

同轴枪脉冲放电等离子体输运过程中密度变化的实验研究

杨亮 张俊龙 闫慧杰 滑跃 任春生

Experimental study on coaxial gun pulse discharge plasma density change in transport process

Yang Liang Zhang Jun-Long Yan Hui-Jie Hua Yue Ren Chun-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 055203 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.055203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.055203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

放电参数对同轴枪中等离子体团的分离的影响

[Influence of discharge parameters on blow-by in a coaxial plasma gun](#)

物理学报.2015, 64(7): 075201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.075201>

镓原子的 Stark 能级结构

[Stark structure of atomic gallium](#)

物理学报.2015, 64(9): 093201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.093201>

铯 47D 精细能级超冷里德堡原子自由演化的动力学研究

[Spontaneous evolution of Cs 47D Rydberg atoms at different fine levels](#)

物理学报.2015, 64(2): 023201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.023201>

同轴枪脉冲放电等离子体输运过程中密度变化的实验研究

杨亮 张俊龙 闫慧杰 滑跃 任春生[†]

(大连理工大学物理与光电工程学院, 三束材料改性教育部重点实验室, 大连 116024)

(2016年8月27日收到; 2016年12月7日收到修改稿)

同轴枪放电等离子体具有密度高、输运速度快等特点, 在核物理、航天工程等领域具有广阔的应用前景, 已成为国际前沿研究热点. 同轴枪中的等离子体密度是反映其应用特性的重要参数之一, 因此等离子体密度在输运过程中的变化对理论研究和实际应用都具有重要意义. 利用发射光谱法测量了 H_{β} 谱线的 Stark 展宽, 从而计算出同轴枪放电等离子体密度在输运过程中的变化. 结果显示, 当电源注入能量为 1.08 kJ、同轴枪内空气气压为 4.0 Pa 时, 等离子体密度在输运过程中不断增加; 相同能量注入条件下, 当同轴枪内空气气压增加至 10 Pa 时, 等离子体密度在输运过程中出现了先增加后减小的趋势; 当电源的注入能量达到 7.68 kJ 时, 等离子体密度在 10 Pa 气压条件下输运时也出现了一直增加的现象. 此外, 当同轴枪内的工作气体变为氩气时, 在注入能量为 1.08 kJ、枪内气压 4.0 Pa 条件下, 等离子体密度在输运过程中一直减小.

关键词: 同轴枪, 等离子体密度, Stark 展宽

PACS: 52.80.Vp, 94.20.Fg, 32.60.+i

DOI: 10.7498/aps.66.055203

1 引言

同轴枪通常是由两个同轴电极组成(一个实心圆柱阳极和一个空心圆柱阴极), 它通过两电极间瞬时的强放电产生一个磁化的高密度等离子体团, 该等离子体团在电流流过同轴枪时产生的洛伦兹力作用下被加速, 很容易达到几千米每秒甚至几十千米每秒的速度喷射出去^[1-3]. 由于其高密度、高输运速度等特点^[1,4-10], 已经被广泛应用于聚变装置^[2,11,12], 等离子体空间推进^[13-16]、磁约束核聚变中的再燃^[17,18]、尘埃粒子加速^[1,4,19-21]以及空间微小碎片超高速撞击的实验模拟研究^[3,22]中.

在同轴枪放电等离子体的研究中, 等离子体密度与输运速度是非常重要的研究内容. 在我们前期开展的研究工作中, 对同轴枪放电等离子体的轴向输运速度及其影响因素进行了研究^[23], 而放电等离子体密度及其随输运过程的变化是另一个重要

参数, 不仅决定着放电等离子体应用的物理、化学过程, 而且在很大程度上决定着其应用特性. 所以, 研究同轴枪放电中的等离子体密度及变化具有非常重要的意义.

目前等离子体密度诊断所采用的方法主要有微波法、Thomson 散射法、Langmuir 探针法以及光谱法^[1,4,24-31]. 微波法和 Thomson 散射法^[25,26]的操作较为复杂, 实际中通常采用 Langmuir 探针法和光谱法. Langmuir 探针法需要测量等离子体的伏安特性^[27,28], 但由于探针直接与等离子体相接触, 很容易对等离子体造成干扰, 而且探针暴露于强电离环境下也很容易损坏(尤其对于高密度、高能量密度等离子体环境). 相比于探针法, 发射光谱技术诊断等离子体密度具有操作简单、选择性好、灵敏度和准确度高以及对等离子体本身无干扰等特点, 此外, 该技术不仅能实现原位诊断, 而且能够得到时间及空间分辨信息, 所以被广泛应用于等离子体的诊断中. Ticos 等^[1,4]利用 D_{α} 的 Stark 展

[†] 通信作者. E-mail: rchsh@dlut.edu.cn

宽效应测量了同轴枪放电等离子体尘埃粒子加速中的等离子体密度, Witherspoon 等^[31]测量了装置放电时的 H_{β} 谱线宽度进而得到了等离子体密度. 然而, 在以往诸多的实验研究中, 对等离子体密度的测量往往集中于某一特定位置, 而对同轴枪放电等离子体密度在运输过程中的变化特性的研究相对较少. 事实上, 由于雪梨模型(等离子体在运输过程中, 不仅会继续电离与其接触的中性粒子, 而且会推着电离后的粒子一起加速)^[32-34]的提出, 等离子体的密度在运输过程中是变化的, 而且该变化能够决定其装置的应用特性, 所以研究同轴枪放电等离子体密度在运输过程中的变化是十分必要的. 基于此, 本文利用 H_{β} 谱线 Stark 展宽效应研究了等离子体密度及其在运输过程中的变化特性, 对不同放电条件(不同的放电气体和压强)下等离子体密度及其在运输过程中的变化特性也做了比较详细的对比研究.

2 实验装置

实验研究装置如图 1 所示, 主要由真空腔、供电系统、同轴放电枪、运输通道以及观察窗口组成. 真空腔(图 1 左侧球形装置)为外径 55 cm 的空心圆柱体, 通过一个组合真空机组得到本底真空水平为 10^{-3} Pa. 供电系统通过一个幅值可调电源给 240 μ F 的电容器充电, 再通过点火开关将几千伏(最大值 10 kV)的电压供给同轴放电枪, 可以得到瞬时几千甚至几万安培峰值的放电电流. 同轴放电枪由两个电极组成, 一个是同轴枪阳极(直径 2.0 cm, 长 24 cm 的实心铜棒), 另一个是同轴枪阴极(内径 8 cm, 厚度 0.3 cm, 长 24 cm 的不锈钢空心圆柱), 阳极与阴极之间用一厚 3.0 cm、长 4.0 cm 的尼龙介质隔离, 所以放电时等离子体的实际加速距离为 20 cm. 将同轴放电枪置入运输通道(内径 14.6 cm, 长 85 cm 的不锈钢空心圆柱)内, 中间用一层 3.0 cm 厚的聚四氟乙烯材料隔离, 该运输通道与真空腔连接在一起. 同时, 在运输通道处设置一长 24 cm、宽 10 cm 的石英玻璃观察窗, 同轴放电枪输出端面与观察窗口的距离约为 6.0 cm. 观察窗口设有 A, B, C 三个光谱采集点, 用于测量等离子体在运输过程中的密度变化. 同时, 在该三点处采用快速响应高量子效率的光电倍增管(P30A-05)测量放电等离子体发光信号, 以光信号的时间差以及两个光电倍增管的距离来计算放电等离子体的轴

向运输速度. 三个采集点与同轴枪输出端面的距离分别为 8, 17, 26 cm. 采用 Acton SpectraPro 2500i 型光栅光谱仪测量 H_{β} 谱线并计算其展宽, 所选光栅的密度为 1200 line/mm. 由于同轴枪脉冲放电时间短, 产生的等离子体运输速度很快, 所以测量时将光谱仪的积分时间设置为 3.0 s, 以保证可以采集到等离子体的发光光谱.

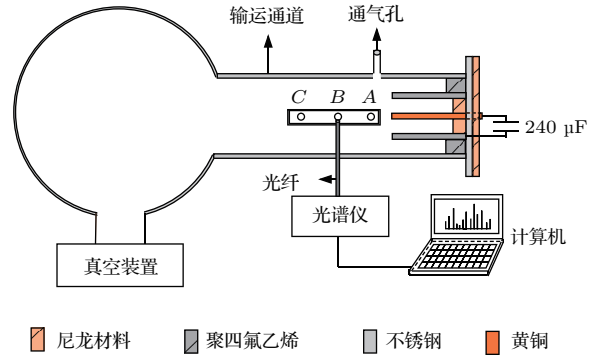


图 1 (网刊彩色) 实验装置示意图

Fig. 1. (color online) Experimental setup.

电信号测量回路及原理如图 2 所示, 电压与电流信号分别用 Tektronix 高压探头与 Pearson 电流探头测得并输入高存储容量数字示波器 (Tektronix DPO 4104) 进行记录与分析. 高压探头置于同轴枪高压阳极端, Pearson 电流探头置于接地阴极端. 实验过程中, 首先需要给电容器两端充电, 充电后的电容器储存大量的电能, 而后通过高压开关闭合瞬时供给同轴放电枪使枪内气体击穿, 产生放电等离子体. 由于流过同轴枪阳极的轴向电流感生出很强的方位角磁场 B , 该磁场与放电时的径向电流 J 相互作用, 形成轴向的洛伦兹力 $F(F = J \times B)$, 该洛伦兹力能使等离子体沿着轴向运动, 从而形成沿着轴向运输的等离子体.

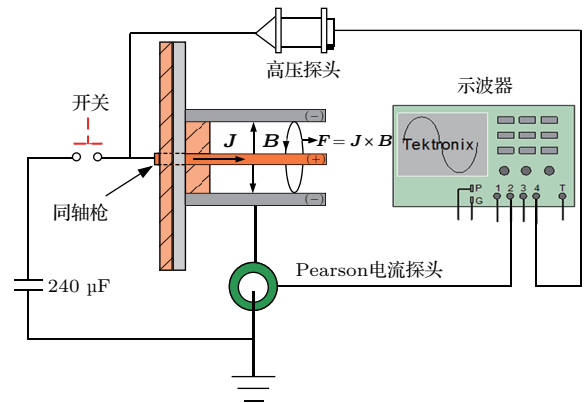


图 2 (网刊彩色) 实验测量原理图

Fig. 2. (color online) Schematic of experimental measurement principle.

3 结果与讨论

3.1 放电特性

选用电源注入能量为1.08 kJ(电容器两端电压达到3.0 kV), 空气气压4.0 Pa作为放电条件, 可得到图3所示电压、电流及光电流波形图. 从图中可以看出, 当电源注入能量为1.08 kJ时, 放电电流达到8.5 kA, 电流波形很明显地呈现出多次放电特性, 多次放电特性能够同时从等离子体光电流信号中得到证实. 对比电流波形与光电流波形可以看出, 电流波形的每一个波峰与波谷分别对应一个光信号的波峰, 且光信号在经过A, B, C三点时依次出现一个峰值, 这就证明确实有多次放电发生且等离子体在运动. 多次放电的原因是电源电路阻抗不匹配, 即电源电路中不同电容、电感、电阻回路产生的RLC振荡相互影响, 最后在电极间形成多次击穿而引起多次放电^[21,23,24].

观察光电流波形, 发现其信号具有一定的宽度, 这是因为同轴枪内喷射出的等离子体有一定的体积(通常称等离子体团^[6,7,12])且在运输时会有一定的时间段内一直出现在光信号接收口的前端. 此外, 对应一次放电等离子体的光信号均出现两个波峰, 通常认为Blow-by不稳定性是造成该现象的原因^[31,35]. Blow-by不稳定性来源于径向磁压分布的不均匀性, 如果放电腔室内的放电电流层最初为径向均匀的密度和厚度分布, 它沿着内电极的加速度会高于沿外电极的加速度(靠近内电极的磁场较强, 受到的洛伦兹力较大, 而靠近外电极的磁场相对较弱, 受到洛伦兹力较小). 该加速度的差异会使载流等离子体产生向后的倾斜, 倾斜的电流层会产生一个大的轴向电流分量, 进而形成一个径向的洛伦兹力. 该洛伦兹力使越来越多的等离子体向低速区转移, 便会在靠近内电极处出现一块质量较小但速度很快的等离子体团, 而靠近外电极处出现一块质量较大但速度较慢的等离子体团, 正如图3中A, B处测量的光电流信号中首先出现一个宽度较小的波峰, 而后出现一个宽度较大的波峰.

从A, B, C处测量的光电流信号还可以看出光信号的宽度在运输过程中逐渐变窄, 这说明等离子体团在运输过程中逐渐压缩. 另外, 三个光电流的时间间隔分别为9.3 μs 和11.7 μs , A与B, B与C之间的距离均为9 cm, 由此可以计算出等离子体团在

A与B间的运输速度约为9.7 km/s, 而在B与C间的运输速度约为7.7 km/s. 可以看出等离子体团在运输过程中是减速的. 导致等离子体团速度减慢的原因主要是雪犁电离模型^[32-34]. 从雪犁模型的基本假设可知, 初始时刻等离子体受洛伦兹力作用开始加速运动, 但在运输过程中, 等离子体中的高能电子会电离部分中性气体分子并拖拽被电离的中性气体分子一起运动, 致使等离子体的质量在运输过程中不断增大. 根据动量守恒定律, 被拖拽电离粒子运动的动量与等离子体减少的动量是相等的, 所以等离子体轴向速度在运输过程中逐渐减慢. 事实上, 同轴枪放电等离子体均会经过一个先加速后减速的过程^[36-38], 因为在等离子体最初的加速过程中, 等离子体的质量 m 和速度 v 都是变化量, 与洛伦兹力 F 满足冲量定理, 即 $F = \frac{dm}{dt}v + m\frac{dv}{dt}$ (t 为时间), 在电流上升阶段, 洛伦兹力单调增加, 等离子体的质量和速度都随之增大; 在电流达到峰值并开始下降时, 洛伦兹力也按照类似的趋势达到极大并开始衰减, 而等离子体质量又是单调增大的, 因此洛伦兹力 F 不足以维持质量递增的等离子体高速运动 $\left(\frac{dm}{dt}v\right)$, 只能通过 $m\frac{dv}{dt}$ 来反向补偿, 因此等离子体的速度 v 开始减小. 一般该过程发生在同轴枪内部, 而在同轴枪外部, 由于洛伦兹力消失, 运输过程中的等离子体速度应该是逐渐减小的.

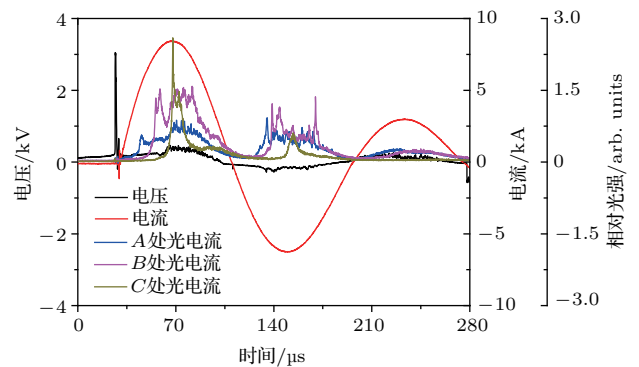


图3 (网刊彩色) 同轴枪在注入能量为1.08 kJ, 空气气压为4.0 Pa放电条件下的电压、电流及光电流波形图

Fig. 3. (color online) Voltage, current and photomultiplier acquired signal waveform for coaxial gun discharge in air with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 4.0 Pa.

图4(a)所示为电源注入能量为1.08 kJ, 空气气压为10 Pa条件下的电压、电流波形图. 从图中可以看出, 与相同注入能量下4.0 Pa时的空气放电相比, 空气气压为10 Pa时产生的放电电流更大,

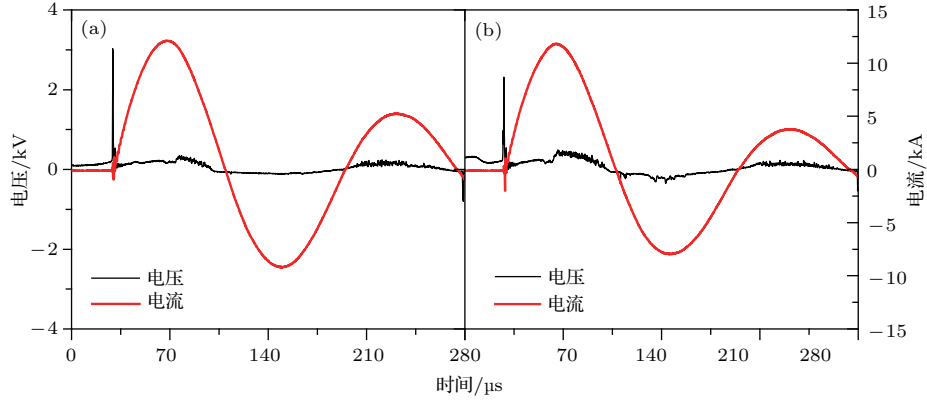


图4 (网刊彩色) 同轴枪在(a) 空气, 注入能量为1.08 kJ, 气压为10 Pa和(b) 氩气, 注入能量为1.08 kJ, 气压为4.0 Pa放电条件下的电压、电流波形图

Fig. 4. (color online) Voltage and current waveforms for coaxial gun discharge in (a) air with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 10 Pa and (b) argon with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 4.0 Pa.

其峰值可达10 kA以上. 图4(b)为电源注入能量为1.08 kJ、氩气气压为4.0 Pa时的放电电压、电流波形图, 与空气放电相比, 氩气放电电流变大, 放电击穿电压变低. 图4中的放电特性为下一步解释等离子体团在不同工作气体条件下等离子体密度及其随输运距离的变化特性提供了依据.

3.2 光谱学诊断

谱线的展宽一般有自然展宽($\Delta\lambda_{\text{nat}}$)、共振展宽($\Delta\lambda_{\text{rev}}$)、van der Waals展宽($\Delta\lambda_{\text{van}}$)、Stark展宽($\Delta\lambda_{\text{Stark}}$)、多普勒展宽($\Delta\lambda_{\text{Doppler}}$)和仪器展宽($\Delta\lambda_{\text{Instrument}}$)^[39,40]. 前四种展宽为洛伦兹线型, 多普勒展宽为高斯线型, 而仪器展宽的线型取决于仪器本身. 实验使用的光谱仪通过测量得出的是高斯线型, 所以高斯线型的总展宽($\Delta\lambda_{\text{G}}$)由仪器展宽和多普勒展宽组成^[29,39,40], 由此, 可以得出,

$$\Delta\lambda_{\text{G}} = (\Delta\lambda_{\text{Instrument}}^2 + \Delta\lambda_{\text{Doppler}}^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中的仪器展宽可由He-Ne激光器中心波长为632.80 nm的谱线测出, 实验中测量的仪器展宽为0.0989 nm. 多普勒展宽计算公式为

$$\Delta\lambda_{\text{Doppler}} = 7.16 \times 10^{-7} \lambda_0 \sqrt{\frac{T_g}{A}}, \quad (2)$$

式中 λ_0 为对应的吸收峰值, T_g 为气体温度(单位: K), A 为气体的相对分子质量^[29,30,39].

由于仪器展宽属于高斯展宽($\Delta\lambda_{\text{G}}$), 而Stark展宽属于洛伦兹展宽($\Delta\lambda_{\text{L}}$), 在实验中所采集到的 H_{β} 谱线, 既有均匀展宽(洛伦兹展宽), 也有非均匀

展宽(高斯展宽), 所以实验所得到谱线的线型为佛克脱线型. 在由均匀展宽和非均匀展宽共同导致的佛克脱线型中, 洛伦兹线型展宽、高斯线型展宽和总的佛克脱线型展宽之间的关系为^[40]

$$\Delta\lambda_{\text{v}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{L}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda_{\text{L}}}{2}\right)^2 + \Delta\lambda_{\text{G}}^2}, \quad (3)$$

式中的 $\Delta\lambda_{\text{v}}$ 为佛克脱线型展宽宽度. 在该实验条件下(通常是几帕水平), 自然展宽、共振展宽和van der Waals展宽可以忽略不计, 所以洛伦兹线型展宽主要为Stark展宽, 可将洛伦兹展宽近似当作Stark展宽, 具体值为

$$\Delta\lambda_{\text{Stark}} = \Delta\lambda_{\text{v}} - \frac{\Delta\lambda_{\text{G}}^2}{\Delta\lambda_{\text{v}}}, \quad (4)$$

而等离子体密度 n_e (单位: cm^{-3})与Stark展宽宽度的关系为^[30,39]

$$\Delta\lambda_{\text{Stark}} = 2 \times 10^{-11} (n_e)^{\frac{2}{3}}. \quad (5)$$

(4)式中, $\Delta\lambda_{\text{v}}$ 可以通过拟合实验所测 H_{β} 谱线得到. 而对于高斯展宽, 可以通过(1)式得出. 但是, 在一些文献中^[1,4], 即使同轴枪放电电流达200 kA, 离子温度为2.8 eV时(此时的多普勒展宽约为0.06 nm), 在计算等离子体密度时多普勒展宽也未被计算在内. 本实验中, 同轴枪放电电流在10 kA左右, 产生的离子温度小于2.8 eV, 而气体温度低于离子温度, 所以, 本实验的多普勒展宽应小于0.06 nm, 该展宽的宽度远小于本实验中的最小Stark展宽0.2186 nm, 通过(1)式的计算关系可以得出, 该展宽的宽度对高斯展宽宽度的影响很小.

因此,多普勒展宽在本实验中亦可以忽略,即高斯展宽就是仪器展宽.

该实验在观察窗口B处测量的光谱如图5所示,其中可以明显看到486.13 nm处的 H_{β} 谱线,该展宽为佛克脱线型展宽.图6是将图5中的 H_{β} 谱线展开,同时对其进行线型拟合,得到了展宽为0.2949 nm的佛克脱线型展宽宽度,高斯展宽为0.0989 nm,这时由(4)式可得Stark展宽为0.2617 nm,进而计算出B处的等离子体密度为 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

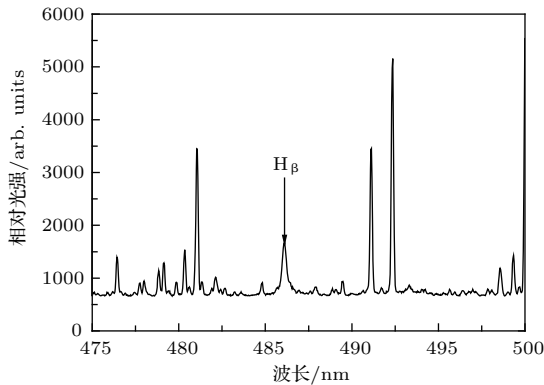


图5 同轴枪在注入能量为1.08 kJ、空气气压为4.0 Pa放电条件下观察窗口B处的 H_{β} 光谱谱线

Fig. 5. Spectrum of H_{β} -region measured at the position B for coaxial gun discharge in air with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 4.0 Pa.

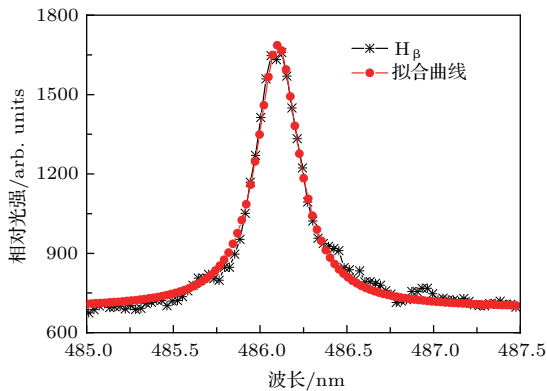


图6 同轴枪在注入能量为1.08 kJ、空气气压为4.0 Pa放电条件下观察窗口B处 H_{β} 谱线的拟合

Fig. 6. Fitting of H_{β} -line measured at the position B for coaxial gun discharge in air with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 4.0 Pa.

3.3 注入能量为1.08 kJ、气压为4.0 Pa空气条件下等离子体团在运输过程中的密度变化

图7所示为等离子体团在注入能量为1.08 kJ、气压为4.0 Pa空气条件下运输经过A,B,C三点

时测量的 H_{β} 谱线展宽.对该展宽进行归一化处理,归一化后的佛克脱线型展宽宽度分别为0.2567, 0.2949, 0.3132 nm,经过(4)式得到Stark展宽宽度分别为0.2186, 0.2617, 0.2820 nm,从而计算出A,B,C三点处的等离子体团密度分别为 1.14×10^{15} , 1.5×10^{15} , $1.68 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.由此可以看出,等离子体团的密度在运输过程中会逐渐增大.由雪梨模型可知^[32-34],等离子体团在运输过程中会将一部分能量转移到与其接触的中性粒子薄层中,从而将中性粒子电离,并推着被电离的粒子运动.此外,由于等离子体团的速度非常高,且刚被电离的带电粒子在轴向方向并没有定向速度,后面的高速等离子体团将其加速的过程中也会存在一种堆积效应,使带电粒子聚集,产生碰撞等离子体激波^[38],该激波沿轴向传播使等离子体团逐渐被压缩,等离子体团密度在运输过程中升高,这是一个既电离又压缩的过程.但是,等离子体团在电离前面的中性粒子时会不断地消耗其能量,且等离子体团的能量在运输过程中也会因自身的淬灭而不断降低,即等离子体团在运输过程中的能量会逐渐减小,其电离能力也会逐渐减弱.这也就解释了为什么上述实验中等离子体团在B—C段增加的密度小于其在A—B段增加的密度,即密度增长变缓慢的原因.

事实上,图3中的光电流波形能很好地验证等离子体团在运输过程中存在的压缩效应,并且能够解释等离子体团在运输过程中减速的原因.图中的光电流波形是同一等离子体团经过A,B,C三时光电倍增管测量得到的光电流波形.通过比较这三处的光电流波形可看出,光电流的波峰在运输过程中逐渐变窄变高.光电流的波峰变窄说明等离子体团的体积缩小(等离子体团被压缩),强度增强说明等离子体团的聚集程度升高,这应该是一个明显的聚集过程,且该过程可能也是等离子体碰撞激波形成的过程.此外,根据雪梨模型描述,等离子体团在运输过程中的质量会增加,而图3中的光电流可以明显看出等离子体团在运输过程中逐渐被压缩,进而使等离子体团的体积逐渐减小,因此,等离子体团密度增加.同时,由于等离子体团质量增大且被压缩的缘故,可能会形成等离子体碰撞激波,从而使等离子体团在运输过程中的速度逐渐减小.

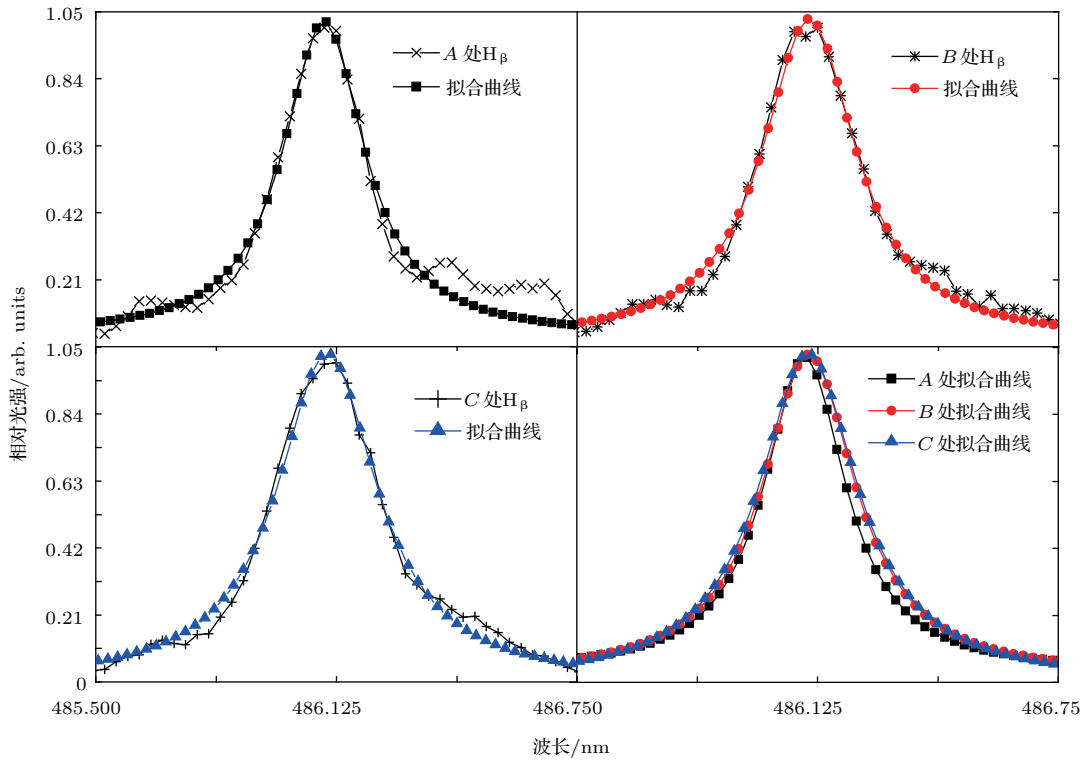


图7 同轴枪在注入能量为1.08 kJ、空气气压为4.0 Pa放电条件下观察窗口A, B, C处测得的H β 谱线展宽
 Fig. 7. Broadenings of H β -lines measured at the positions A, B, C for coaxial gun discharge in air with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 4.0 Pa.

3.4 注入能量为1.08 kJ、气压为10 Pa空气条件下等离子体团在运输过程中的密度变化

图8所示为同轴枪内空气气压为10 Pa、注入能量为1.08 kJ时,在A, B, C三点处测量得到的佛克脱线型展宽(归一化后),该展宽的宽度分别为0.3299, 0.4001, 0.3476 nm, Stark展宽宽度分别为0.3002, 0.3757, 0.3195 nm,计算出等离子体密度分别为 1.84×10^{15} , 2.57×10^{15} , $2.02 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.可以看出,该条件下放电产生的等离子体团密度大于气压为4.0 Pa时的等离子体团密度,并且该等离子体团的密度在运输过程中并不是一直增加的,而是先增加后减小的.事实上,当气压升高后,同轴枪内的粒子数密度增加,则相同电压条件下放电会更强烈(图4(a)),电离的粒子数会增加,等离子体团的密度高于4.0 Pa时的等离子体团密度.当等离子体团在洛伦兹力作用下向前运动时,等离子体团就会一边使气体继续电离,使等离子体团密度提高,一边不断地消耗其能量,使其电离能力减弱.这意味

着在一定条件下,当等离子体团的能量消耗到一定程度,即电离率低于淬灭率时,等离子体团的密度便开始下降.通过该分析,不难解释等离子体团在10 Pa条件下运输过程中出现的现象.首先,在等离子体团从A运动到B的过程中,等离子体团密度增加,说明在该过程中等离子体团的能量足够高,可以继续电离中性粒子.但当等离子体团从B运动

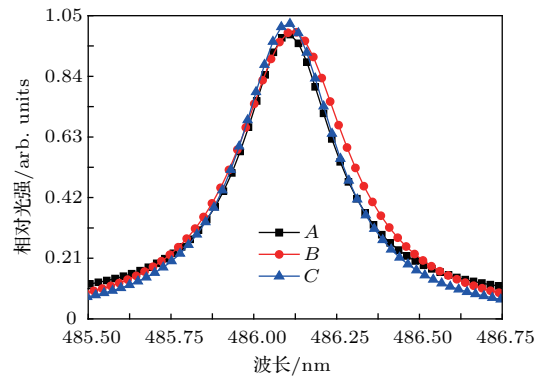


图8 同轴枪在注入能量为1.08 kJ,空气气压为10 Pa放电条件下观察窗口A, B, C处测得的H β 谱线展宽
 Fig. 8. Broadenings of H β -lines measured at the positions A, B, C for coaxial gun discharge in air with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 10 Pa.

到C时, 等离子体团密度减小, 表明等离子体团的电离率已经小于其淬灭率. 这意味着气压的增大会使等离子体团在前进的过程中能量消耗得更快. 因为背景气体粒子数密度的提高, 使等离子体团在经过相同距离时需要电离更多的中性粒子, 即等离子体团的能量消耗更多, 尽管在4.0 Pa时等离子体团在运输过程中密度在不断增加, 但是等离子体团的密度不可能一直增加下去, 只是相对气压为10 Pa时等离子体团密度增加所持续的距离更长, 而且恰好超过了观察窗口的距离.

基于上述分析, 可将等离子体团的运输过程分为两个阶段. 在第一阶段, 等离子体团的能量高, 在运输过程中会不断电离中性粒子, 使等离子体团的密度逐渐升高, 但与此同时, 等离子体团的能量在逐渐下降, 即电离能力逐渐减弱. 在第二阶段, 等离子体团的能量已经降低到其电离率小于淬灭率的水平, 等离子体团的密度会逐渐降低. 第一阶段与第二阶段的临界点是等离子体团密度最大值出现的时刻.

3.5 注入能量为7.68 kJ、气压为10 Pa空气条件下等离子体团在运输过程中的密度变化

为了进一步分析上述同轴枪脉冲放电等离子体团在运输过程中的密度变化, 实验中将电源的注入能量增大到7.68 kJ(电容器两端电压达到8.0 kV), 测量了空气气压10 Pa条件下, 等离子体团运输经过A, B, C三点时的密度变化趋势, 如图9所示. 在A, B, C三点处测量得到的佛克脱线型展宽(归一化后)宽度分别为0.49406, 0.60367, 0.66076 nm, 并通过(4)式分别得到了0.4743, 0.5875, 0.646 nm的Stark展宽, 从而计算出等离子体密度分别为 3.65×10^{15} , 5.03×10^{15} , $5.81 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 从该密度的变化趋势可以看出, 当电源的注入能量增长至7.68 kJ时, 等离子体团的密度大于在1.08 kJ时的密度, 且在运输过A, B, C三点时又一次呈现出一直增加的趋势. 这是因为当电源注入能量升高后, 同轴枪内的放电会更强, 使电离的粒子数增加, 同时使等离子体团具有更高的能量. 该等离子体团在运输过程中也会发生雪犁电离, 使等离子体团的密度升高, 能量不断被损耗. 但是, 由于该等离子体团初始能量高于注入能量为1.08 kJ时产生的等离子体团能量, 所

以在运输相同的距离时, 即经过A—B段后, 仍具有很高的能量(很强的电离能力), 导致该等离子体团在经过B—C段时能够继续电离中性粒子使等离子体团的密度继续增加. 不过, 等离子体团在B—C段增加的密度小于其在A—B段增加的密度, 即出现了密度增长变缓慢的趋势, 这与注入能量1.08 kJ、气压4.0 Pa时等离子体团的密度变化趋势是相同的, 也说明等离子体团的密度不能一直增加下去. 从该结果可以看出, 当等离子体团的初始能量足够高时, 等离子体团的密度不仅会增加, 电离能力也会增强, 并且该电离能力会维持更长的距离, 使等离子体团的密度在运输经过更长的距离时一直增加, 也就是说, 等离子体团的密度及持续电离的能力都取决于等离子体团最初所携带的能量. 但是无论等离子体团最初所携带的能量有多大, 只要在运输足够远的距离后, 便会达到电离率小于淬灭率的水平而密度开始减小.

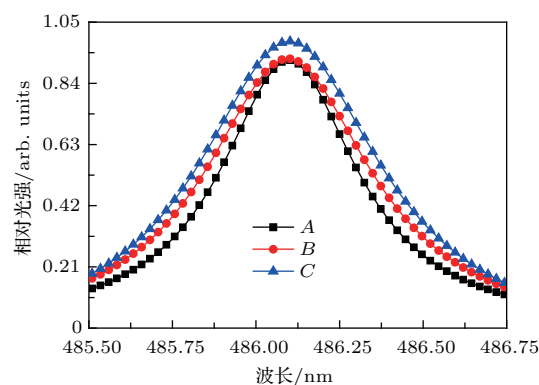


图9 同轴枪在注入能量为7.68 kJ、空气气压为10 Pa放电条件下观察窗口A, B, C处测得的 H_{β} 谱线展宽
Fig. 9. Broadenings of H_{β} -lines measured at the positions A, B, C for coaxial gun discharge in air with applied power energy of 7.68 kJ and pressure of 10 Pa.

3.6 注入能量为1.08 kJ、气压为4.0 Pa氩气条件下等离子体团在运输过程中的密度变化

当同轴枪在氩气气压4.0 Pa、注入能量1.08 kJ条件下放电时, 等离子体团密度在运输过程中的变化趋势如图10所示. 从图中所示佛克脱线型展宽可以看出, 在相同气压4.0 Pa条件下, 等离子体团在运输过程中的密度变化趋势与空气中明显不同, 即在空气中密度逐渐增加, 而在氩气中逐渐减小. 这意味着氩气放电产生的等离子体在距离同轴枪很近的距离就发生了聚集现象. 引起该

现象的原因可能是气体电离能的差异以及不同种类气体放电中的反应. 首先, 从图3和图4(b)中的放电情况可知, 相同条件下氩气的放电强于空气, 这能很好地解释为什么距离同轴枪最近的A点所测得的氩气等离子体团密度大于相同气压条件4.0 Pa时空气中的等离子体团密度(氩气等离子体团密度为 $1.75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 空气等离子体团密度为 $1.14 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). 此外, 氩原子的电离能为15.7 eV, 而作为空气中主要成分的氮分子和氧分子的电离能分别为15.58 eV和12.22 eV^[41], 说明氩气的电离能高于空气的电离能. 对于一定的等离子体电子能量分布函数而言, 两者(氩气、空气)电离能的差异可能会使等离子体团不能继续电离氩气, 但却能使空气继续电离, 从而导致等离子体团密度在氩气运输中逐渐降低, 而在空气运输中逐渐增大. 也可能是由于氩气电离能高, 等离子体团在运输过程中更容易达到电离率小于淬灭率的水平, 进而使等离子体团密度在运输较短距离后便开始降低. 反之, 由于空气的电离能低, 运输过程中消耗的能量较氩气中低, 所以需要更长的距离才能达到电离率小于淬灭率的水平, 因而等离子体团密度在更长的运输距离中一直增加, 本实验中该距离超过了观察窗口的距离. 引起空气等离子体团密度在窗口观察距离中一直增加的另一个原因也可能是解离反应^[42-44], $e + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{N} + e$, $e + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{O} + e$.

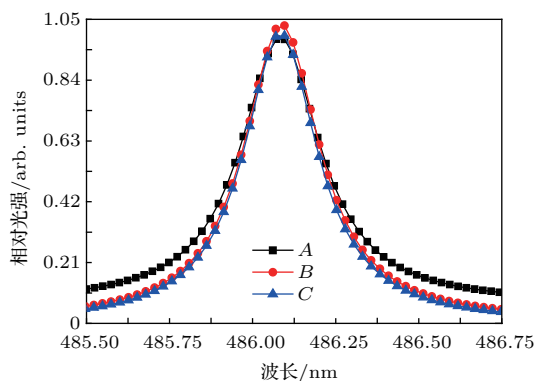


图10 同轴枪在注入能量为1.08 kJ、氩气气压为4.0 Pa放电条件下观察窗口A, B, C处测得的 H_β 谱线展宽

Fig. 10. Broadenings of H_β -lines measured at the positions A, B, C for coaxial gun discharge in argon with applied power energy of 1.08 kJ and pressure of 4.0 Pa.

该反应能够使粒子数增加, 且解离后氮、氧原子的电离能(分别为14.5和13.6 eV)^[41] 低于氩原子的电离能. 因此, 相比较氩气等离子体团运输过程而言, 空气等离子体团不仅仍具有较高的电离能

力, 而且因为电离了更多数量的原子而使密度不断增加.

4 结 论

本文主要应用 H_β 谱线的Stark展宽法测量了同轴枪脉冲放电等离子体团在运输过程中的密度变化, 并研究了不同参数下该密度的变化趋势. 结果发现, 等离子体团在空气中运输时密度会随着气压条件的不同而有差异, 在低气压时密度一直增加, 在高气压时密度先增加后减小. 同时发现, 在高气压下如果提高电源注入能量, 等离子体团密度在运输过程中也会一直增加. 此外, 当气压与放电条件相同时, 等离子体团密度在氩气中一直减小. 这些现象出现的原因可归结为高速运动的等离子体团既能继续电离前方的中性粒子, 又要消耗其自身能量的特性. 不同的气体密度、种类以及等离子体团最初携带的能量都会导致运输过程中能量损耗程度的不同, 从而使不同参数下等离子体团密度最大值出现的位置有了很大的差异. 该实验结果中聚集现象的出现表明了等离子体团在运输过程中的物理特性, 这些研究加深了我们对同轴枪放电等离子体运输过程特性的认识与了解.

参考文献

- [1] Ticos C M, Wang Z H, Wurden G A, Kline J L, Montgomery D S 2008 *Phys. Plasmas* **15** 103701
- [2] Turchi P J, Roderick N F, Degnan J H, Frese M H, Amdahl D J 2008 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **36** 92
- [3] Gao Z X, Feng C H, Yang X Z, Huang J G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 145201 (in Chinese) [高著秀, 冯春华, 杨宣宗, 黄建国 2012 物理学报 **61** 145201]
- [4] Ticos C M, Wang Z H, Wurden G A, Kline J L, Montgomery D S, Dorf L A, Shukla P K 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 155002
- [5] Asai T, Itagaki H, Numasawa H, Terashima Y, Hirano Y, Hirose A 2010 *Rev. Sci. Instrum.* **81** 10E119
- [6] Case A, Messer S, Brockington S, Wu L, Witherspoon F D, Elton R 2013 *Phys. Plasmas* **20** 012704
- [7] Case A, Messer S, Bomgardner R, Witherspoon F D 2010 *Phys. Plasmas* **17** 053503
- [8] Hsu S C, Merritt E C, Moser A L, Awe T J, Brockington S, Davis J S, Adams C S, Case A, Cassibry J T, Dunn J P, Gilmore M A, Messer S J, Witherspoon F D 2012 *Phys. Plasmas* **19** 123514
- [9] Ticos C M, Wang Z H, Wurden G A 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 2088
- [10] Messer S, Case A, Bomgardner R, Phillips M, Witherspoon F D 2009 *Phys. Plasmas* **16** 064502

- [11] Woodruff S, Hill D N, Stallard B W, Bulmer R, Cohen B, Holcomb C T, Hooper E B, McLean H S, Moller J, Wood R D 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 095001
- [12] Kikuchi Y, Nakanishi R, Nakatsuka M, Fukumoto N, Nagataet M 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 232
- [13] Cassibry J T, Thio Y C, Markusic T E, Wu S T 2006 *J. Propul. Power.* **22** 628
- [14] Cassibry J T 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2180
- [15] Markusic T E, Thio Y C, Cassibry J T 2002 *Proceedings of the 38th AIAA Joint Propulsion Conference* Indianapolis, Indiana, July 7–10, 2002, p1
- [16] McNab I R 2009 *IEEE Trans. Magn.* **45** 381
- [17] Voronin A V, Gusev V K, Petrov Y V, Sakharov N V, Abramova K B, Sklyarova E M, Tolstyakov S Y 2005 *Nucl Fusion* **45** 1039
- [18] Voronin A V, Gusev V K, Petrov Y V, Mukhin E E, Tolstyakov S Y, Kurskiev G S, Kochergin M M, Hellblom K G 2008 *Nukleonika* **53** 103
- [19] Ticos C M, Wang Z H, Wurden G A 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2770
- [20] Wang Z H, Ticos C M, Wurden G A 2007 *Phys. Plasmas* **14** 103701
- [21] Gao Z X, Huang J G, Han J W, Yang X Z, Feng C H 2010 *Spacecraft Environment Engineering* **27** 285 (in Chinese) [高著秀, 黄建国, 韩建伟, 杨宣宗, 冯春华 2010 航天器环境工程 **27** 285]
- [22] Han J W, Zhang Z L, Huang J G, Li X Y, Chen Z F, Quan R H, Li H W 2006 *Spacecraft Environment Engineering* **23** 205 (in Chinese) [韩建伟, 张振龙, 黄建国, 李小银, 陈赵峰, 全荣辉, 李宏伟 2006 航天器环境工程 **23** 205]
- [23] Yang L, Yan H J, Zhang J L, Hua Y, Ren C S 2014 *High Voltage Engineering* **40** 13 (in Chinese) [杨亮, 闫慧杰, 张俊龙, 滑跃, 任春生 2014 高电压技术 **40** 13]
- [24] Wiechula J, Hock C, Iberler M, Manegold T, Schönlein A, Jacoby J 2015 *Phys. Plasmas* **22** 043516
- [25] Wu Y, Bai S B, Wang J Y, Chen J P, Ni X W 2007 *Optoelectronic Technology* **27** 49 (in Chinese) [吴莹, 白顺波, 王俊彦, 陈建平, 倪晓武 2007 光电子技术 **27** 49]
- [26] Warner K, Hieftje G M 2002 *Spectrochim Acta B* **57** 201
- [27] Clements R M 1978 *J. Vac. Sci. Technol.* **15** 193
- [28] Yuan F Y, Lu W Q, Lin G Q 2009 *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* **29** 509 (in Chinese) [袁方园, 陆文琪, 林国强 2009 真空科学与技术学报 **29** 509]
- [29] Li S, Liu Z W, Chen Q, Liu F P, Wang Z D, Yang L Z 2012 *Spectrosc. Spectr. Anal.* **32** 33 (in Chinese) [李森, 刘忠伟, 陈强, 刘福平, 王正铎, 杨丽珍 2012 光谱学与光谱分析 **32** 33]
- [30] Qian M Y, Ren C S, Wang D Z, Zhang J L, Wei G D 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 063303
- [31] Witherspoon F D, Case A, Messer S J, Bomgardner R, Phillips M W, Brockington S, Elton R 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 083506
- [32] Hart P J 1962 *Phys. Fluids* **5** 38
- [33] Hart P J 1964 *J. Appl. Phys.* **35** 3425
- [34] Zhang J L, Yang L, Yan H J, Hua Y, Ren C S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 075201 (in Chinese) [张俊龙, 杨亮, 闫慧杰, 滑跃, 任春生 2015 物理学报 **64** 075201]
- [35] Cassibry J T, Thio Y C, Wu S T 2006 *Phys. Plasmas* **13** 053101
- [36] Huang J G, Han J W, Li H W, Cai M H, Li X Y, Zhang Z L, Chen Z F, Wang L, Yang X Z, Feng C H 2009 *Chinese Science Bulletin* **54** 150 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟, 李宏伟, 蔡明辉, 李小银, 张振龙, 陈赵峰, 王龙, 杨宣宗, 冯春华 2009 科学通报 **54** 150]
- [37] Chen Z F 2006 *M. S. Thesis* (Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [陈赵峰 2006 硕士学位论文 (北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心)]
- [38] Kubo H, Kawashima N, Itoh T 1971 *Plasma Physics* **13** 131
- [39] Qian M Y 2011 Ph. D. Dissertation (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [钱沐杨 2011 博士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [40] Wu L F 2010 M. S. Thesis (Wuhan: Wuhan Institute of Technology) (in Chinese) [吴利峰 2010 硕士学位论文 (武汉: 武汉工程大学)]
- [41] Raizer Y P 1991 *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer-Verlag) pp58–59
- [42] Roy S, Singh K P, Gaitonde D V 2007 *Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* Reno, Nevada, January 8–11, p1
- [43] Kossyi I A, Kostinsky A Y, Matveyev A A, Silakov V P 1992 *Plasma Sources Sci. Technol.* **1** 207
- [44] Singh K P, Roya S 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 123308

Experimental study on coaxial gun pulse discharge plasma density change in transport process

Yang Liang Zhang Jun-Long Yan Hui-Jie Hua Yue Ren Chun-Sheng[†]

(Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion and Electron Beams of the Ministry of Education, School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(Received 27 August 2016; revised manuscript received 7 December 2016)

Abstract

Coaxial gun discharge plasma with high density and velocity has a number of potential applications in fusion energy, plasma refueling, disruption mitigation in tokamaks, plasma space propulsion, acceleration of dust particles to hypervelocity etc., and thus has become an important research topic in fields of nuclear physics and aerospace engineering. In this paper, we report the experimental investigation on electrical and transport characteristics of coaxial gun discharge plasma. Based on electrical and optical diagnoses, the discharge voltage, discharge current and axial velocity of plasma transport are measured. Meanwhile, the emission spectrum technology is employed to measure the Stark broadening of H_{β} spectral line and then plasma density is calculated. The experimental results show that the discharges in the coaxial gun present a feature of multiple discharges and blow-by instability phenomena are observed by photomultiplier acquired signals. In addition, the plasma velocity and density in the transport process are not constant. It is found that the axial plasma velocity in the transport process decreases due to mass gain caused by the snowplow model and the change tendency of plasma density in the transport process is dependent on various settings. A systematic study has been carried out for exploring plasma density change in transport process, and different experimental parameters are adopted in order to further analyze the physical mechanism of plasma density change in transport process. When the air pressure in the coaxial gun is changed from 4.0 Pa to 10 Pa, for 1.08 kJ applied power energy, an obvious difference appears in transport properties of plasma density, i.e., plasma density increases gradually in 4.0 Pa air while it increases first and then decreases in 10 Pa air. However, the plasma density increases continually in air pressure of 10 Pa when the power energy is increased to 7.68 kJ. Moreover, when the working gas is replaced with argon and discharge setting is 4.0 Pa pressure and 1.08 kJ applied power energy, the plasma density decreases continually in the transport process. The distinct behaviors, as analyzed, are mainly caused by plasma energy transformation difference in the transport process. As it is known, the plasma movement at high velocity in coaxial guns can ionize neutral particles and consume its energy, which results in the increasing plasma density and the decreasing electron and ion temperatures in the transport process. Then, a maximum density is present in the transport process when the electron and ion temperatures are lower than that at which gas ionization occurs. The axial location of maximum density changes with applied power energy, working gas pressure and species, which means that plasma energy transformation and density change properties in transport process strongly rely on different external parameters. The study provides some insight into how to better apply the coaxial gun discharge plasma to practical engineering field.

Keywords: coaxial gun, plasma density, Stark broadening

PACS: 52.80.Vp, 94.20.Fg, 32.60.+i

DOI: 10.7498/aps.66.055203

[†] Corresponding author. E-mail: rchsh@dlut.edu.cn