

基于多通道静电探针系统的GADX平台辉光放电研究

高浩文*, 冯 威, 郝春静, 武耀星, 赵永正

上海科技大学终极能源中心, 上海

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年6月9日; 发布日期: 2026年6月16日

摘 要

辉光与电弧放电实验平台主要用于研究射流驱动等离子体的等离子体预电离阶段以及后续整枪发射时的弧光放电过程。在磁惯性约束聚变同轴等离子体枪的预电离过程中引入辉光放电技术, 能显著提高能量利用效率。为诊断该系统脉冲辉光放电期间不同区域的等离子体参数信息。本研究使用了一套4通道静电三探针诊断系统用于诊断实验平台的阴极和阳极前端5 cm, 且各自在环向位置上布设两组间隔180°。通过这一套静电探针系统, 我们对比了不同限流电阻、不同气压下的等离子体行为, 并研究了低气压下等离子体电子密度与放电电压的演化关系。这对于研究同轴等离子体枪内预电离阶段等离子体的参数演化和动力学过程至关重要, 为理解等离子体射流形成的物理过程提供了关键实验基础。

关键词

静电探针, 脉冲辉光放电, 磁惯性约束聚变, 预电离

Glow Discharge Study on the GADX Platform Using a Multi-Channel Langmuir Probe System

Haowen Gao*, Wei Feng, Chunjing Hao, Yaoxing Wu, Yongzheng Zhao

Center for Ultimate Energy, ShanghaiTech University, Shanghai

Received: April 21, 2026; accepted: June 9, 2026; published: June 16, 2026

Abstract

The glow and arc discharge experimental platform is primarily dedicated to studying the pre-
*通讯作者。

文章引用: 高浩文, 冯威, 郝春静, 武耀星, 赵永正. 基于多通道静电探针系统的 GADX 平台辉光放电研究[J]. 应用物理, 2026, 16(6): 657-665. DOI: 10.12677/app.2026.166060

ionization stage and the subsequent arc discharge process in plasma-jet-driven magneto-inertial fusion (PJMIF). Introducing glow discharge technology into the pre-ionization stage of a coaxial plasma gun for magneto-inertial confinement fusion can significantly enhance the discharge efficiency. To diagnose the plasma parameters in different regions during the pulsed glow discharge of this system, a 4-channel electrostatic triple-probe diagnostic system is employed in this study. The probes are installed 5 cm in front of the cathode and the anode of the platform; at each of these locations, two probe assemblies are arranged in the azimuthal direction, separated by 180° . Using this electrostatic probe system, we compared the plasma behavior under different current-limiting resistances and gas pressures, and studied the evolution of the plasma electron density with discharge voltage under low-pressure conditions. This work is crucial for investigating the parameter evolution and dynamic processes of the plasma during the pre-ionization stage inside the coaxial plasma gun, and it provides a key experimental basis for understanding the physical mechanisms underlying plasma jet formation.

Keywords

Langmuir Probe, Pulsed Glow Discharge, Magneto-Inertial Fusion, Pre-Ionization

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

磁惯性约束聚变(Magneto-inertial fusion, MIF)是设计在磁约束聚变(Magnetic confinement fusion, MCF)和惯性约束聚变(Inertial confinement fusion, ICF)之间的参数区间运行,能显著降低实现盈亏平衡聚变装置所需成本的一种新型的聚变途径[1]-[4]。等离子体射流驱动磁惯性约束聚变(Plasma-jet-driven magneto-inertial fusion, PJMIF)是实现 MIF 的一种关键途径,不仅重视同轴等离子体枪中的预电离过程研究,而且强调了对等离子体衬层和磁化等离子体靶的研究[5]-[7]。这些研究直接决定了等离子体射流的形成过程及其后续等离子体射流能否实现汇聚。脉冲辉光放电是上海科技大学研制的第一代同轴等离子体枪和高 β 等离子体枪中初始等离子体产生的主要方法[8]。辉光与电弧放电实验(Glow and Arc Discharge eXperimental, GADX)系统正式为深入研究此放电机制而建立。其中,测量脉冲辉光放电过程中的等离子体参数,如电子温度(T_e)和电子密度(n_e),对于阐明预电离物理过程,推进等离子体枪技术提供基础理论支撑至关重要。

尽管辉光放电等离子体诊断已有较长历史,但在类似于 PJMIF 等离子体枪预电离所需的高电压、中等气压条件下,对其关键参数进行高时空分辨率(特别是多通道、环向分辨)的原位测量仍具挑战性,相关实验数据相对缺乏。针对 GADX 系统脉冲辉光放电的诊断需求,本研究开发了一套具有高时间分辨率(10 ns)的多通道静电三探针系统,旨在覆盖阴阳极前方关键区域(负辉区与正柱区),并获得空间分辨的等离子体参数分布,特别是探索可能存在的环向不均匀性。本文报道该诊断系统的开发、在 GADX 上的应用及初步实验结果,重点展示其在揭示等离子体参数时空演化和首次观测到环向不对称现象方面的能力。

本文结构如下:第2节介绍 GADX 实验系统及其诊断需求;第3节详细描述静电探针诊断系统的设计与实现;第4节展示静电探针系统测量的初步实验结果;第5节为讨论,深入分析实验结果特别是环向不对称性的意义;第6节总结全文并展望未来研究计划。

2. 实验方法

GADX 系统的目的研究等离子体枪(包括 STG1 和 HiBG1)中初始等离子体形成过程(预电离过程[9])

的辉光放电等离子体，以及等离子体射流发射时的电弧放电等离子体。其实验参数初始设计旨在与等离子体枪参数保持一致，以复现类似的等离子体放电条件。

GADX 系统由电源系统、充气与抽气系统、控制系统以及采样频率为 100 MHz 的数据采集系统(DAQ)组成。如图 1 所示，真空室和抽气系统置于 GADX 机柜内。圆柱形真空室由石英玻璃制成，真空度可达 10^{-4} Pa。实验时，可向腔内充入纯度大于 99.999% 的氩气(Ar)或氦气(He)作为工作气体。通过调节进气阀，气压可在 20~300 Pa 范围内调整。真空室内有两根平行的圆柱形钨电极(阳极和阴极)，直径均为 60 mm，厚度为 15 mm。两电极间距可在 50~500 mm 范围内调节，具体取决于真空室尺寸。施加于电容器的操作电压可在 0~2000 V 之间变化。为防止实验中氩气等离子体放电在击穿后过渡到电弧放电，在选择辉光放电模式时，GADX 系统回路中串联了 1 k Ω 或 10 k Ω 的限流电阻。

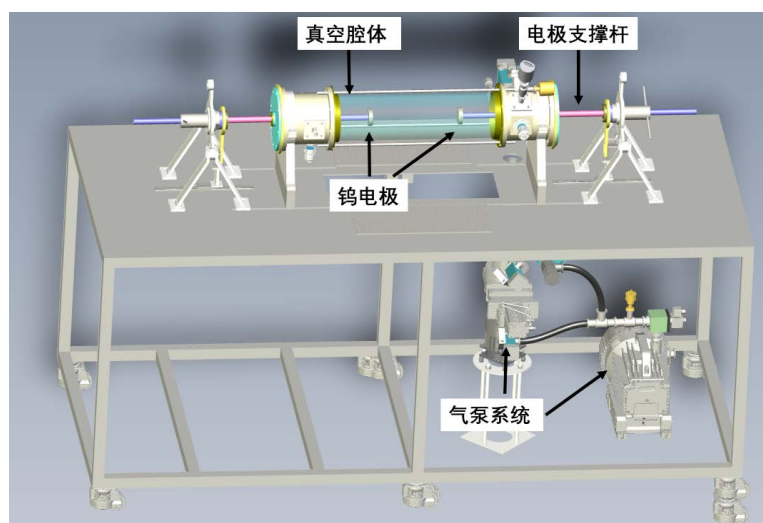


Figure 1. GADX system schematic diagram
图 1. GADX 系统示意图

GADX 系统具备产生脉冲辉光放电等离子体、直流稳态辉光放电等离子体以及脉冲电弧放电的能力。在电弧放电模式下，电子密度通常超过 10^{21} m $^{-3}$ 。针对此条件，GADX 系统已配备多通道激光干涉诊断系统进行等离子体研究。而在辉光放电模式下，预期的等离子体电子温度范围在 0~5 eV 之间，电子密度介于 10^{18} 至 10^{20} m $^{-3}$ ，这使得其不适用于 GADX 现有的激光干涉诊断。因此，建立一套能够覆盖上述参数范围的静电探针诊断系统至关重要。此外，多通道探针系统的实施将能够诊断辉光放电等离子体不同区域的电子温度和密度。该能力将为分析预电离过程提供大量具有空间分辨的多维实验数据。

静电探针是一种常见的诊断工具，广泛应用于托卡马克[10]-[12]、仿星器[13]、场反位形[14] [15]等许多聚变装置中。其主要优点包括结构相对简单、制造成本低，能够直接接触等离子体以高时间和空间分辨率测量局部参数，如离子通量、电子温度、密度和悬浮电位[16]。

GADX 上的静电探针诊断系统在 2025 年首次运行能力实验前完成建设。如图 2 所示，在真空室内，2 套静电探针安装于阳极前方 5 cm 轴向位置，另有 2 套安装于阴极前方 5 cm 轴向位置。探针位置的选择旨在测量负辉区和正柱区内的等离子体参数。这些探针距中心轴 4 cm，且彼此间方位角相差 180°。静电探针材料为钨，几何形状为圆柱形，有效收集面积为 7.07 mm 2 。陶瓷支架由 Al $_2$ O $_3$ 制成，安装在电极支撑杆上。这些支架的几何形状专为同时容纳静电探针和 B-dot 探针而设计，关键设计考虑是最大限度地减少其对中心辉光放电等离子体的影响。电极支撑杆用于为电极提供结构支撑并允许调节电极间距。

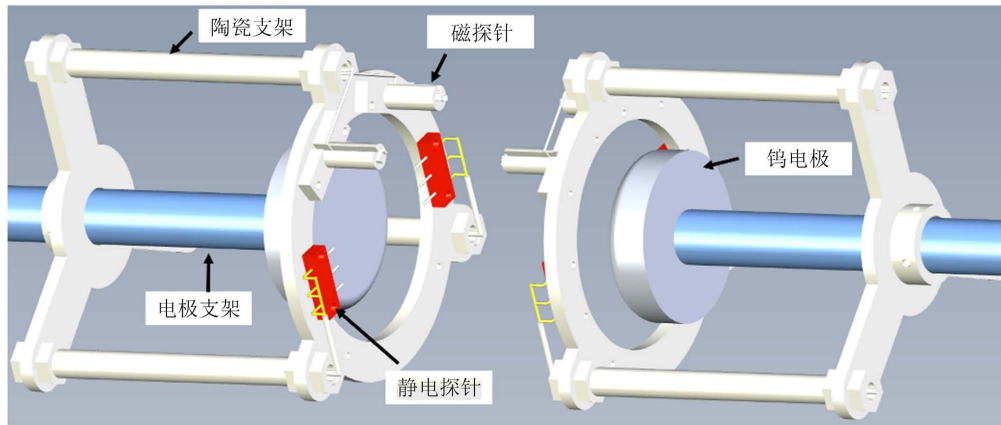


Figure 2. Schematic diagram of diagnostic bracket and electrodes
图 2. 诊断支架和电极示意图

如图 3 所示，采用静电探针三探针系统，其中一个探针测量悬浮电位(V_f)，同时在另外两个探针之间施加一定偏置电压(V_d)，将其中一个探针偏置到足够负的电位，从而收集离子饱和电流(I_s)。假定三个探针的收集面积相同(A_{pr})，则可通过正偏探针的电压(V_p)和悬浮探针的电压(V_f)利用以下表达式确定电子温度[17]：

$$T_e [eV] = \frac{V_p - V_f}{\ln 2} \quad (1)$$

其中 T_e 单位为 eV，电压单位为 V。电子密度可由下式给出：

$$n_e = \frac{I_s}{0.61eA_{pr}C_s} \quad (2)$$

其中 e 为元电荷， $C_s = (kT_e/m_i)^{0.5}$ 为离子声速(k_B 为玻尔兹曼常数， m_i 为离子质量)，系数 0.61 在辉光放电条件下是适用的。探针信号从辉光放电等离子体收集后，通过集成在陶瓷支架内的陶瓷管馈入静电探针电路，输出信号最终由 DAQ 系统决定。

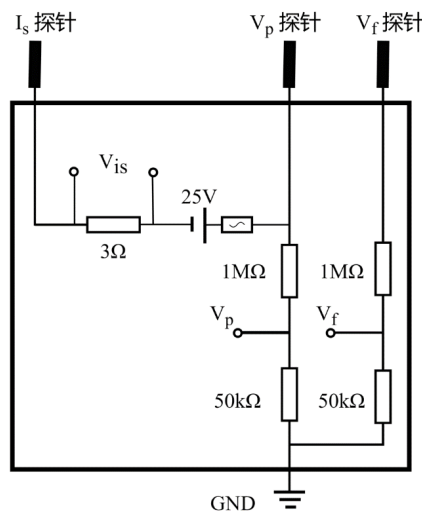


Figure 3. The Langmuir probe circuitry
图 3. 探针电路示意图

本实验采用的三探针理论核心假设均满足工况要求：鞘层近似成立：经德拜长度公式

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \quad (3)$$

计算，实验参数范围内最大德拜长度 $\lambda_D \approx 1.28 \mu\text{m}$ ，远小于探针半径 0.75 mm ，符合 $\lambda_D \ll rp$ 的经典适用判据，电子温度核心计算公式有效[18]。

在 20~300 Pa 工况下，电子平均自由程为 $92 \mu\text{m} \sim 1.38 \text{ mm}$ ，远大于 μm 级鞘层厚度，鞘层内无碰撞假设成立；采用的 0.61 离子饱和电流修正系数，已覆盖中等气压辉光放电的离子碰撞效应，无需额外修正。

3. 结果和讨论

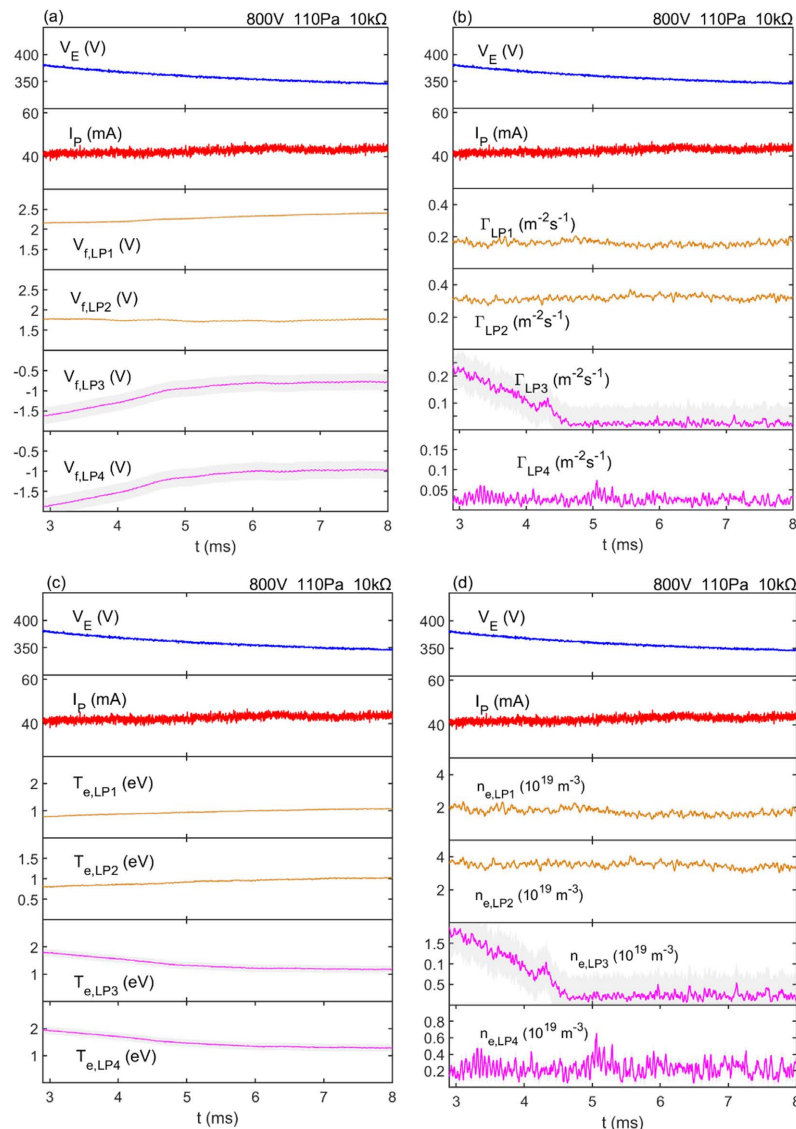


Figure 4. Time evolution of floating voltage (a), particle flux (b), T_e (c) and n_e (d) parameters. The shaded band around the waveform indicates the standard deviation of the data during the steady-state phase. This representation applies to all subsequent T_e and n_e waveform figures

图 4. 悬浮电位(a)、粒子通量(b)、电子温度(c)和电子密度(d)参数随时间演化(LP1, LP2: 阳极区; LP3, LP4: 阴极区)。阴影带状区域表示稳态阶段数据的标准差。此表示法适用于后续所有的电子温度和电子密度波形图

多通道静电三探针系统[19]已成功应用于 GADX 作为主要诊断手段。在近期进行的 2025 年 IOC 实验中,这四对静电探针测量了初步实验数据,实验条件为:电容器电压 600 至 2000 V,电极间距 25 厘米,工作气体为 Ar,腔室气压范围 20~300 Pa。该静电探针系统能够在脉冲辉光放电等离子体中不同径向和环向位置表征关键等离子体参数,包括悬浮电位、粒子通量、电子温度和电子密度。

在典型的脉冲辉光放电中,放电平台的电极电压会在脉冲持续器件缓慢下降,而等离子体电流维持稳定。图 4 展示了静电探针系统在典型脉冲辉光放电(电容器放电电压设定为 800 V)中测量参数随时间的变化。其中 LP1 和 LP2 代表阳极区域前方的探针,LP3 和 LP4 代表阴极区域前方的探针。在脉冲辉光放电的稳态阶段,由于电荷损失,电极电压逐渐下降,稳态等离子体电流为 40 mA。阳极区域的两组探针测量到悬浮电位约为+2 V,而阴极区域的两组探针记录的悬浮电位约为-2 V。这证明了阳极鞘层的电子收集功能,而阴极鞘层则表现出电子排斥行为。等离子体电子温度约为 1 eV,阳极附近的粒子通量约为 $2.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$,高于阴极附近的 $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。同样,阳极附近的电子密度测量值为 $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,高于阴极侧的 $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。

在限流电阻分别为 1 k Ω 和 10 k Ω 条件下,电极电压、等离子体电流和等离子体电子温度在相同的放电参数下会出现明显不同。这是由于限流电阻值显著影响放电回路的分压,从而在相同电压和气压条件下明显影响测得的电子温度。如图 5 所示,较低的限流电阻导致施加在等离子体上的电压更高,因此产生相对较高的电子温度。

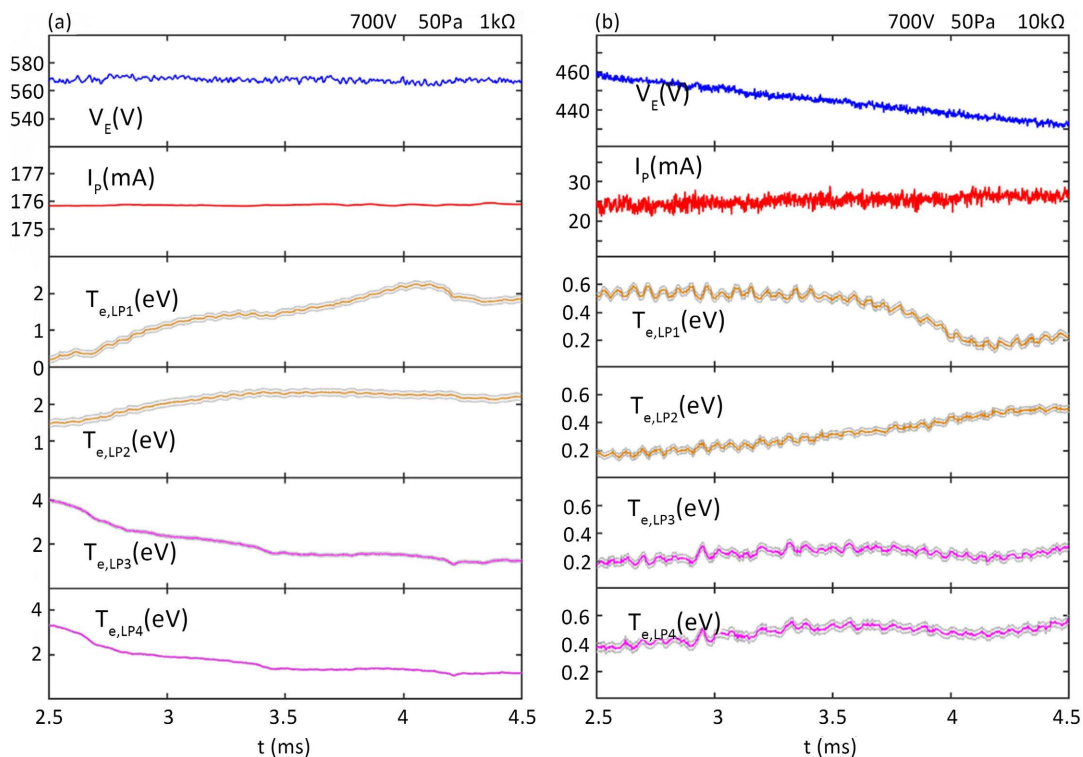


Figure 5. Time evolution of electrode voltage, plasma current and the T_e parameter measured by Langmuir probes in pulsed glow discharge under current-limiting resistances of 1 k Ω and 10 k Ω

图 5. 限流电阻为 1 k Ω 和 10 k Ω 时,脉冲辉光放电中电极电压、等离子体电流和静电探针测量的电子温度参数随时间演化对比

如图 6 所示,在 80 Pa 条件下,等离子体电子温度随着放电电压的升高而升高,这是由于放电电压升

高使轴向电场增强[20], 电子单位时间内从电场获取的能量随之增加, 为消耗额外注入的能量并建立新的平衡, 等离子体电子温度相应提高。如图 7 所示, 随着放电电压升高。等离子体密度呈现下降趋势, 这是由于随着放电电压的升高, 粒子的损失率升高, 电离率小于损失率, 最终等离子体密度相应下降。

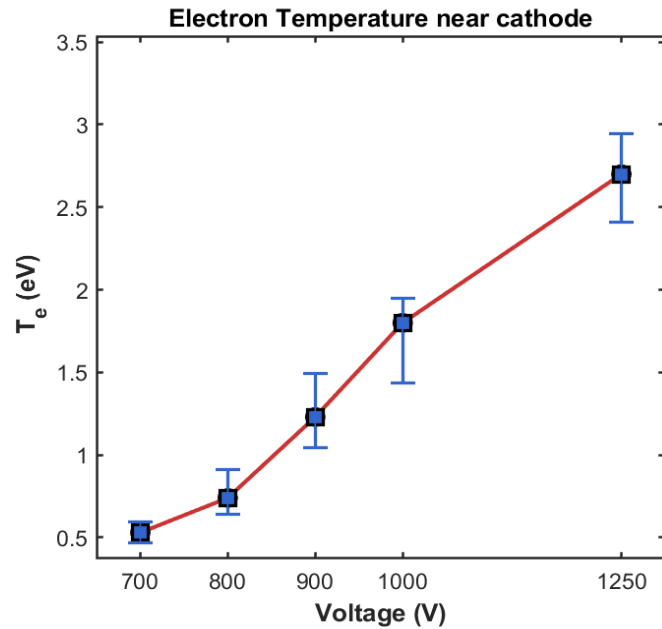


Figure 6. Comparison of electron temperature parameter evolution over time under a constant pressure of 80 Pa
图 6. 实验条件 80 Pa 条件下, 电子温度参数随时间演化对比

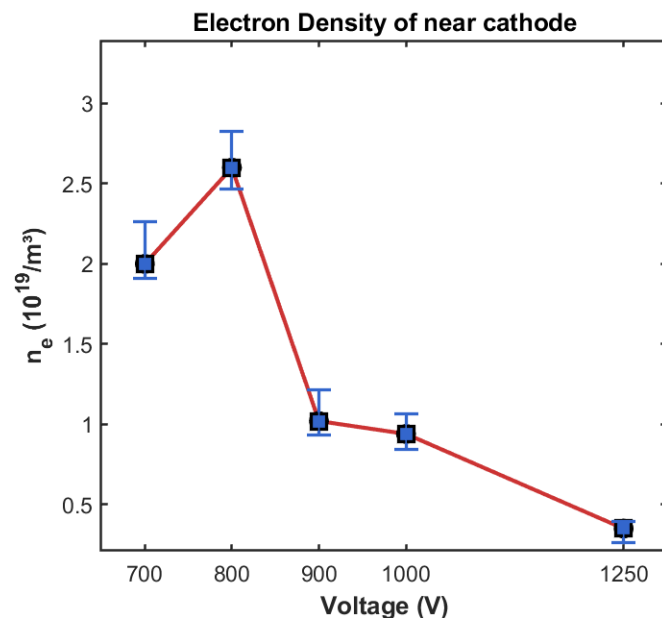


Figure 7. Comparison of electron density parameter evolution over time under a constant pressure of 80 Pa
图 7. 实验条件 80 Pa 条件下, 电子密度参数随时间演化对比

基于实验测得的等离子体参数, 结合经典辉光放电理论、鞘层物理、碰撞输运与不稳定性理论, 可

对核心观测现象进行完整的半定量物理解释：通过测得的悬浮电位与电子温度，计算得到阳极正柱区等离子体电位约+4.2 V、阴极负辉区约-3.1 V，与阳极鞘层电子收集、阴极鞘层电子排斥的特性完全匹配，阳极区双极扩散平衡维持了稳定的电子温度，阴极区电子经鞘层强电场加速后在负辉区发生电离碰撞、能量随距离衰减，因此电子密度较阳极区低近 1 个数量级，符合经典辉光放电的区域结构规律；固定气压下放电电压升高使约化电场同步增大，电子温度由电场获能与碰撞损失的能量平衡关系决定，实验拟合得到电子温度与电压呈 0.58 次幂的标度关系，与氩气辉光放电的经典标度指数(0.5~0.6)高度吻合，从能量平衡角度解释了电子温度随放电电压升高而增大的核心规律。此外，图 4、图 5 的结果清晰地展示了等离子体参数在阴阳极附近的差异，以及限流电阻对放电特性和电子温度的关键影响，图 6 发现了 GADX 平台上等离子体温度随着放电电压的升高而增大，图 7 发现了等离子体密度随着放电电压的升高而下降，这些定量数据为理解和建模预电离过程提供了重要输入。本研究不仅为等离子体枪的电极构型优化与气体注入方案提供了新依据，同时验证了多通道静电探针系统捕捉等离子体精细结构的能力，为预电离过程的精准调控奠定了实验基础。

4. 结论

本研究在 GADX 系统上成功开发了一套高时间分辨率的 4 通道静电三探针诊断系统。利用该系统成功测量了脉冲辉光放电负辉区和正柱区的等离子体参数(电子温度、电子密度、悬浮电位、粒子通量)，并系统研究了低气压下等离子体参数受限流电阻，气压和电极电压的影响。这些结果表明 GADX 系统具备开展脉冲辉光放电物理研究的能力，为理解 PJMIF 等离子体枪中的预电离过程提供了物理基础。

结合本文实测的脉冲辉光放电等离子体参数，基于经典辉光放电理论、鞘层物理、碰撞输运与等离子体不稳定性理论，可对核心实验现象进行半定量的物理解释：基于典型工况下阳极区悬浮电位+2 V、电子温度 1 eV，阴极区悬浮电位-2 V、电子温度 0.8 eV 的实测结果，通过计算得阳极正柱区等离子体电位约+4.2 V、阴极负辉区约-3.1 V，与阳极鞘层电子收集、阴极鞘层电子排斥的经典鞘层物理规律完全吻合，阳极区等离子体满足双极扩散平衡因而电子温度维持稳定，阴极区电子经鞘层强电场加速后在负辉区完成电离碰撞、能量随运输距离快速衰减，因此阴极区电子密度较阳极区低近 1 个数量级，符合直流辉光放电的典型区域结构特征。

未来工作将集中在 GADX 系统上，结合激光干涉仪、高速相机和光谱学等其他诊断手段，深入研究不同气压条件和不同电极电压下的电子温度和密度时空演化规律。特别将重点探究环向不对称性的起源、演化及其对放电模式转换(辉光到电弧)的影响机制。预期通过多诊断联合研究，获得不同条件下 PJMIF 预电离过程的多维物理图像，深化对预电离阶段环向不对称性成因的理解，从而为未来优化等离子体射流的形成提供科学依据。

基金项目

国家发改委重大科技基础设施项目(批准号：2208-000000-04-01-249628)资助的课题。

参考文献

- [1] Lindemuth, I.R. and Kirkpatrick, R.C. (1983) Parameter Space for Magnetized Fuel Targets in Inertial Confinement Fusion. *Nuclear Fusion*, **23**, 263-284. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/23/3/001>
- [2] Hsu, S.C. and Langendorf, S.J. (2018) Magnetized Plasma Target for Plasma-Jet-Driven Magneto-Inertial Fusion. *Journal of Fusion Energy*, **38**, 182-198. <https://doi.org/10.1007/s10894-018-0168-z>
- [3] Yager-Elorriaga, D.A., Gomez, M.R., Ruiz, D.E., Slutz, S.A., Harvey-Thompson, A.J., Jennings, C.A., et al. (2022) An Overview of Magneto-Inertial Fusion on the Z Machine at Sandia National Laboratories. *Nuclear Fusion*, **62**, Article ID: 042015. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2dbe>

-
- [4] Thio, Y.C.F., Knapp, C.E., Kirkpatrick, R.C., Siemon, R.E. and Turchi, P.J. (2001) A Physics Exploratory Experiment on Plasma Liner Formation. *Journal of Fusion Energy*, **20**, 1-11. <https://doi.org/10.1023/a:1019813528507>
- [5] Langendorf, S.J., Yates, K.C., Hsu, S.C., Thoma, C. and Gilmore, M. (2019) Experimental Study of Ion Heating in Obliquely Merging Hypersonic Plasma Jets. *Physics of Plasmas*, **26**, Article ID: 082110. <https://doi.org/10.1063/1.5108727>
- [6] Thio, Y.C.F., Hsu, S.C., Witherspoon, F.D., Cruz, E., Case, A., Langendorf, S., *et al.* (2019) Plasma-Jet-Driven Magneto-Inertial Fusion. *Fusion Science and Technology*, **75**, 581-598. <https://doi.org/10.1080/15361055.2019.1598736>
- [7] Thio, Y.C.F., Hao, C.J. and Qi, S.B. (2024) Partition Functions, Adiabatic Exponent and Their Role in the Analysis of Spectroscopic Doppler Shift in Determining the Mach Number and Temperature of a Hypersonic Plasma Jet. 2024 *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, Beijing, 16-20 June 2024, 1. <https://doi.org/10.1109/icops58192.2024.10627014>
- [8] Stangeby, P.C. (1987) Edge Probes. *Journal of Nuclear Materials*, **145**, 105-116. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90315-1](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90315-1)
- [9] Merlino, R.L. (2007) Understanding Langmuir Probe Current-Voltage Characteristics. *American Journal of Physics*, **75**, 1078-1085. <https://doi.org/10.1119/1.2772282>
- [10] Qayyum, A., Ahmad, N., Ahmad, S., Deeba, F., Ali, R. and Hussain, S. (2013) Time-Resolved Measurement of Plasma Parameters by Means of Triple Probe. *Review of Scientific Instruments*, **84**, Article ID: 123502. <https://doi.org/10.1063/1.4838658>
- [11] Laube, R., Laux, M., Ye, M.Y., Greuner, H. and Lindig, S. (2011) Designs of Langmuir Probes for W7-x. *Fusion Engineering and Design*, **86**, 1133-1136. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.12.059>
- [12] Esztermann, A. and Löwen, H. (2004) Colloidal Brazil-Nut Effect in Sediments of Binary Charged Suspensions. *Europhysics Letters (EPL)*, **68**, 120-126. <https://doi.org/10.1209/epl/i2004-10168-7>
- [13] Ming, T., Zhang, W., Chang, J., Wang, J., Xu, G., Ding, S., *et al.* (2009) Improvement of Divertor Triple Probe System and Its Measurements under Full Graphite Wall on East. *Fusion Engineering and Design*, **84**, 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.10.005>
- [14] Matthews, G.F. (1994) Tokamak Plasma Diagnosis by Electrical Probes. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **36**, 1595-1628. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/36/10/002>
- [15] Phelps, A.V. and Pitchford, L.C. (1985) Electron-Atom Collision Cross Sections for Argon. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **14**, 1047-1076.
- [16] Chen, F.F. (2003) Langmuir Probe Diagnostics. *IEEE-ICOPS Meeting*, Jeju, 5 June 2003, 1-40. <https://www.seas.ucla.edu/~ffchen/Pubs/Chen210R.pdf>
- [17] Benilov, M.S. (2008) Understanding and Modelling Plasma-Electrode Interaction in High-Pressure Arc Discharges: A Review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **41**, Article ID: 144001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/14/144001>
- [18] Bak, J.G. and Lee, S.G. (2003) KSTAR Edge Probe Diagnostics. *Review of Scientific Instruments*, **74**, 1578-1582. <https://doi.org/10.1063/1.1527242>
- [19] Tsois, N., Dorn, C., Kyriakakis, G., Markoulaki, M., Pflug, M., Schramm, G., *et al.* (1999) A Fast Scanning Langmuir Probe System for Asdex-Upgrade Divertor. *Journal of Nuclear Materials*, **266**, 1230-1233. [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(98\)00569-8](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(98)00569-8)
- [20] Li, Q., Zhu, G., Ren, B., Ying, J., Yang, Z. and Sun, X. (2023) Experimental Studies of Cusp Stabilization in Keda Mirror with Axisymmetry (KMAX). *Plasma Science and Technology*, **25**, Article ID: 025102. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac8e45>