

低气压条件下氢气潘宁放电的模拟分析*

石磊[†] 钱沐杨 肖坤祥 黎明

(中国工程物理研究院电子工程研究, 绵阳 621900)

(2013年3月30日收到; 2013年4月26日收到修改稿)

为更好地理解低气压、弱电离条件下潘宁离子源放电过程中离子和电子的动力学行为, 通过建立二维轴对称模型, 采用粒子模拟与蒙特卡罗相结合 (PIC/MCC) 的方法, 考虑了电子与氢气之间的弹性碰撞、激发、电离以及氢原子、离子之间的弹性碰撞和电荷交换等过程, 对微型氢气潘宁离子源放电和引出过程进行了数值研究. 考察了磁场位形、壁面二次电子发射系数、引出电压和充气压力对放电过程的影响, 得到了实验中难以诊断得到的放电腔内电子与离子数密度分布, 阳极电流、引出极离子电流、单原子氢离子比例和双原子氢离子比例等宏观参数与实验结果相一致. 通过仿真使得对氢气潘宁放电机理的研究从定性过渡到定量, 这对于潘宁离子源的设计和改进具有重要意义.

关键词: 潘宁放电, 氢气, 粒子模拟, 蒙特卡罗

PACS: 52.80.Sm, 52.65.Pp, 52.65.Rr

DOI: 10.7498/aps.62.175205

1 引言

潘宁 (Penning) 放电, 是磁场中冷阴极放电中的一种, 也是在离子源中应用得较广的一种放电方式^[1], 它的原理是电子在电场和磁场共同作用下呈螺旋形运动, 与中性气体分子发生电离碰撞产生离子, 如果单位时间放电区内产生的离子数与因电离产生的新电子数相等, 就会形成一种动态的平衡, 在离子源中形成了自持放电. 潘宁离子源能在低气压下稳定工作, 具有结构和供电系统相对简单、工作寿命长的特点, 在特种电真空器件研制中获得广泛应用.

中国工程物理研究院的万瑞芸等人对潘宁离子源的发展作了综述^[2,3], 肖坤祥等^[4-7]一直致力于对潘宁离子源放电特性研究. 2003年肖坤祥等人研究了潘宁离子源中磁场和气压对氢气电离的影响, 并指出当离子源的工作时气压为 $5 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-2}$ Pa 时, 放电电流与气压近似为线性关系. 当阳极电压大于 1500 V 时, 电压变化对电离的影响较大, 适当增强磁场可提高等离子体密度, 增大

离子流, 有利于离子束成形. 2005年肖坤祥等人设计了一种用于石油测井中子管的微型潘宁离子源, 该离子源阳极筒尺寸减小到 10 mm 左右, 灯丝电流约为 300—500 mA, 阳极电子电流可达 200 μ A 以上. 对于同类的微型潘宁离子源, 2009年 Jin 等^[7]利用双探针法测得阳极电子电流在 50—120 μ A 时, 电子密度约为 $6.0 \times 10^{13} \sim 1.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$.

在以往的潘宁离子源设计过程中, 只考虑了静电场、磁场对电子及离子在电磁场中动力学影响, 且仅停留在表面定性描述阶段, 并没有模拟电子、离子的运动轨迹, 没有考虑到电子与氢气之间的电离等复杂过程, 引出特性的研究也不深入和全面^[2,3].

目前, PIC/MCC 方法在低气压放电的数值模拟中得到了广泛应用, 且仿真技术在不断发展, 理论上可以得到等离子体宏观和微观的详细信息. 本文用 PIC/MCC 方法模拟低气压条件下氢气潘宁离子源放电过程中离子和电子的动力学行为, 主要考察不同放电状态下阳极电流、引出极离子电流及 H^+ 和 H_2^+ 比例的变化规律, 从理论上探讨氢气潘宁离子源放电过程中的物理机理.

* 中物院军民转重大专项基金 (批准号: JM20120201) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: 513shi@163.com

2 PIC/MCC 模拟方法和物理模型

PIC/MCC 通过求解牛顿运动方程追踪大量超粒子 (电子或离子) 在外加电场及自洽电场中的运动过程, 同时应用蒙特卡洛碰撞模型得到超粒子碰撞之后的运动状态, 最终得到模拟系统中每个超粒子在求解时间内的运动轨迹. 此外, 粒子模拟不需要假设电子和离子处于平衡态. 可用统计平均法求解等离子体密度、温度、电势、电场和粒子通量等放电参数. 通过跟踪不同时刻等离子体放电参数的变化, 可以实现放电参数时空演化.

2.1 物理模型

图 1 给出了微型潘宁离子源放电区和引出区的结构示意图, 主要由柱状永磁铁、环状永磁铁、环状阳极、上阴极、下阴极和引出极组成. 离子源腔室内充一定气压的氢气.

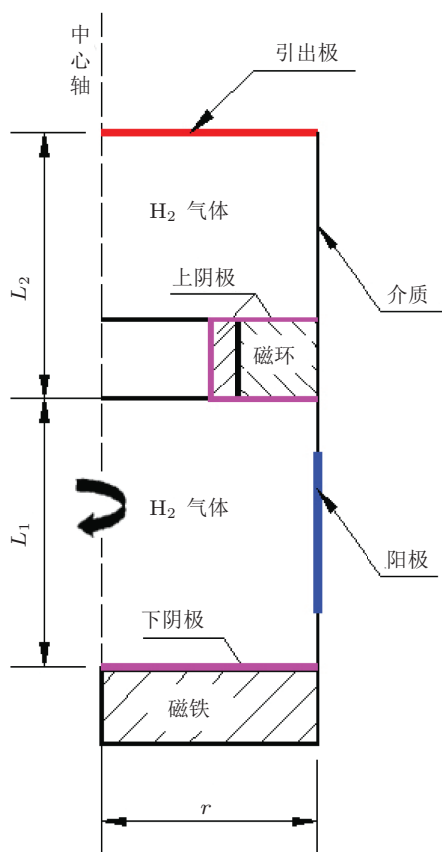


图 1 潘宁离子源模型简图

柱状永磁铁表面磁感应强度为 6600Gs ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$), 环状永磁铁表面磁感应强度为 3300Gs. 上、下阴极电压为 0 V, 二次电子系数

取 1.2, 阳极电位通常取 2000 V, 引出极电位通常取 -50000 V, 二次电子系数取 0, 暂不考虑界面反应.

在计算模拟中放电区的半径 r 取为 6 mm, 高度 L_1 取为 10 mm, 引出间距 L_2 取为 10 mm; 采用非均匀的网格划分: 径向 60 格, 轴向 110 格; 时间步长: 10^{-12} s 量级.

2.2 Monte Carlo 模型

在低气压弱电离气体放电研究中, 氢气中的相关反应主要有激发、退激发、电离、复合以及弹性碰撞等 5 种类型. 其中包括电子与中性分子的相互作用、电子-离子反应、离子-中性分子反应、中性-中性分子反应、壁面再结合等反应形式, 非弹性碰撞才是使工作气体发生电离、形成离子过程的主要反应类型.

氢气放电反应模拟过程中考虑的主要碰撞反应过程^[8] 如表 1 所示.

表 1 模型中考虑的主要反应形式

序号	反应形式	反应方程式
1	电子电离	$e^- + \text{H} \rightarrow 2e^- + \text{H}^+$
		$e^- + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2^+ + e^- + e^-$
		$e^- + \text{H}_2 \rightarrow 3e^- + 2\text{H}^{+1}$
		$e^- + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}^- + \text{H}$
2	电子与中性分子	$e^- + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + e^-$
		$e^- + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H} + e$
3	电子-离子反应	$e^- + \text{H}_2^+ \rightarrow 2\text{H}$
		$e^- + \text{H}_2^+ \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}^-$
		$e^- + \text{H}^- \rightarrow 2e^- + \text{H}$
		$e^- + \text{H}_3^+ \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$
		$e^- + \text{H}_2^+ \rightarrow e^- + \text{H}^+ + \text{H}$
		$e^- + \text{H}_3^+ \rightarrow e^- + \text{H}^+ + 2\text{H}$
4	电子激发	$e^- + \text{H}_2 \rightarrow e^- + \text{H}_2^*$
5	离子-中性粒子	$\text{H}^- + \text{H}_2 \rightarrow e^- + \text{H} + \text{H}_2$
		$\text{H}^- + \text{H} \rightarrow e^- + \text{H}_2$
		$\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$
6	离子-离子	$\text{H}^- + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{H}$
		$\text{H}_2^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$
		$\text{H}_3^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{H}$
7	中性-中性粒子反应	$\text{H} + \text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2$
		$\text{H} + \text{H} + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}_2$
8	壁面复合	$\text{H} + \text{wall} \rightarrow 1/2\text{H}_2$
		$\text{H}^+ + \text{wall} \rightarrow \text{H}_2$
		$\text{H}_2^+ + \text{wall} \rightarrow \text{H}_2$
		$\text{H}_3^+ + \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$

由于三体反应截面相对较小, 在模拟计算中不予考虑; 由于模拟的是弱电离子源, 离子与壁面复合产生的中性粒子相对本底气体很少, 因此忽略壁面复合反应. 针对在氢气内部的关键反应, 本文关注以上前 6 种反应形式.

3 结果与分析

3.1 磁场分布计算

由柱状永磁铁、环状永磁铁当它们同向放置时空间磁感应强度 B 在放电空间的分布如图 2(a) 所示, 当环状永磁铁反向后 B 分布如图 2(b) 所示. 环状永磁铁作用是补偿下阴极主磁体的轴向降落^[6]. 在放电模拟中由永磁铁产生的磁场不变, 忽略由电子、离子运动产生的磁场影响.

3.2 电子离子密度分布

在中性气体压强为 0.02 Pa, 即密度 $5.3 \times 10^{18}/\text{m}^3$, 阳极电压 2000 V, 引出电压 -50000 V, 达到稳定状态后电子离子密度分布如图 3 所示. 其中电子密度最大值: $2.46 \times 10^{16}/\text{m}^3$, H_2^+ 离子密度最大值: $7.56 \times 10^{14}/\text{m}^3$, H^+ 离子密度最大值: $6.2 \times 10^{13}/\text{m}^3$. 电子密度最大值与中性气体密度的比值 $< 1\%$, 因此潘宁离子源工作于弱电离子状态.

从电子离子密度分布图, 按图 4(a) 所示 X 和 Y 轴线上的电子和离子 (H^+ 和 H_2^+) 密度分布如图 4(b) 和 (c) 所示. 电子和氢分子离子密度分布随时间变化趋势如图 5 所示.

图 4 中电子和离子密度对距离的变化说明放电空间中电子和离子是不均匀的, 主要由磁场位形、磁场强度、电场位形和电场强度决定, 另外电离率大小随电子能量的变化也会造成电子和离子不均匀. 放电空间中的电子和离子将改变初始的电场状态直到达到动态平衡. 结合图 3 和图 4 可以得出在放电空间在大部分区间, 电子密度远大于离子密度, 并未在整个空间形成中性的等离子体. 在放

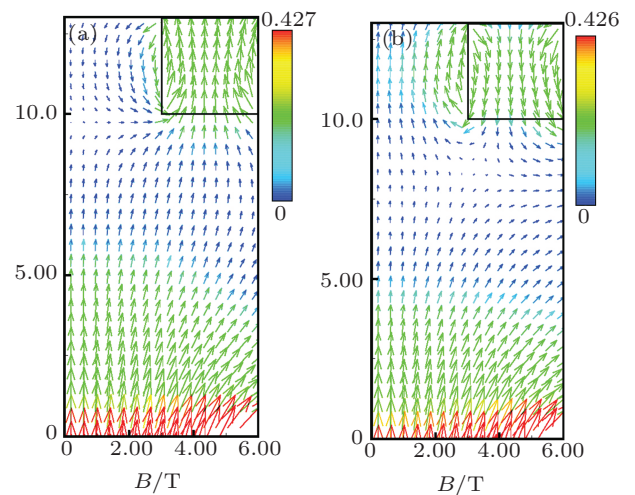


图2 磁感应强度空间分布图 (a) 同向; (b) 反向

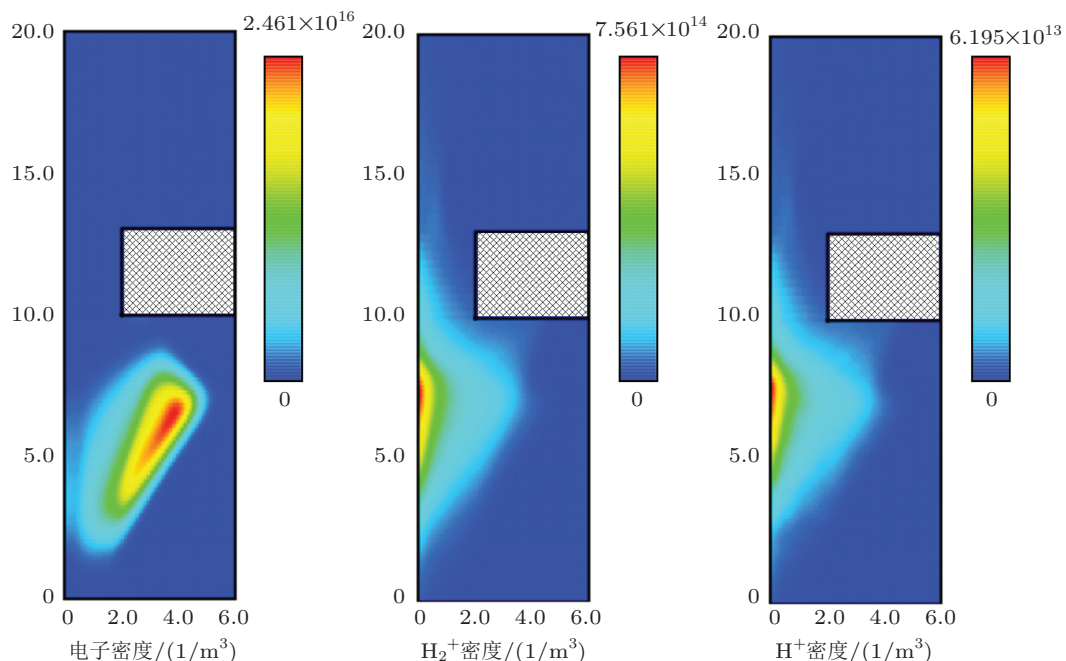


图3 电子、离子密度空间分布

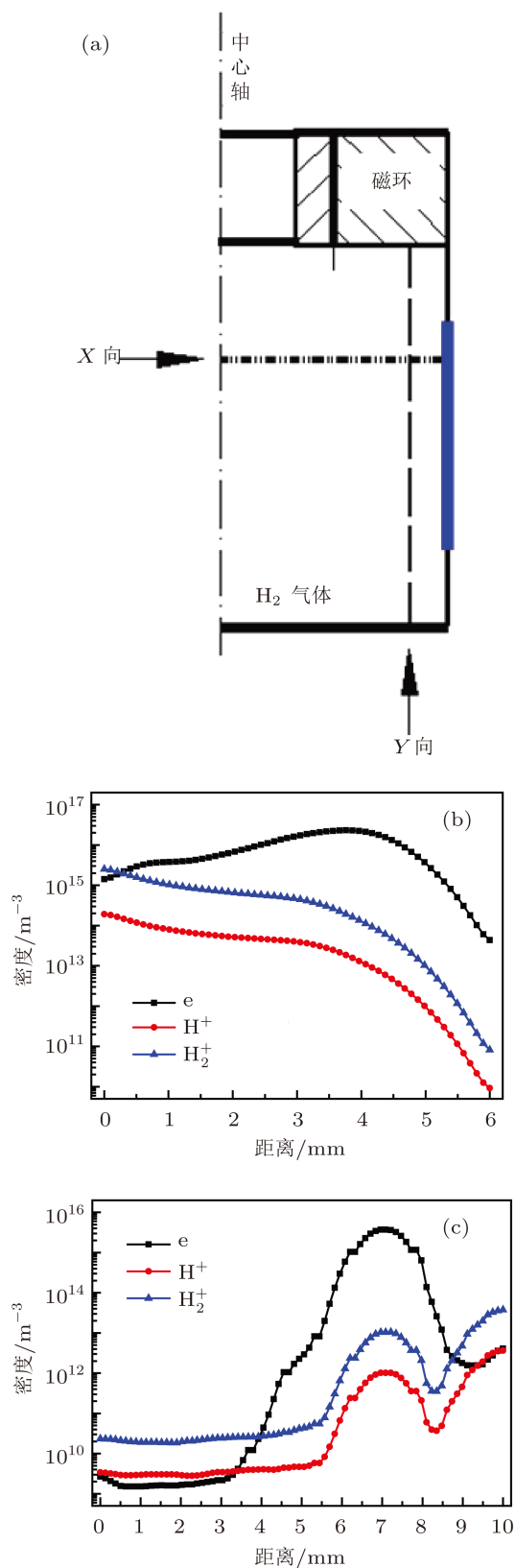


图4 电子和离子密度沿线分布

电空间中性气体被电离产生离子和电子, 磁场对离子运动影响很弱, 离子很快被上、下阴极收集, 而

电子在电场和磁场共同作用下一方面作绕中心轴的螺旋运动, 另一方面在上、下阴极间振荡, 使得它不能直接打到阳极上, 增加了电子的电离碰撞次数, 由于电子在空间滞空时间长, 造成放电空间内形成过剩的电子云, 这也是低气压放电模式的基本特点.

3.3 放电参数对电子电流、离子电流影响

充气气压、阳极电压、引出电压、表面二次电子系数和磁场形态都会对潘宁放电产生影响, 甚至影响离子源持续放电.

3.3.1 阳极电压与电子电流、离子电流关系

表 2 和表 3 是引出电压 -50000 V 、在不同气压下阳极电压与电子电流、离子电流关系.

表 2 阳极电压与电子电流、离子电流关系 (气压 0.02 Pa)

电压/V	电子电流/ μA	H_2^+ 电流/ μA	H^+ 电流/ μA
1500	121.2	16.1	1.6
2000	166.5	24.5	2.7
2300	173	27.1	3.0

表 3 阳极电压与电子电流、离子电流关系 (气压 0.06 Pa)

电压/V	电子电流/ μA	H_2^+ 电流/ μA	H^+ 电流/ μA
1500	456	52.6	5.1
2000	548	79.5	8.5
2300	691	101.7	11.4

当气压低于 0.01 Pa , 阳极电压 $1500\text{--}2300\text{ V}$ 范围内无法持续放电. 在 2000 V 气压 0.06 Pa 时, H_2^+ 占总引出离子流的 90% , H^+ 占总引出离子流的 10% .

3.3.2 引出极电压对电子电流、离子电流的影响

在气压 0.02 Pa 、阳极电压 2000 V 条件下, 引出极电压从 -50000 V 改变为 -1000 V , 电子电流为 $167\text{ }\mu\text{A}$, H^+ 离子电流为 $1.8\text{ }\mu\text{A}$, H_2^+ 离子电流为 $16.7\text{ }\mu\text{A}$. 对比表 2, 可以得出, 引出极电压降低后, 电子电流基本不变, 离子电流变小.

3.3.3 电流随时间变化

在气压为 0.06 Pa , 电压为 2300 V 时电流随时间变化关系如图 6 所示. 从图中可以得出, 在上述参数下到 $30\text{ }\mu\text{s}$ 时电子电流、离子电流已趋于稳定.

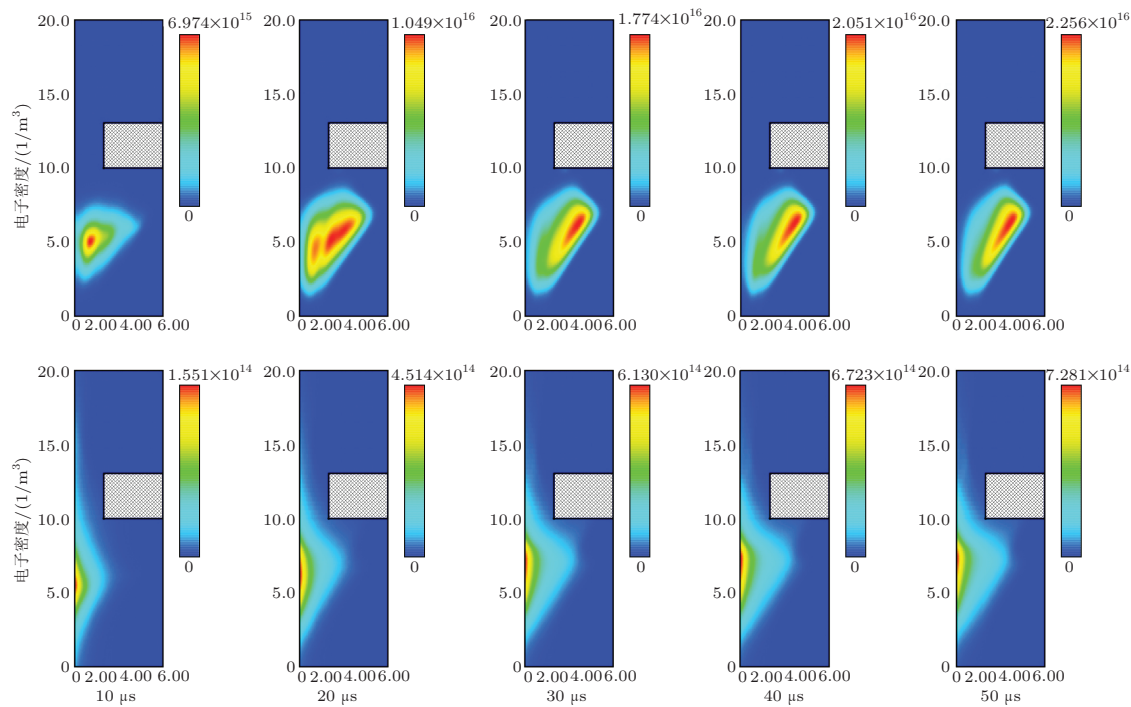


图5 电子和 H_2^+ 离子密度分布随时间变化

3.3.4 二次电子系数对放电过程的影响

粒子轰击材料会产生二次电子, 导致放电区间电子数的增加, 二次电子发射甚至是直流放电的主要原因. 模拟计算了不同气压、电压下二次电子系数对放电过程的影响, 如表 4 所示.

从模拟结果可以看出, 不考虑粒子轰击材料产生二次电子 ($\gamma = 0$), 在大部分情况下放电照样可以进行, 气体内部的碰撞反应是产生潘宁放电的主要原因, 二次电子的存在能帮助增加电子和离子电流, 在阳极电压或气压较小时放电不能持续.

图 7 显示的是二次电子系数分别 $\gamma = 0$ 和 $\gamma = 1.2$ 时, 电子、 H^+ 和 H_2^+ 离子产生率随时间

变化曲线, 从图中很明显看出二次电子有助于放电尽快达到稳定.

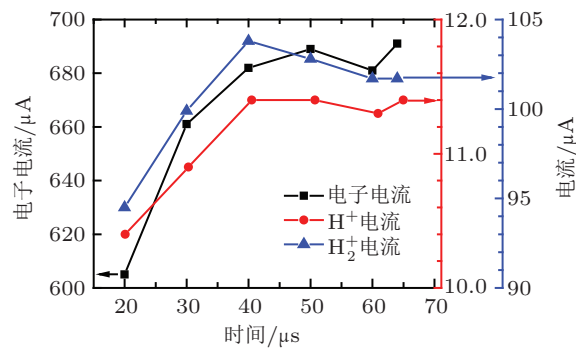
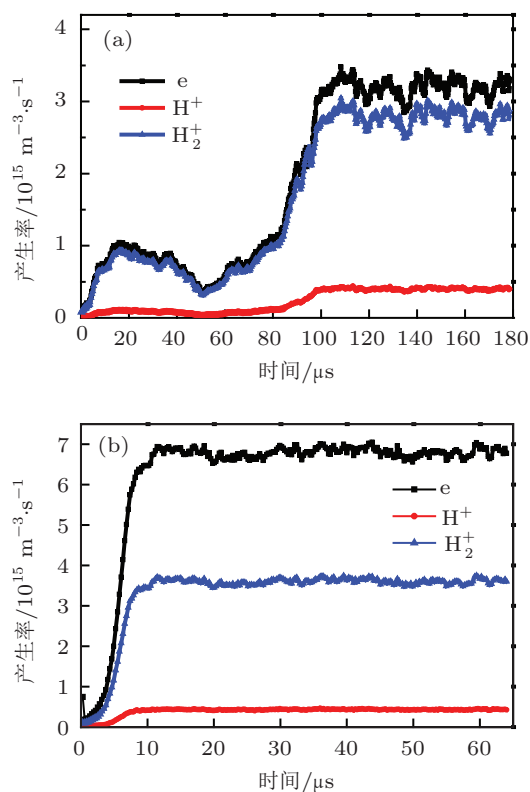


图6 电子和离子电流随时间变化

表 4 二次电子系数对放电过程的影响

二次电子系数 γ	电子电流/ μA	H_2^+ 电流/ μA	H^+ 电流/ μA	气压/ Pa	电压/ V
1.2	691	101.7	11.4	0.06	2300
0.2	502	91	9.9	0.06	2300
0.0	457	85	9.3	0.06	2300
0.1		可以放电		0.06	2300
0.0		放不起电		0.06	1500
0.0		放不起电		0.02	2000
0.0		可以放电		0.02	2300

图7 电子和离子产生率随时间变化曲线 (a) $\gamma = 0$; (b) $\gamma = 1.2$

3.3.5 环状永磁体磁场方向反转的影响

从图2 磁感应强度空间分布可以看出, 加入环

状永磁体后, 当它的充磁方向与柱状永磁体同向时, 引出孔附近磁感应强度减弱, 环状永磁体下方磁感应强度增强; 当它的充磁方向与柱状永磁体反向时, 引出孔附近磁感应强度增强, 环状永磁体下方磁感应强度减弱.

计算模拟发现, 环状永磁体磁场方向反转后, 在电压 1500—2300 V, 气压 0.02—0.4 Pa 范围内不能持续放电, 这与实验观察到的现象一致.

4 结 论

应用粒子模拟与蒙特卡罗相结合 (PIC/MCC) 的方法, 计算模拟了低气压微型潘宁离子源的氢气放电, 考察了磁场位形、壁面二次电子发射系数、引出电压和充气压力对放电过程的影响, 得到了放电腔内电子与离子数密度分布, 阳极电流、引出极离子电流、 H^+ 和 H_2^+ 比例等参数与实验结果相一致, 此电离过程属于弱电离、空间电荷为非电中性. 通过仿真使得氢气潘宁放电机制的研究从定性过渡到定量, 这对于潘宁离子源的设计和改进行具有重要意义.

- [1] Zhang H S 1997 *Ion Source and Neutral Beam Source* (Beijing: Atomic Energy Press) p125
- [2] Wan R Y 2007 *MS Thesis* (China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [万瑞芸 2007 硕士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [3] Wan R Y, Tan X H, Xiao K X, Jin D Z 2009 *Mechanical & Electrical Engineering Technology* **38** 17 (in Chinese) [万瑞芸, 谈效华, 肖坤祥, 金大志 2009 机电工程技术 **38** 17]
- [4] Xiao K X, Zhou M G, Tan X H 2003 *Vacuum Electronics* **2003**(6) 26 (in Chinese) [肖坤祥, 周明贵, 谈效华 2003 真空电子技术 **2003**(6) 26]
- [5] Xiao K X, Zhou M G, Tan X H, Mei L, Liang C 2005 *Nuclear Techniques* **28** 550 (in Chinese) [肖坤祥, 周明贵, 谈效华, 梅林, 梁川 2005 核技术 **28** 550]
- [6] Xiao K X, Sun S, Tan X H, Jing D Z 2009 *Well Logging Technology* **33** 493 (in Chinese) [肖坤祥, 孙山, 谈效华, 金大志 2009 测井技术 **33** 493]
- [7] Jin D Z, Yang Z H, Xiao K X, Dai J Y 2009 *Plasma Science and Technology* **11** 48
- [8] Phelps A V 1990 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **19** 653

Simulation study on hydrogen penning source discharge at low pressure*

Shi Lei[†] Qian Mu-Yang Xiao Kun-Xiang Li Ming

(Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

(Received 30 March 2013; revised manuscript received 26 April 2013)

Abstract

In order to better comprehend the dynamic behaviours of ion and electron during the Penning source discharge process under a low pressure and weak ionization condition, numerical simulation is carried out to study the penning source discharge and diffuse process. For constituting 2D axial symmetrical model and combining the particle simulation and Monte Carlo (PIC/MCC) method, elastic collision, excitation, and ionization reactions between electrons and hydrogen molecules, hydrogen atom and ions are taken into account. The effect of magnetic field configuration, secondary electron emission coefficient, derivational voltage, and gas pressure on the discharge characteristics is investigated. It has been found that the simulant discharge parameters, including electron and ion densities, anodic current and ionic current, H^+ and H_2^+ densities, etc, are in good agreement with the experimental results. Based on our numerical simulation, the study of the hydrogen penning discharge is being changed from qualitative analysis to quantitative calculation, which is important for the design and optimization of the penning ion source.

Keywords: penning discharge, hydrogen, particle simulation, Monte Carlo

PACS: 52.80.Sm, 52.65.Pp, 52.65.Rr

DOI: 10.7498/aps.62.175205

* Project supported by the Major Special fund of CAEP Defense Conversion (Grant No. JM20120201).

[†] Corresponding author. E-mail: 513shi@163.com