

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

伴随中子管Penning源诊断及仿真研究

叶龙建 董攀 李杰 张东东 陈宇航 胡志杰

Diagnosis and simulation of Penning source in associated neutron tube

Ye Longjian, Dong Pan, Li Jie, Zhang Dongdong, Chen Yuhang, Hu Zhijie

引用本文:

叶龙建, 董攀, 李杰, 张东东, 陈宇航, 胡志杰. 伴随中子管Penning源诊断及仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 094002. doi: 10.11884/HPLPB202436.230283

Ye Longjian, Dong Pan, Li Jie, Zhang Dongdong, Chen Yuhang, Hu Zhijie. Diagnosis and simulation of Penning source in associated neutron tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 094002. doi: 10.11884/HPLPB202436.230283

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230283>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

容性耦合射频氩等离子体放电诊断及仿真模拟

Diagnostic study and simulation of capacitive coupled RF plasma

强激光与粒子束. 2019, 31: 032002-1-032002-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB201931.180329>

磁场调控型离子源的设计与实验

Design and experimental study of magnetic field regulating ion source

强激光与粒子束. 2022, 34: 074001-1-074001-5 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210515>

双驱动射频负氢离子源匹配网络设计与实验研究

Design and experimental study of matching network for dual drive RF negative hydrogen ion source

强激光与粒子束. 2024, 36: 016002-1-016002-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.230313>

真空电弧等离子体发射光谱诊断

Vacuum arc plasma emission spectroscopy diagnosis

强激光与粒子束. 2021, 33: 065014-1-065014-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.210116>

锦屏深地强流离子源控制系统的研制

Development of control system for JUNA ion source

强激光与粒子束. 2023, 35: 104001-1-104001-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220356>

基于射频功率调节的负离子源束流反馈控制研究

Research on beam feedback control of negative ion source based on RF power regulation

强激光与粒子束. 2022, 34: 116002-1-116002-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.220098>



·粒子束及加速器技术·

伴随中子管 Penning 源诊断及仿真研究^{*}

叶龙建^{1,2}, 董 攀², 李 杰², 张东东¹, 陈宇航³, 胡志杰²

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900;
3. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621900)

摘 要: Penning 离子源因为结构简单、体积小、功耗低等优点, 被广泛应用在伴随中子管中。基于实验室所用的潘宁 (Penning) 离子源, 分析其电离时的伏-安特性; 通过 CCD 相机拍摄观察离子源内部等离子体分布情况; 采用光谱法诊断氢等离子体中电子的密度和温度。基于实验测试用的 Penning 离子源结构, 建立 H_2 分子碰撞电离的全局模型, 分析离子源的工作参数与等离子体中电子温度和电子密度之间的关系。仿真结果表明: 电子温度和电子密度与离子源的运行压强、磁场和功率密切相关; 电子密度随功率增加逐渐增加、随磁场强度和压强都是先增加后减小, 因此需将磁场强度控制在 $0.03 \sim 0.05$ T, 压强控制在 $(0.2 \sim 2) \times 10^{-2}$ Pa 之间; 电子温度随功率增加逐渐增加、随压强增加逐渐减小。通过模型可知, 在 Penning 离子源的工作区内, 电子平均温度小于 10 eV, 电子密度数量级为 10^{10} cm^{-3} 。

关键词: Penning 离子源; 离子诊断; 氢等离子体; 数值分析; 全局模型

中图分类号: TL65

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202436.230283

Diagnosis and simulation of Penning source in associated neutron tube

Ye Longjian^{1,2}, Dong Pan², Li Jie², Zhang Dongdong¹, Chen Yuhang³, Hu Zhijie²

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Penning ion source has been widely used in associated neutron tube due to its simple structure, small size and low power consumption. Based on the Penning ion source used in the laboratory, the volt-ampere characteristics in the ionization process are analyzed. The distribution of plasma is observed by a CCD camera inside the ion source. The density and temperature of electrons are analyzed by spectroscopy of the hydrogen plasma. Based on the Penning ion source structure used in the laboratory, this paper establishes a global model of collision ionization of H_2 molecules and analyzes the influence of working parameters of ion source to the electron temperature and electron density in the plasma. The electron density increases gradually with the increase of discharge power, and it increases first and then decreases when the magnetic field and pressure increase. It is necessary to control the magnetic field within $0.03 \sim 0.05$ T, and the pressure within $(0.2 \sim 2) \times 10^{-2}$ Pa. The electron temperature increases with the power and decreases with pressure. The model shows that the electron temperature is less than 10 eV, and the electron density is 10^{10} cm^{-3} in the operating range of Penning ion source.

Key words: Penning ion source, ion diagnosis, hydrogen plasmas, numerical analysis, global model

如今霸权主义、强权政治导致社会动荡, 恐怖主义滋生, 严重威胁到了国家和社会的稳定。恐怖分子将毒品、爆炸物、核材料等危险物质通过港口贸易投入社会, 威胁到了人民的生命财产安全。因此无损成像检测方法对于港口集装箱的高效检测以及维护国土安全具有很强的吸引力^[1]。潘宁 (Penning) 离子源具有工作气压低、运行稳定、结构和供电系统简单、功耗低、使用寿命长等特点, 在伴随粒子检测技术中得到了广泛应用。俄罗斯全俄自动化研究所研制的 ING-27^[2]、美国 MF Physics 研制的 A-920^[3]、美国 Thermo Electron Corporation 研制的 API-120^[4]、

* 收稿日期: 2024-02-25; 修订日期: 2024-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11975217)

联系方式: 叶龙建, dlut_ylj@163.com。

通信作者: 董 攀, Panner95@163.com。

东北师范大学研制的 NG-9 型^[5] 伴随 α 粒子中子发生器均采用了 Penning 离子源作为产生等离子体的载体。

电场、磁场、压强以及电极材料都是影响 Penning 离子源的重要因素, 因此 Penning 源成为许多科研团队的研究对象。中国工程物理研究院的肖坤祥等^[6] 讨论了电磁场和压强对氢电离的影响, 得出 Penning 源工作性能最优的磁场和压强范围, 但是没有表征出明确的数值关系。石磊等^[7] 用粒子模拟/蒙特卡洛(PIC/MCC)方法模拟了电子密度的空间分布和离子的轨迹, 但是未考虑粒子间碰撞带来的影响。H.Noori 等^[8] 通过数值模拟研究了非均匀磁场对 Penning 离子源某些特性的影响, 得出磁场会导致电子和离子分布不均匀。杨振等^[9] 通过发射光谱研究了 Penning 源氢等离子体的电离特性, 得到了电子的平均温度范围。李卓希等^[10] 通过测伏-安特征研究离子源的电离特性, 用于分析离子源的工作规律, 但是没有明确指出磁场、压强等因素与电子参数的关系。

本文基于项目团队设计的 Penning 源, 测试其在不同压强下的伏-安特性, 分析该结构离子源的工作性能; 通过 CCD 相机拍摄电离区域, 分析等离子体的空间分布是否均匀; 通过光谱仪来诊断等离子体中电子的温度和密度。基于实验室的离子源结构建立全局模型^[11], 即理想地认为离子密度和温度的分布与空间无关, 主要用于描述稳态等离子体的特性。该模型基于电子的密度平衡方程和能量平衡方程, 能够直观地理解电子温度和密度与离子源功率、压强、磁场之间的关系。该模型具有计算量小、易于收敛的优点, 可以为后续 Penning 离子源的研究和优化提供一定的理论和技术支持。

1 离子源结构及其实验装置

1.1 离子源结构及工作原理

Penning 离子源的结构如图 1 所示, 其由阴极、对阴极、阳极筒、永磁体组成。阳极筒的材料采用 Al, 直径约为 10 mm、长度为 20 mm、厚度为 1.5 mm。在阳极两端放置两个厚度为 3 mm 的平行圆形阴极, 阴极与阳极之间的距离约为 1 mm。磁场由耐高温 SmCo 制成的圆柱形永磁体提供, 轴向磁场强度约为 0.03~0.05 T。在阴极周围也放置了一块轴向永磁体, 用来增加轴向磁场强度并改善磁场分布的均匀性, 而且还可以约束等离子体, 提高引出束流强度。

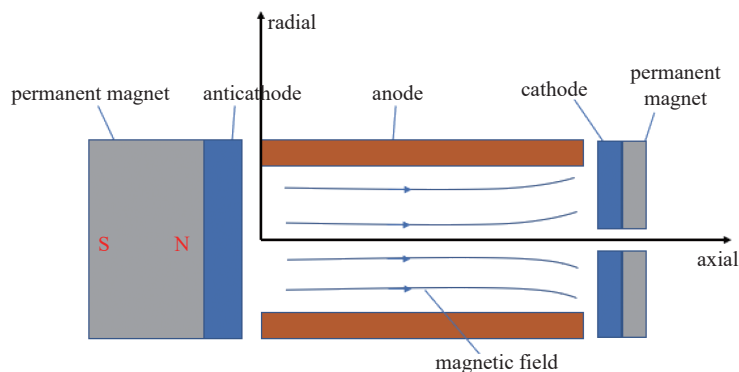


Fig. 1 Structure of Penning ion source

图 1 Penning 离子源的结构

当 Penning 源与高压电源相连时, 阴极和阳极之间的电势差促使电子从阴极表面溢出, 在电场和磁场的作用下在阳极筒内来回做往返的螺旋运动, 电子获得足够的能量与中性气体分子发生碰撞并电离形成等离子体。电子在轴向上磁场的作用下绕磁力线做螺旋运动, 增加了电子的运动轨迹, 使得离开阴极的电子就不会快速到达阳极而湮灭。

1.2 离子源工作特性测试

Penning 离子源的实验测试原理如图 2 所示。将离子源置于腔体内并抽真空, 阳极接高压悬浮电源, 毫安电流表串入回路中, 通过流量计控制通入腔体内的 H_2 量, 以达到调节腔体内压强的目的。通过腔体的观察窗口可以观察到离子源内中性气体电离形成等离子体而发出的光, 通过 CCD 相机可拍摄等离子体的空间分布, 测试原理即把图 2 中的光谱仪模块换成 CCD 相机。因为等离子体的光很微弱, 需要用聚光镜将光线聚集, 通过光谱仪将光信号转为电信号传输到数据处理端口。

测量当压强分别为 5×10^{-3} Pa、 1×10^{-2} Pa、 5×10^{-2} Pa 时, 施加的阳极电压与等离子体电流的关系如图 3 所示, 可以看出, 压强越大, 启辉电压越低。压强为 5×10^{-3} Pa 时, 启辉电压高达 1.8 kV。压强为 5×10^{-2} Pa、电压为 1.2 kV、电

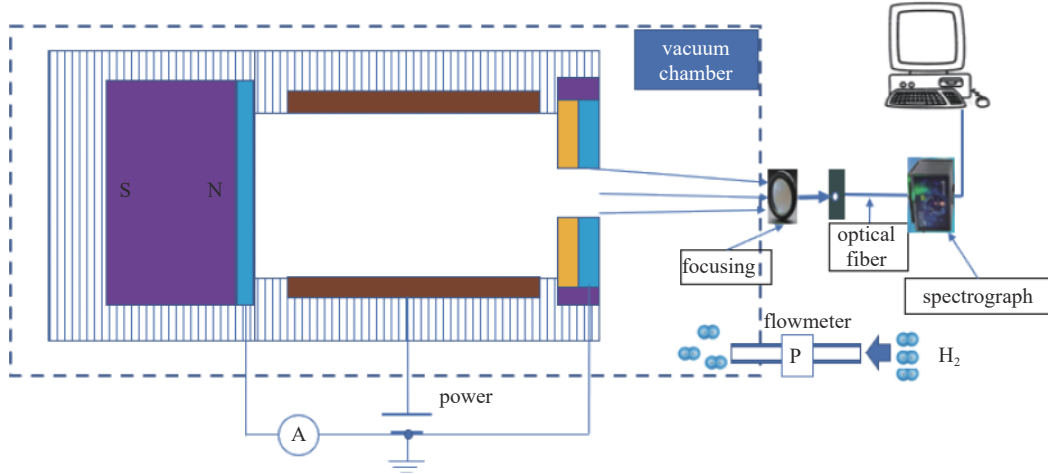


Fig. 2 Diagnosis principle of Penning ion source

图 2 Penning 离子源的诊断测试原理

离电流为 $300 \mu\text{A}$, 当施加的电压达到 4 kV 时, 离子源电离电流可达到 1 mA 。因此, 可以得出: 在一定的范围内, 气压越高即分子密度越大、施加的电压越大, 氢气分子的电离程度越高, 电离电流也就越大, 越有利于分子的电离。

图 4 为压强 $1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 、阳极施加不同电压时 CCD 相机拍摄的等离子体图像, 通过 4 张图的对比可以看出, 同一曝光度下, 随着阳极电压增加离子源电离区域逐渐变亮。这是因为电离强度随着电压的增加而逐渐变强, 等离子体逐渐增多。从结果来看, 可近似认为离子源电离最强的区域位于正中心, 电离强度由中心向边缘逐渐减弱。

等离子体内含有大量处于激发态的粒子, 当激发态的粒子与电子发生碰撞或者自发跃迁到低激发态时, 会发射出光子。每一种粒子都具有其特殊性, 其发射出的光子都表征着该粒子的种类、密度等信息。等离子体中的粒子由于集团作用, 和等离子体参数密切相关, 根据这些粒子信息可以获得等离子体信息, 如电子温度和电子密度, 故可以通过发射光谱来研究等离子体的参数^[12]。实验采用光谱仪来测量氢等离子体的发射光谱, 并对光谱数据进行分析处理, 通过式(1)、式(2)和表 1 中的光谱学参数分别可获得电子温度 T_e 与电子密度 N_e ^[13-14]

$$kT_e = \frac{(E_i - E_m)}{\ln\left(\frac{I_{mn}A_{ij}v_{ij}g_{ij}}{I_{ij}A_{mn}v_{mn}g_{mn}}\right)} \quad (1)$$

$$N_e = Cw_s^{3/2} \quad (2)$$

式中: E_i 和 E_m 分别为电子从基态跃迁到 i 能级和 m 能级的能量; k 为 Boltzmann 常数; I_{ij} 和 I_{mn} 为光谱辐射强度; A_{ij} (A_{mn}) 为 i (m) 能级到 j (n) 能级的自发跃迁系数; v_{ij} 和 v_{mn} 为发射光子频率; g_{ij} 和 g_{mn} 为能级简并数; $C=1/A$ 是和电子温度和电子密度弱相关的系数, 在此处的值为 $8.02 \times 10^{12} \text{ \AA}^{-3/2} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($1 \text{ \AA}=0.1 \text{ nm}$); w_s 为 Stark 展宽, 是由于高密度电子聚集在一起会形成极高强度的局域电场, 该电场会影响粒子内部电子能量分布, 从而引起谱线展宽。

而实验测量得到的谱线展宽 w_M 并不是实际的谱线展宽, 而是 Lorentz 展宽 w_L 和 Gauss 展宽 w_G 的耦合, 可表示为

$$w_L w_M = w_M^2 - w_G^2 \quad (3)$$

Gauss 展宽为仪器展宽 w_I 和 Doppler 展宽 w_D 二次方的和再开平方根, 可表示为

$$w_G = \sqrt{w_I^2 + w_D^2} \quad (4)$$

通过 He-Ne 激光检测器得到实验用的仪器展宽 w_I 为 0.034 nm , Doppler 展宽是与电子温度有关的一个参数, 可

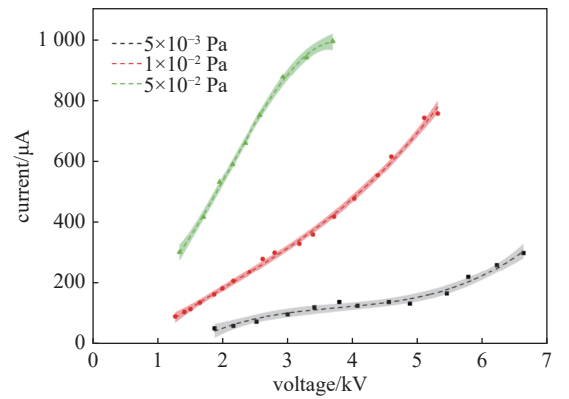


Fig. 3 Volt-ampere characteristic curves at different pressures

图 3 不同压强下的伏安特性曲线

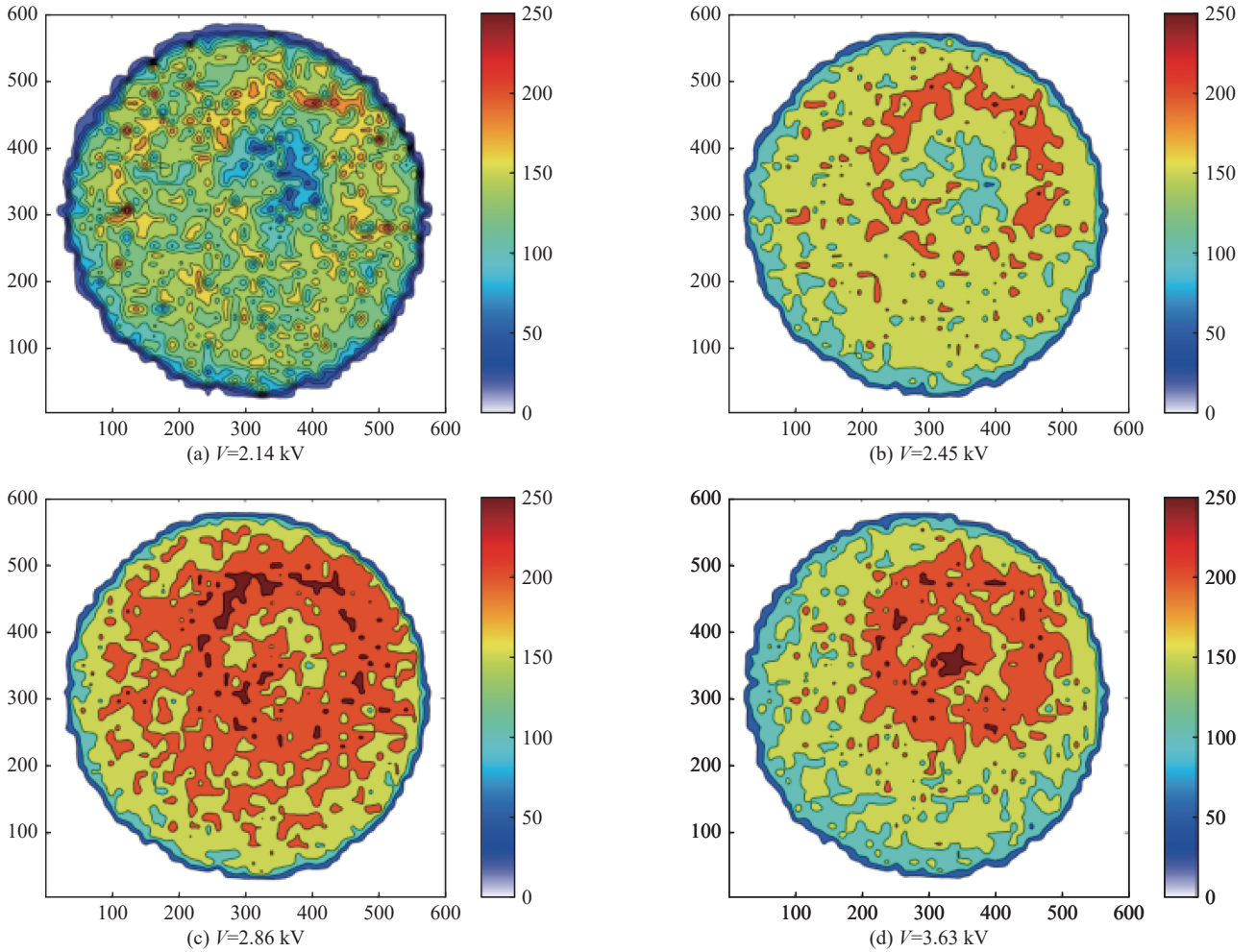


Fig. 4 Pressure being 1.5×10^{-2} Pa, plasma images taken by CCD camera at different voltages (after-processing)

图 4 压强为 1.5×10^{-2} Pa, 不同电压下 CCD 相机拍摄的等离子体图像 (处理后的)

表 1 计算使用的光谱学参数

Table 1 Spectral parameters used in the calculation

spectrum	energy level transition	E_{ij}/eV	λ_{ij}/nm	g_{ij}	$A_{ij}/(\text{A}\cdot\text{s})$	spectral correction factor	strength
H_{α}	$3 \rightarrow 2$	1.51	656	48	$4.41\text{e}7$	0.001 002 245	24 228
H_{β}	$4 \rightarrow 2$	0.85	486	32	$8.42\text{e}6$	0.005 951 14	2 327

表示为

$$w_D = \left(\frac{8kT_e \ln 2}{Mc^2} \right)^{1/2} \lambda_0 \quad (5)$$

式中: M 为粒子质量, λ_0 为谱线中心波长。

Lorentz 展宽为 Stark 展宽 w_S 与 van der Waals 展宽 w_v 的和, 由于 w_v 在低气压下很小, 因此, 可近似认为

$$w_L \approx w_S \quad (6)$$

经过计算得到该 Penning 离子源内电子温度为 3.3 eV, 电子密度为 $2.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

2 离子源全局模型及研究结果

2.1 电子的平衡模型

氢分子在 Penning 源内发生碰撞电离, 碰撞类型包括激发、电离、复合、离解、重粒子反应等。伴随碰撞反应将产生电子、 H 、 H_2 、 H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ 等粒子。本文主要研究正氢离子的电离, 因此没有考虑其它离子的产生和所涉及的碰撞反应, 也忽略了碰撞过程中粒子类型和数量不变的反应, 主要考虑的碰撞反应如表 2 所示。

表 2 Penning 离子源中主要考虑的碰撞反应^[15-17]

Table 2 Main collision reactions considered in Penning ion sources

collision reaction	energy threshold E/eV	collision type
$e + H_2 \rightarrow e + 2H$	9.2	dissociation
$e + H_2 \rightarrow 2e + H^+ + H$	18.0	dissociation ionization
$e + H \rightarrow 2e + H_2^+$	15.4	ionization
$e + H_2 \rightarrow 3e + 2H^+$	23.0	dissociation ionization
$e + H \rightarrow 2e + H^+$	13.6	ionization
$e + H_2^+ \rightarrow e + H + H^+$	2.4	dissociation
$e + H_2^+ \rightarrow 2e + 2H^+$	14.7	dissociation ionization
$e + H_2^+ \rightarrow e + H^* + H^+$	14.0	dissociation excitation
$e + H_3^+ \rightarrow e + 2H + H^+$	14.0	dissociation
$e + H_3^+ \rightarrow 3H$	0.0	dissociation recombination

微观世界中,一定温度下的粒子处于不同的速度范围,单个粒子的速度都因为与其它粒子发生碰撞而不断变化。但是对大量的粒子来说,处于一定速度范围的比例是几乎不变的,即满足麦克斯韦分布^[18]。满足麦克斯韦能量分布的质量为 m , 能量为 $E=mv^2/2$ 的粒子入射到同样满足麦克斯韦能量分布的质量为 M , 温度为 $T=Mu^2/2$ 的粒子上, 当入射粒子为电子时, 其反应速率系数为^[17]

$$\langle \sigma v \rangle = \frac{1}{\pi^{1/2} u^3} \int_{v_{th}}^{\infty} v_r^3 dv_r \sigma(E_r) \exp(-v_r^2/u^2) \quad (7)$$

式中: 入射粒子的相对碰撞动能为 $E_r = m_r v_r^2/2$; $v_r = |\vec{v} - \vec{u}|$ 为相对碰撞速率; $m_r = mM/(m+M)$ 为入射粒子相对质量; v_{th} 是 v_r 的相对临界碰撞速率; σ 为碰撞反应的碰撞截面。由此可知, 电子与粒子之间的碰撞速率曲线如图 5 所示。

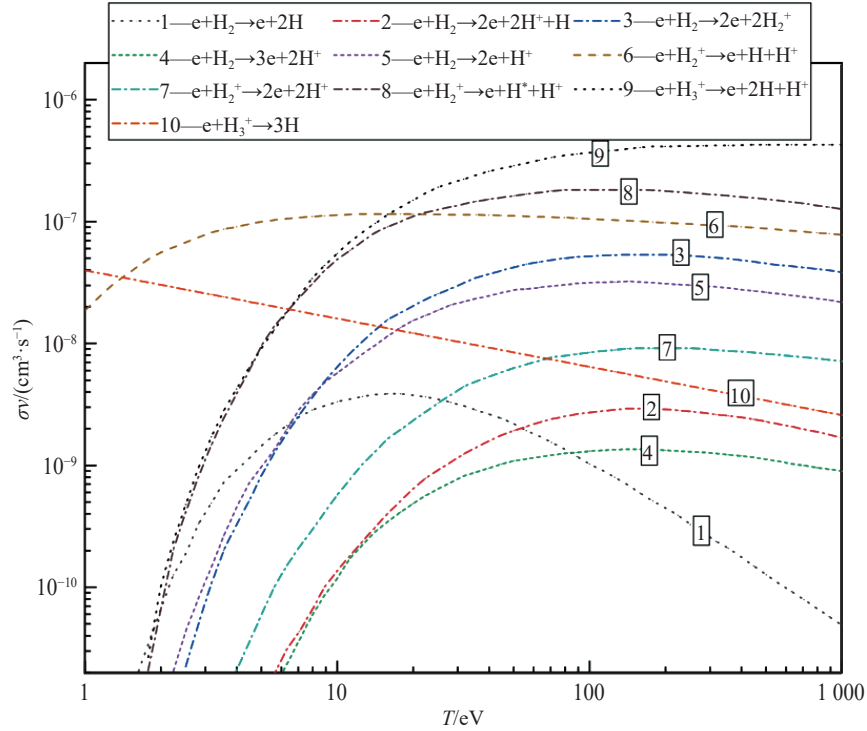


Fig. 5 Rate curve of collisions between electrons and particles

图 5 电子与粒子碰撞的速率曲线

一般, 电子的密度平衡方程以及能量平衡方程分别可以描述为^[19]

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = R_e - (\vec{u} \cdot \nabla) n_e \quad (8)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_e T_e) = A_p - n_e \sum_r n_r k_r \varepsilon_r \quad (9)$$

式中: n_e 为电子密度; R_e 为碰撞反应中产生和消耗的离子源项; $\vec{u}$ 为中性流体速度矢量; T_e 为电子温度; 能量平衡的最后一项 $n_e \sum_r n_r k_r \varepsilon_r$ 是电子参与碰撞反应产生的能量损失; A_p 为电子吸收的能量。

将碰撞反应分别带入电子密度平衡方程和能量平衡方程, 可得

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = n_e n_0 \alpha_2 + n_e n_0 \alpha_3 + 2n_e n_0 \alpha_4 - \frac{n_e}{\tau_e} \quad (10)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (n_e T_e) = P - n_e n_0 \sum_{i=1}^{10} \alpha_i E_i - \frac{3n_e T_e}{2\tau_E} \quad (11)$$

式中: n_0 为粒子密度; τ_e 为电子约束时间; τ_E 为能量约束时间; α_i 为碰撞过程 i 对应的速率系数, E_i 为碰撞过程 i 对应的能量阈值。

在 Penning 离子源中, 磁场对电子轨迹分布的影响很大。磁场的存在增加了电子的空间运动轨迹和电子寿命, 提升了电离的几率。本文假设电子在轴向的磁场方向上来回做往返运动, 在径向上因扩散打到阳极筒壁而消亡, 因此电子的约束时间与径向扩散系数的关系可以表示为

$$\tau_e \approx \tau_E \approx \frac{a^2}{D_{\perp} (2.405)^2} \quad (12)$$

式中: $D_{\perp}$ 为扩散系数; a 为离子源的阳极筒半径。

在低气压、强磁场的离子源中, 电子在径向上的扩散系数可以表示为^[20]

$$D_{\perp} \approx \frac{m^2 \bar{v}^2}{3\lambda e^2 B^2} \approx \frac{1}{16} \frac{kT_e}{eB} \quad (13)$$

式中: m 为带电粒子质量; $\bar{v}$ 为粒子的平均速度; λ 为粒子的平均自由程; k 为玻耳兹曼常数; e 为电子电荷量; B 为磁场强度。

2.2 仿真结果

Penning 离子源电离氢气产生的属于低温等离子体, 粒子平均温度一般在 2~8 eV。分子的温度很低, 甚至低至室温, 当增大压强, 分子密度增加。分子密度提升虽然增加了电子碰撞的概率, 但是高温电子经过多次碰撞后, 电子损失了大部分能量, 导致电子的平均温度降低。因此, 如图 6 所示, 随着离子源内部压强的增加, 电子温度在逐渐减小。当气压大于 2×10^{-3} Pa 时, 电子温度低于 10 eV, 与文献 [21] 中 Penning 离子源氢等离子体的双探针诊断结果吻合。然而, 电子温度随着离子源功率的增加而升高, 这是因为在施加更高的电压后, 由于电场的作用使电子能量增加, 同时也增加了电子与粒子碰撞成功的概率, 使得电离电流增加。

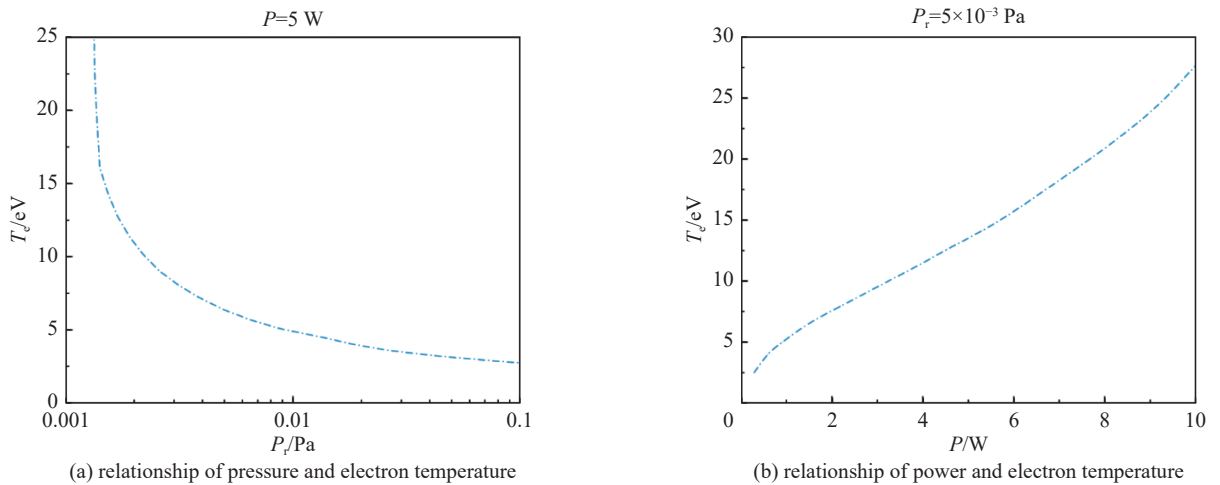


Fig. 6 Pressure and power in relation to electron temperature

图 6 压强和功率分别与电子温度的关系

如图 7 所示, 当离子源功率一定时, 电子密度随着气压的增加先增加后减小。根据实验经验, Penning 离子源实际运行气压在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Pa 范围内, 电子密度随着运行气压的提高而减少, 电子密度数量级一般在 10^{10} cm^{-3} ^[22]。离子源中电子密度随着施加功率的增大而逐渐增加, 功率与电子密度呈线性关系。随着电压的增加, 大量电子从

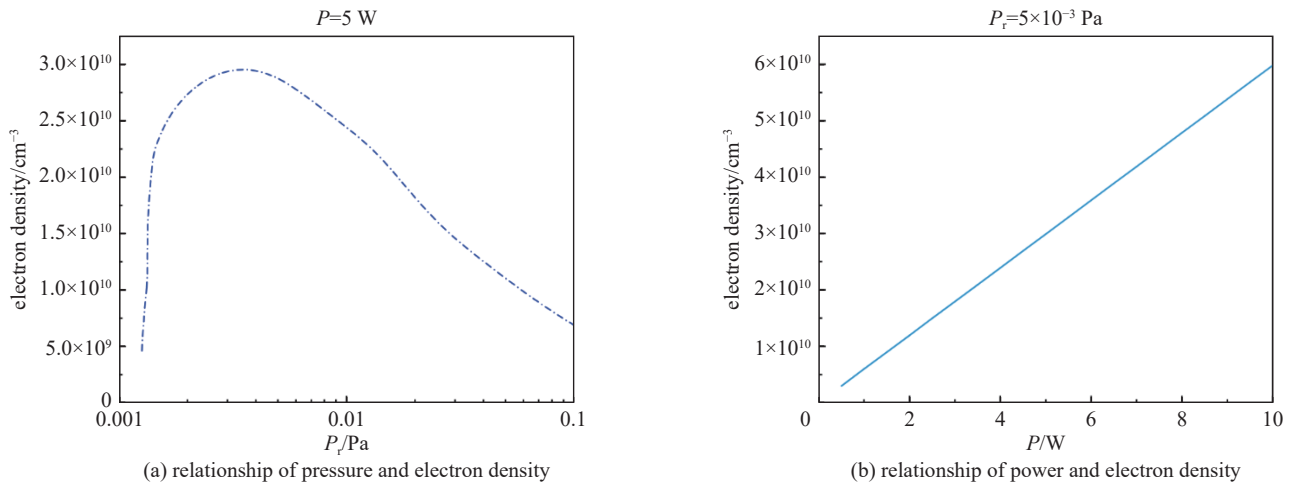


Fig. 7 Pressure and power in relation to electron density

图 7 压强和功率分别与电子温度的关系

阴极表面溢出, 并且与其它粒子发生碰撞产生二次电子, 这都使得电子密度增加。但是在实际试验过程电子密度与功率并非是完全的线性关系, 大量的电子会在阳极筒的壁面出现湮没。

如图 8 为磁场与电子密度的关系, 随着磁场的增加, 电子密度先增加后减小。当磁场过大时, 电子的回旋半径过小, 减少了电子与粒子碰撞的概率; 当磁场过小, 电子回旋半径过大, 容易打到壁面被吸收。因此在 Penning 离子源中, 磁场的强度不宜过大和过小, 需将磁场强度控制在 0.03~0.05 T。

3 结 论

本文中, 以实验室设计的 Penning 离子源为研究对象, 对其开展了诊断及仿真研究, 得到如下结论: 离子源的电离电流在一定电压和压强范围内, 随着压强和电压的增加逐渐增加, 当压强为 5×10^{-2} Pa、电压为 4 kV 时, 电离电流可达到 1 mA; 通过 CCD 相机观察, 在离子源内部等离子体分布呈现中间密集四周较为稀疏, 电子平均温度约 4 eV, 电子密度约 3×10^{10} cm⁻³; 通过全局模型对离子源进行仿真的结果可知, 要使得离子源性能最优, 应将磁场强度控制在 0.03~0.05 T, 压强控制在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Pa, 并在不改变离子源工作模式的情况下提高其运行功率。

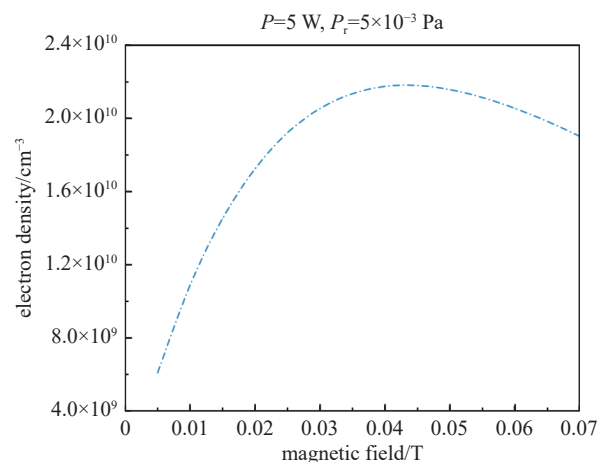


Fig. 8 Relationship between magnetic field and electron density

图 8 磁场强度与电子密度的关系

参考文献:

- [1] Perot B, Perret G, Mariani A, et al. The EURITRACK project: development of a tagged neutron inspection system for cargo containers[C]//Proceedings of the SPIE 6213, Non-Intrusive Inspection Technologies. 2006: 621305.
- [2] Ruskov I N, Kopatch Y N, Bystritsky V M, et al. TANGRA-setup for the investigation of nuclear fission induced by 14.1 MeV neutrons[J]. *Physics Procedia*, 2015, 64: 163-170.
- [3] Koltick D S, Kane S Z, Lvovsky M, et al. Characterization of an associated particle neutron generator with ZnO: Ga alpha-detector and active focusing[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56(3): 1301-1305.
- [4] Chichester D L, Lemchak M, Simpson J D. The API 120: A portable neutron generator for the associated particle technique[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2005, 241(1/4): 753-758.
- [5] Li Cong, Jing Shiwei, Xue Hui. Dose evaluation in a portable D-T neutron generator facility by Monte Carlo method[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2020, 324(2): 533-539.
- [6] 肖坤祥, 周明贵, 谈效华. 潘宁离子源中电磁场和气压对氢气电离的影响[J]. *真空电子技术*, 2003(6): 26-28, 38. (Xiao Kunxiang, Zhou Mingui, Tan Xiaohua. The influences of electromagnetic field and pressure on hydrogen ionization in Penning ion source[J]. *Vacuum Electronics*, 2003(6): 26-28, 38)
- [7] 石磊, 肖坤祥, 钱沐杨. 带电粒子在微型潘宁离子源中的动力学仿真[C]//中国核科学技术进展报告(第三卷)——中国核学会 2013 年学术年会论文集第 6 册(核物理分卷、计算物理分卷、粒子加速器分卷). 2013. (Shi Lei, Xiao Kunxiang, Qian Muyang. Dynamic simulation of the charged particles in miniature

- Penning ion source[C]//Progress Report on China Nuclear Science and Technology. 2023)
- [8] Noori H, Khodabakhshi E, Jögi I. The effects of uniform versus non-uniform magnetic field on characteristics of a Penning ion source[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, 962: 163667.
- [9] Yang Zhen, Dong Pan, Wang Tao, et al. Studies on hydrogen plasma in a Penning ion source by optical emission spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 2941-2945.
- [10] 李卓希, 杨洪广. 中子管用潘宁离子源电离特性研究[J]. 电子世界, 2019(11): 31-32. (Li Zhuoxi, Yang Hongguang. Study on the ionization characteristics of Penning ion source in neutron tubes[J]. *Electronics World*, 2019(11): 31-32)
- [11] 武文斌, 彭士香, 张艾霖, 等. 微型电子回旋共振离子源的全局模型[J]. *物理学报*, 2022, 71: 145204. (Wu Wenbin, Peng Shixiang, Zhang Ailin, et al. Global model of miniature electron cyclotron resonance ion source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71: 145204)
- [12] 李杰, 董攀, 王韬, 等. 磁场调控型离子源的设计与实验[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 074001. (Li Jie, Dong Pan, Wang Tao, et al. Design and experimental study of magnetic field regulating ion source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 074001)
- [13] 董攀, 龙继东, 陈德彪, 等. 强流激光离子源中的等离子体参数诊断[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 055103. (Dong Pan, Long Jidong, Chen Debiao, et al. Diagnosis of plasma in high current laser ion source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 055103)
- [14] 董攀, 龙继东, 杨振, 等. Penning 型负氢离子源诊断[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2503-2506. (Dong Pan, Long Jidong, Yang Zheng, et al. Diagnosis of Penning-type negative hydrogen ion source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2503-2506)
- [15] Chan C F, Burrell C F, Cooper W S. Model of positive ion sources for neutral beam injection[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(11): 6119-6137.
- [16] Tawara H, Itikawa Y, Nishimura H, et al. Cross sections and related data for electron collisions with hydrogen molecules and molecular ions[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1990, 19(3): 617-636.
- [17] Schmidt M. Elementary processes in hydrogen-helium plasmas cross sections and reaction rate coefficients. by R. K. Janev, W. D. Langer, K. Evans, Jr., D. E. Post, Jr. Springer-Verlag Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo (Springer Series on Atoms and Plasmas Vol. 4) p.326 Fig.107[J]. *Contributions to Plasma Physics*, 1989, 29: 10.
- [18] Huh S Y, Kim N K, Jung B K, et al. Global model analysis of negative ion generation in low-pressure inductively coupled hydrogen plasmas with bi-Maxwellian electron energy distributions[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 033506.
- [19] Mamedov N V, Kolodko D V, Sorokin I A, et al. Energy & mass-charge distribution peculiarities of ion emitted from Penning source[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 830: 012063.
- [20] 陈宇航, 龙继东, 刘尔祥, 等. 磁场引起的潘宁离子源阻抗变化研究[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 045107. (Chen Yuhang, Long Jidong, Liu Erxiang, et al. Impact of magnetic field on Penning discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 045107)
- [21] Jin Dazhi, Yang Zhonghai, Xiao Kunxiang, et al. Diagnosis of hydrogen plasma in a miniature Penning ion source by double probes[J]. *Plasma Science and Technology*, 2009, 11(1): 48-51.
- [22] Yan Fei, Jin Dazhi, Chen Lei, et al. Deuterium plasma diagnosis in a miniature penning ion source by a single probe[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(7): 2546-2549.