体抽速进行计算。

单个抽气单元的结构与参数如图 8 所示,在溅 射离子泵内部存在 8 个类似的抽气单元。确定阳 极筒排列方式与抽气单元参数后,对单个潘宁放电 单元抽速进行修正,并结合抽气单元参数对溅射离 子泵整体抽速进行计算,溅射离子泵的计算抽速与 实验结果对比如图 9 所示,计算抽速与实验测量抽 速的相对误差为 4.4%。







虽然理论计算值与实验测量值存在一定差异, 但抽速的计算结果可以反映溅射离子泵的抽气特 性,这种通过模拟仿真计算溅射离子泵潘宁放电单 元抽速的方法可以作为设计或改进溅射离子泵性 能的参考依据。



Fig. 9 Comparison of overall pumping speed of sputtering ion pump under different working pressures

## 4 结论

采用 PIC-MCC 方法对溅射离子泵单个潘宁放 电单元进行模拟,通过模拟获得单个潘宁放电单元 的离子电流(入射离子数)、入射能量、入射角度等 相关参数,并通过计算得到单个潘宁放电单元的抽 速。仿真得到的离子电流与实验测试变化趋势一 致,将计算得到的抽速与现有实验测量值对比,相 对误差不超过 5%。

对不同工作压力下的离子入射参数以及抽速 进行了分析。在 10<sup>-5</sup>~10<sup>-3</sup> Pa 压力下,工作压力的 变化对放电空间内电子的运动规律以及离子的入 射参数影响较小,离子的入射位置分布、入射能量 分布、入射角度分布在不同工作压力下变化趋势 相似。

尽管本文对溅射离子泵单个潘宁放电单元抽 速计算值与理论值对比一致性好,结果可靠,但是 还需要进一步的实验验证。且当前模拟仅局限于 单个潘宁放电单元,为了获得更加精准的抽速,在 后续研究工作中,有必要对计算方法予以进一步优化。

#### 参考文献:

- SINGLETON J H. The performance characteristics of modern vacuum[J], Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1973, 6(8): 685.
- [2] MALEV M D, TRACHTENBERG E M. Built-in getter-ion pumps[J]. Vacuum, 1973, 23(11): 403–409.

- [3] HARTWIG H, KOUPTSIDIS J S. A new approach for computing diode sputter-ion pump characteristics[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1974, 11(6): 1154–1159.
- [4] 何炜, 王仁康, 耿天鹏, 等. 溅射离子泵的抽速计算 [J]. 真 空科学与技术, 1982(4): 199-208.
- [5] 宁久鑫,黄海龙,王晓冬,等.溅射离子泵抽气单元放电及 离子输运仿真 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(7):962-967.
- [6] HA T, CHUNG S, PARK C D. Optimization of cell geometry for a conventional sputter ion pump by a particle-in-cell simulation[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films, 2009, 27(3): 485–491.
- [7] 耿健, 王晓冬, 郭美如, 等. 微型溅射离子泵的阳极筒长度 对抽气特性的影响 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(11): 1596-1603.
- [8] KÜHN C, RODION G. picFoam: An OpenFOAM based electrostatic Particle-in-Cell solver[J]. Computer Physics Communications, 2021, 262(1): 107853.
- [9] 耿健, 郭美如, 王晓冬, 等. 微型溅射离子泵放电模拟与抽 气特性研究 [J]. 真空与低温, 2021, 27(1): 45-51.
- [10] TOMONOR T, ABE H. A binary collision model for plasma simulation with a particle code[J]. Journal of Computational Physics, 1977, 25(3): 190–205.
- [11] SONG, M Y, CHO H, KARWASZ G P, et al. Cross sections for electron collisions with N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>\*</sup>, and N<sub>2</sub><sup>+</sup>[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2023, 52(2): 023104.
- [12] ISOARDI T, FERRETTI A, BONMASSAR L, et al. Modeling and simulation of sputter-ion pump performances[J]. Vacuum, 2023, 209(3): 111792.

- [13] NANBU K. Theory of cumulative small-angle collisions in plasmas[J]. Physical Review E, 1997, 55(4): 46–52.
- [14] NANBU K. Probability theory of electron-molecule, ion-molecule, molecule-molecule, and coulomb collisions for particle modeling of materials processing plasmas and cases[J].
   IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(3): 971–990.
- [15] JEPSEN R L. The physics of sputter-ion pumps[C]//Proceedings of the 4th International Vacuum Congress, 1968: 317-324.
- [16] ROKHMANENKOV A S, KURATOV S E. Numerical simulation of penning gas discharge in 2D/3D setting[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1250(1): 12–36.
- [17] SCHUURMAN W. Investigation of a low pressure Penning discharge[J]. Physica, 1967, 36(1): 136–160.
- [18] SIGMUND P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets[J]. Physical Review, 1969, 184(2): 383-416.
- [19] SEAH M P, CLIFFORD C A, GREEN F M, et al. An accurate semi-empirical equation for sputtering yields I: For argon ions[J]. Surface and Interface Analysis, 2005, 37(5): 444–458.
- [20] 刘玉魁,杨建斌,肖祥正,等.真空工程设计[M].北京:化 学工业出版社,2016.
- [21] 田野. 溅射离子泵阴极板溅射过程的模拟分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [22] 刘亦兵,张本义,秦明,等.LH-300 型冷阴极抽氢溅射离 子泵的研制 [J]. 真空, 1980(3): 28-38.

(责任编辑:郭 云)

WANG Y Z, LIU Y X, ZHANG H P, et al. Calculation method of sputtering ion pump pumping speed based on PIC-MCC method[J]. Vacuum and Cryogenics, 2025, 31(3): 405–411.

**引文信息:**王耀之,刘奕新,张华鹏,等.基于 PIC-MCC 方法的溅射离子泵抽速计算方法[J].真空与低温,2025,31(3): 405-411.