

潘宁离子源放电过程仿真分析

连百万, 王瑞洁, 程宇, 靳莹

安阳学院计算机科学与数学学院, 河南 安阳

收稿日期: 2026年9月23日; 录用日期: 2026年10月16日; 发布日期: 2026年10月23日

摘要

为了进一步研究低气压条件下潘宁离子源内部等离子体的形成过程及空间分布特征, 本文建立了简化的氢潘宁离子源三维物理模型, 并采用粒子模拟与蒙特卡罗碰撞相结合的PIC/MCC方法, 对离子源内部带电粒子的输运、碰撞和电离过程进行了数值模拟。模型中考虑了电子与氢气分子之间的弹性碰撞、激发和电离过程, 以及相关离子和中性粒子的输运行为。在阳极筒施加约2 kV电压、轴向磁场强度为0.2 T的条件下, 实现了离子源内部的自持放电, 并分析了电势、磁场以及 H_2^+ 离子密度的空间分布特征。模拟结果表明, 电场和轴向磁场共同决定了电子在离子源内部的运动轨迹, 其中磁场能够显著延长电子在放电区域内的有效运动路径, 提高电子与中性氢气发生碰撞和电离的概率。随着放电过程逐渐建立, 离子源中心区域形成较高的等离子体密度, H_2^+ 离子主要集中于轴向中心区域, 并在径向上表现出较明显的中心峰值分布。该分布特征有利于后续采用轴向引出方式获得离子束。研究结果可为进一步理解潘宁放电机理、优化离子源结构以及设计离子引出系统提供一定的理论依据。

关键词

潘宁放电, PIC, 等离子体分布, 粒子模拟

Simulation Analysis of the Discharge Process in a Penning Ion Source

Baiwan Lian, Ruijie Wang, Yu Cheng, Ying Jin

School of Computer Science and Mathematics, Anyang University, Anyang Henan

Received: September 23, 2026; accepted: October 16, 2026; published: October 23, 2026

Abstract

To further investigate the formation process and spatial distribution characteristics of plasma inside a Penning ion source under low-pressure conditions, a simplified three-dimensional physical

model of a hydrogen Penning ion source was established. Numerical simulations of charged-particle transport, collisions, and ionization processes within the ion source were performed using the particle-in-cell/Monte Carlo collision (PIC/MCC) method. The model accounts for elastic collisions between electrons and hydrogen molecules, and excitation and ionization of hydrogen molecules by electrons, as well as the transport behavior of the associated ions and neutral particles. Under an applied anode-cylinder voltage of approximately 2 kV and an axial magnetic field strength of 0.2 T, self-sustained discharge was achieved within the ion source, and the spatial distributions of the electric potential, magnetic field, and H_2^+ ion density were analyzed. The simulation results show that the electron trajectories inside the ion source are jointly governed by the electric field and the axial magnetic field. In particular, the magnetic field significantly extends the effective electron path length within the discharge region, thereby increasing the probability of electron collisions with and ionization of neutral hydrogen molecules. As the discharge gradually develops, a relatively high plasma density is established in the central region of the ion source. The H_2^+ ions are mainly concentrated around the axial center and exhibit a pronounced centrally peaked distribution in the radial direction. Such a distribution is favorable for subsequent ion-beam extraction along the axial direction. The results provide a theoretical basis for further understanding the Penning discharge mechanism, optimizing the ion-source structure, and designing the ion-extraction system.

Keywords

Penning Discharge, Particle-in-Cell, Plasma Distribution, Particle Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

潘宁离子源是一类典型的冷阴极气体放电离子源，其基本思想可以追溯到 20 世纪 30 年代提出的潘宁放电结构。与普通辉光放电相比，潘宁放电通过在电场基础上引入与放电结构相匹配的磁场，使电子在放电区域内受到较强约束，从而显著增加电子的运动路径和有效碰撞次数。因此，即使在较低气压条件下，也能够维持较稳定的气体放电，并获得一定密度的等离子体。

由于具有结构相对简单、工作气压低、可靠性较高以及能够产生较高密度离子等特点，潘宁离子源在粒子加速器、中子发生器、质谱分析、真空测量和空间推进等领域具有较为广泛的应用。尤其是在基于氢氢反应或氢氟反应的中子发生装置中，离子源产生的氢离子束质量直接影响后续束流输运、靶上核反应效率及最终中子产额。因此，研究潘宁离子源内部氢等离子体的产生过程和空间分布规律，对于优化离子源性能具有重要意义。

近年来，随着计算机性能以及等离子体数值计算方法的发展，利用数值模拟研究离子源内部复杂放电过程逐渐成为重要手段，西南科技大学的杨超和龙继东使用蒙特卡罗方法研究了潘宁离子源放电的全三维电磁粒子模拟数值算法[1]，西京学院的李杰和巨少杰分别对对置潘宁离子源和双向潘宁离子源进行了实验与模拟研究[2]，通过一系列探索取得了特定成果。已有研究采用蒙特卡罗方法、有限元方法以及粒子模拟方法，对潘宁离子源中的粒子运动、电磁场分布和放电特性进行了研究。例如，相关研究对轴向磁场条件下的 PIG/Penning 离子源放电行为进行了数值模拟，并讨论了工作气压、磁场强度和电极结构对等离子体分布的影响。

然而，潘宁放电属于典型的低气压非平衡等离子体过程，电子、离子和中性粒子的时间尺度与空间

尺度存在明显差异。同时，电子在电场和磁场共同作用下呈现复杂的回旋、漂移和碰撞运动，仅依靠宏观流体模型难以完整描述非平衡电子的动力学行为。因此，从粒子尺度出发分析电子与中性气体之间的碰撞、电离及带电粒子的空间输运具有重要价值。

基于此，本文建立简化的三维氢潘宁离子源模型，通过粒子模拟与蒙特卡罗碰撞相结合的 PIC/MCC 方法研究低气压条件下的放电过程。重点分析离子源内部电势、磁场和 H_2^+ 离子密度的空间分布，并结合电子在电磁场中的运动规律，对等离子体形成和离子集中机制进行分析，为后续潘宁离子源结构优化以及轴向离子引出系统设计提供参考。

2. 工作原理

潘宁放电属于典型的冷阴极放电。本文所研究的潘宁离子源主要由阴极、对阴极、阳极筒以及提供轴向磁场的磁体等部分组成。模型中阳极筒电压为 2 kV，阴极处于接地状态，压强为 0.01 pa，同时在放电区域设置约 0.2 T 的轴向磁场，阴极半径 7 mm，放电间隙 16 mm，模拟过程中考虑的主要碰撞反应式如表 1 所示：

Table 1. Reaction equations and energy losses
表 1. 反应方程和能量损耗

序号	反应方程	反应类型
1	$e + H_2 \Rightarrow 2e + H_2^+$	电离
2	$e + H \Rightarrow e + H(2s)$	激发
3	$e + H(2s) \Rightarrow e + H$	激发
4	$e + H_2 \Rightarrow e + H_2$	弹性
5	$e + H \Rightarrow e + H$	弹性
6	$e + H_2 \Rightarrow e + H + D$	激发

在外加电压作用下，阴极与阳极之间建立较强电场。初始电子进入放电区域后首先受到电场力作用而获得能量。当电子能量增加到一定程度后，会与中性氢气分子发生弹性碰撞、激发碰撞以及电离碰撞。其中，弹性碰撞主要改变电子的运动方向和部分动能；激发碰撞使氢分子由低能级进入高能级；而电离碰撞则会产生新的电子和正离子，是维持放电的关键过程[3]。

若仅存在电场，部分高能电子可能在较短时间内运动到电极表面并被吸收，从而造成电子损失。潘宁离子源通过引入轴向磁场改变电子运动轨迹。当电子速度具有垂直于磁场方向的分量时，会受到洛伦兹力作用并形成回旋运动[4]。在电场和磁场共同作用下，电子不再简单沿直线运动，而是在离子源内部形成复杂的螺旋和漂移轨迹。

这种磁约束效应能够明显延长电子在放电区中的停留时间和有效运动路径。电子运动路径越长，与中性氢气分子发生碰撞的概率越大，因而能够提高气体电离效率。这也是潘宁结构能够在低气压条件下维持放电的重要原因之一。

随着电离过程持续进行，产生的新电子进一步参与碰撞和电离，正离子则受到局部电场作用向阴极方向运动[5]。当单位时间内产生的带电粒子数量与由于电极吸收、粒子逸出等因素导致的损失逐渐达到动态平衡时，离子源内部便可以形成相对稳定的自持放电状态。

3. 离子源模型与 PIC/MCC 方法

根据潘宁离子源的基本结构，本文建立了简化的三维计算模型。模型主要包括阴极、对阴极、阳极

筒以及上下磁体等结构。阳极筒既承担建立放电电场的作用，又构成主要放电空间；阴极与对阴极位于轴向两端，为电子和离子的运动提供相应的边界条件。模型的总体结构如图 1 所示。

为了重点研究离子源内部等离子体形成和粒子分布规律，在数值建模过程中对部分与放电核心过程关系较弱的机械结构进行了适当简化。这种处理能够在保留主要物理特征的同时减少网格数量和计算量，使三维 PIC/MCC 模拟具有较好的计算可行性。

对于氢气放电而言，粒子体系主要包括电子、中性氢气分子以及由碰撞电离产生的正离子。电子由于质量较小，对电磁场变化最为敏感，也是导致气体激发和电离的主要粒子。因此，准确描述电子的运动轨迹和碰撞行为是模拟潘宁放电过程的关键。

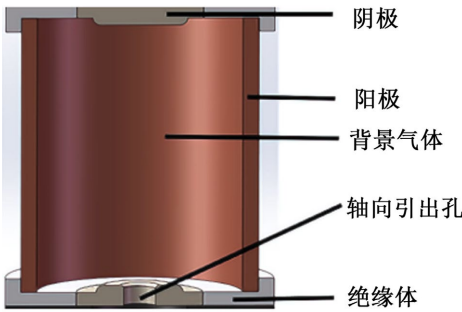


Figure 1. Structure of the physical model
图 1. 物理模型结构

4. 仿真结果分析

4.1. 电势分布

图 2 给出了离子源内部的三维电势分布，图 3 进一步给出了轴向和径向电势变化情况。模拟初始条件下，阳极区域最高电势约为 2 kV，而阴极区域保持接地状态，因此在电极之间形成明显电势差。仿真结果显示，电势由高电势阳极区域向两端阴极区域逐渐降低。

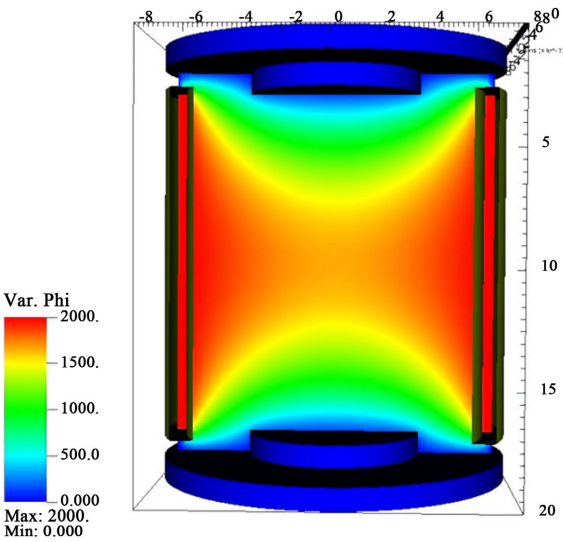


Figure 2. Electric potential distribution (V)
图 2. 电势分布(V)

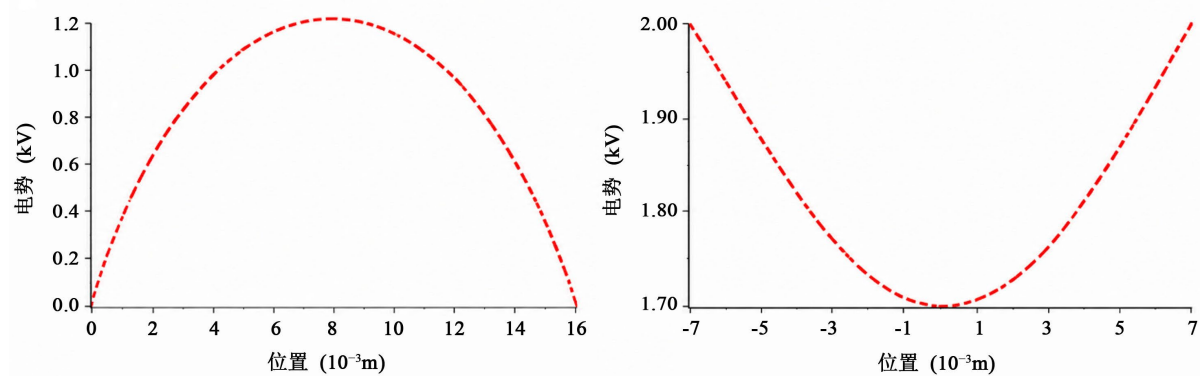


Figure 3. Axial (Left) and radial (Right) electric potential distributions
图 3. 轴向(左)和径向(右)电势分布

从空间分布来看, 电极几何结构决定了内部电场具有明显的非均匀性。靠近阴极区域时, 电势变化速度较快, 对应较大的局部电场强度; 而放电区中部电势变化相对平缓, 有利于带电粒子在其中维持较长时间的运动。

对于电子而言, 电势差为其提供了获得高能量的条件。电子在电场中被不断加速, 当其动能达到氢气分子的激发或电离阈值后, 就能够与中性气体发生非弹性碰撞。由此可见, 电势分布不仅决定粒子的宏观输运方向, 也直接影响电子能量获得和气体电离区域。

对于正离子而言, 由于其带正电, 在电场作用下的运动方向与电子相反。离子产生后会在空间电势作用下向低电势区域运动。因此, 合理设计电势结构对于后续离子束引出同样具有重要意义。

4.2. 离子源内磁场设置

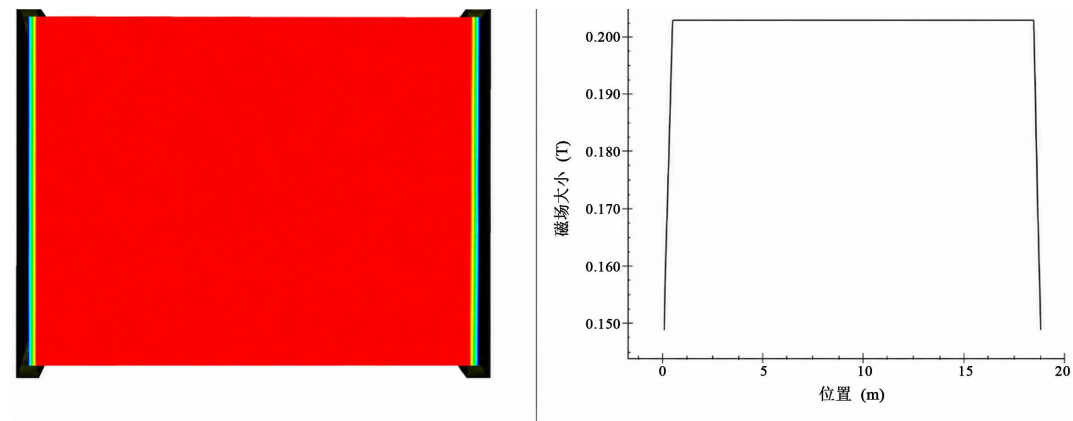


Figure 4. Three-dimensional magnetic field distribution inside the ion source (Left) and axial magnetic field distribution (Right)
图 4. 源内三维磁场分布(左)和轴向磁场分布(右)

根据模拟结果, 在源内设置了 0.2 T 的均匀磁场, 电子同时受到电场力和洛伦兹力的作用。它们在源内作拉莫尔运动, 从而将高能电子约束在源内[5]。如图 4 所示。

4.3. H_2^+ 离子分布

源内电子与中性气体发生碰撞电离所产生的 H_2^+ 粒子分布如图 5 所示。通过该分布及其密度分布特征

可以得出结论,离子主要集中分布在源内的中心轴向位置,为离子的轴向电场作用加速引出提供了依据。

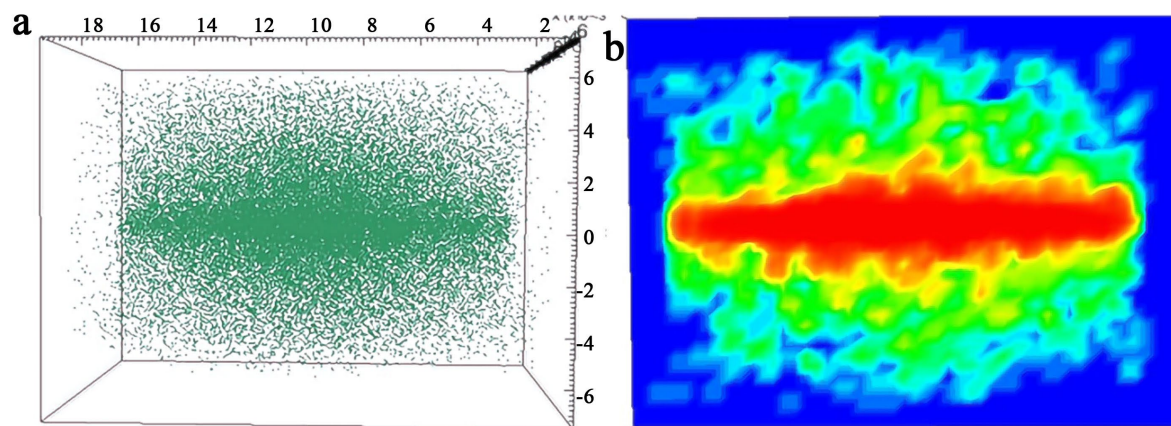


Figure 5. Ion distribution and ion density distribution

图 5. 离子分布和离子密度分布

图 6 中轴向中心区域同时满足“高电子密度”与“适中电子平均能量”两个电离峰值条件。由于两端强阴极鞘层的排斥作用,能量较高的原初电子与振荡电子在此区域交汇并达到最高数密度;强轴向磁场仅对轻质量的电子产生严格束缚,而对于重质量的 H_2^+ 离子,其拉莫尔半径远大于放电室几何半径,因此离子处于“非磁化”状态。离子的空间运动主要受自洽空间电荷建立的径向双极扩散电场支配。因为电子主要富集在轴心旋转层内,为了维持准中性,离子同样在轴心处形成密度峰值。

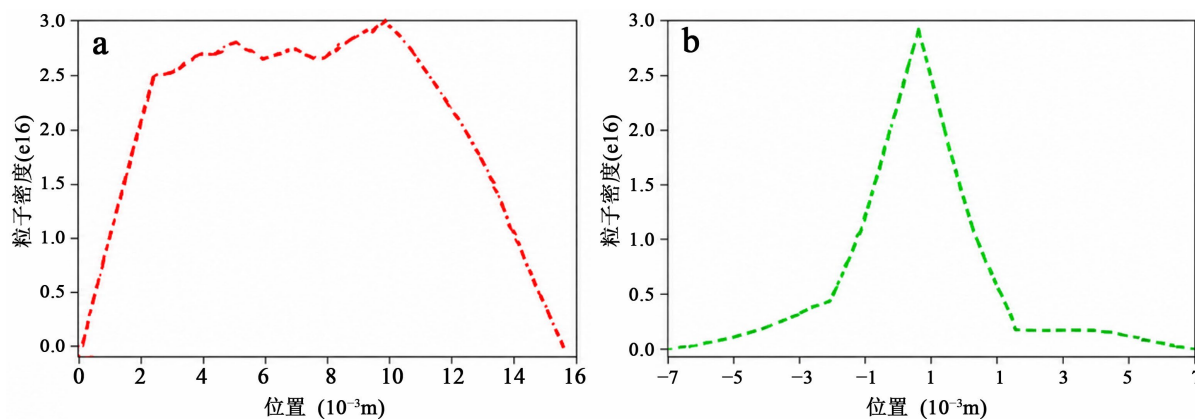


Figure 6. Axial and radial density distributions

图 6. 轴向密度分布和径向密度分布

5. 结论

本文基于 PIC/MCC 方法建立了低气压(0.01 Pa)冷阴极潘宁离子源的微观动力学模型,揭示了强轴向磁场(0.2 T)与径向自洽电场构建的正交电磁约束机制,电子通过磁场约束,延长了碰撞路径。研究表明:在 0.2 T 轴向磁场与自洽径向电场的正交作用下,高度磁化的电子通过两端阴极鞘层间的轴向高频振荡有效倍增了碰撞电离几率,构成了超低气压下放电自持的核心机制;同时离子在自洽双极扩散电场作用下呈现出轴向与径向高度向中心轴线聚集的“单峰钟形”分布,这一物理特性充分验证了中心轴向引出

方案在提高束流强度、降低横向发射度及优化引出光学品质上的显著优势，为后续离子源结构与引出系统的优化设计提供了理论与量化支撑。

参考文献

- [1] Li, J., Ju, S., Yue, A., Zhang, X., Wang, H., Lu, J., *et al.* (2020) A Simulation Study of Argon Discharge in PIG Ion Source with Axial Magnetic Field. *Journal of Physics: Conference Series*, **1601**, Article ID: 022044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1601/2/022044>
- [2] Ju, S., Li, J., Lu, J. and Zhou, X. (2020) Symmetry Breaking of Plasma Induced by Pressure in PIG Ion Source. *Journal of Physics: Conference Series*, **1601**, Article ID: 062034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1601/6/062034>
- [3] Mamedov, N.V., Gubarev, A.V., Zverev, V.I., Maslennikov, S.P., Solodovnikov, A.A., Uzvolok, A.A., *et al.* (2020) Magnetic Field Design for Miniature Pulse Penning Ion Source. *Plasma Sources Science and Technology*, **29**, Article ID: 025001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab6758>
- [4] Choe, K., Kim, D., Chung, K. and Hwang, Y.S. (2019) Improved Gating Device of Time-of-Flight Ion Mass Analyzer for Ion Sources. *Review of Scientific Instruments*, **90**, Article ID: 033305. <https://doi.org/10.1063/1.5088576>
- [5] Sereda, I., Tseluyko, A., Ryabchikov, D., Hrechko, Y. and Azarenkov, N. (2019) The Increasing of H^- Current from Penning Ion Source with Electrically Biased Metal Hydride Cathode. *Vacuum*, **162**, 163-167. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.01.046>