

辅助放电下刷状空气等离子体羽的 放电特性和参数诊断*

张雪雪¹⁾ 贾鹏英¹⁾ 冉俊霞¹⁾ 李金懋¹⁾²⁾ 孙换霞¹⁾ 李雪辰^{1)†}

1) (河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

2) (黑龙江工业学院电气与信息工程学院, 鸡西 158100)

(2023年12月10日收到; 2024年2月5日收到修改稿)

大气压等离子体射流 (APPJ) 能产生富含活性粒子的等离子体羽, 在众多领域具有广泛的应用前景. 从应用角度考虑, 如何产生大尺度弥散等离子体羽是 APPJ 研究的热点之一. 目前, 利用惰性气体 APPJ 已经能产生令人满意的大尺度等离子体羽, 但从经济性上考虑, 如何产生大尺度空气等离子体羽更具有应用价值. 针对于此, 本工作设计了一个具有辅助放电的 APPJ, 产生了大尺度刷形空气等离子体羽. 结果表明, 刷状空气等离子体羽可以在一定电压峰值 (V_p) 内产生, 并且随着 V_p 增大等离子体羽的长度和发光强度都增大. 电压和发光信号波形表明, 每半个电压周期最多会有一次放电. 每半个电压周期的放电概率和光脉冲的强度都随着 V_p 增大而增大, 但放电起始时刻的电压值会随着 V_p 增大而降低. 高速影像研究表明弥散刷形空气等离子体羽和小尺度空气等离子体羽的产生机制类似, 均源于分叉正流光的时间叠加. 此外, 采集了刷形空气等离子体羽的发射光谱, 并利用其对放电的电子温度、电子密度、分子振动温度和气体温度进行了研究. 结果表明, 等离子体羽的气体温度较低, 且基本不随 V_p 变化. 然而电子密度、电子温度和分子振动温度均随着 V_p 增大而升高. 利用激光诱导荧光光谱技术研究了等离子体羽的 OH 浓度, 发现 OH 分布较为均匀, 且其浓度随着 V_p 增大而增大. 最后, 对这些变化规律进行定性分析.

关键词: 等离子体射流, 空气等离子体羽, 发射光谱, 等离子体参数

PACS: 52.30.-q, 52.70.Kz, 52.80.Mg

DOI: 10.7498/aps.73.20231946

1 引言

大气压等离子体射流 (APPJ) 能够在开放的空气环境中产生等离子体羽^[1], 实现等离子体产生区和应用区的分离, 因此避免了电极间隙对待处理材料尺度的限制. 此外, 等离子体羽中富含大量活性粒子^[2], 能引发一系列生物和化学反应. 因此 APPJ 在表面改性^[3-5]、材料生长^[6-9] 和等离子体医学^[10-12] 等领域具有广泛的应用前景.

APPJ 通常采用惰性气体作为工作气体^[13-19]. 例如, Lu 等^[20] 采用介质阻挡放电 (DBD) 结构的 APPJ 产生了 11 cm 长的氦气等离子体羽. 惰性气体等离子体羽通常直径较小 (约为毫米量级)^[21-23], 因此 APPJ 处理的面积也很小. 虽然通过多次扫描的方法可以增大 APPJ 的处理面积, 但其代价是增大了处理时间, 并且也很难保证等离子体处理的均匀性. 为了实现大面积材料的快速处理, 需要产生具有较大横向尺度的等离子体羽^[24]. Fang 等^[25] 将氩气 APPJ 组成阵列来增大等离子体羽的

* 国家自然科学基金 (批准号: 12375250, 11875121, 51977057, 11805013)、河北省自然科学基金 (批准号: A2023201012, A2020201025, A2022201036) 和黑龙江省省属本科高校基本科研业务费 (批准号: 2022-KYYWF-0475) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: plasmalab@126.com

空间尺度, 但等离子体羽之间会相互作用使等离子体羽相互分离, 甚至使其中一些熄灭^[26]. 因此, 利用 APPJ 阵列的方法无法产生均匀的大尺度等离子体羽. Wang 等^[27] 采用三电极结构的 APPJ 产生了直径为 20 mm 的氩气等离子体. Jia 等^[28] 也利用一种三电极结构的放电装置, 产生了 50 mm × 40 mm 的刷状氩气等离子体. 以上利用三电极装置产生的等离子体被限制在电极之间, 不能算真正意义上的等离子体羽. 目前, 利用 DBD 结构或者裸针电极的放电装置^[15,16,29-32], 在矩形截面气道的末端已经成功产生了刷状等离子体羽. 事实上, 这些等离子体羽处于丝状模式或者流光模式. 研究发现, 通过改变 APPJ 到矩形截面气道的距离, 刷状等离子体羽会从随机流光模式过渡到丝状模式^[33].

相比于惰性气体 APPJ 而言, 以经济性更好的空气作为工作气体, 则更具优势^[34]. 关于空气 APPJ, 国内外许多课题组已经对其放电特性进行了研究^[5,35-37], 相关进展可以参见 Lu 等^[38] 的综述文章. Wu 等^[35] 利用等离子体的余辉产生了刷状空气等离子体羽. 类似地, Yang 等^[39] 在空气中掺入四氟化碳从而在放电的余辉区实现了微生物的大面积灭活. 对于这种通过余辉产生的等离子体羽, 由于活性粒子主要在放电区产生, 因此导致等离子体羽中的活性粒子浓度偏低. 本课题组^[40] 利用 APPJ 的相互作用, 产生了近室温的刷状空气等离子体羽, 但该 APPJ 仍需要一定量的氩气. 由于空气的击穿电场较高, 放电消耗的功率很大, 这使得空气等离子体羽的气体温度通常较高^[34,41,42]. 例如, 在丝状模式下刷状空气等离子体羽的气体温度会超过 1300 K^[41]. Lu 等^[43] 利用旋转电极产生了一种刷状空气等离子体羽, 但采用光谱拟合方法获得的气体温度约为 3000 K.

本文设计了一种多电极的放电装置, 在上游 DBD 帮助下, 在下游区域产生了一种气体温度很低的刷状空气等离子体羽. 利用高速摄像、光电测量和发射光谱等方法, 对该刷状空气等离子体羽的放电特性和等离子体参数进行研究.

2 实验装置

图 1 是实验装置示意图. 用石英玻璃 (厚度为 1.0 mm) 围成一个具有矩形截面的气道 (内截面为 15.0 mm × 2.0 mm). 通过流量计 (LZB-10WB)

控制气道中空气流量 (Q) 为 40 L/min. 在距离气道口 20.0 mm 处在气道外侧粘贴两个平行相对的铜箔电极 (25.0 mm × 20.0 mm), 其中一个铜箔与正弦交流电源 (Suman CTP-2000 K, 中心频率为 70.0 kHz) 的高压输出端相连, 另一个铜箔接地. 显然, 这两个铜箔与中间的石英板形成了一种 DBD 结构, 在适当的电压下可以激发气道内的空气放电. 在气道出口两侧放置两个平行正对的钨针 (直径为 1.0 mm, 尖端半径为 0.1 mm). 两针相距 15 mm, 其中一个接地, 另一个连接电源的高压输出端. 输出端的电压 (称为外加电压) 通过高压探头 (Tektronix P6015A) 测量. 放电的发光信号由石英透镜聚焦后通过光电倍增管 (PMT) (ET 9130/100B) 收集. 外加电压和发光信号的波形均通过示波器 (Tektronix DPO4104) 显示和记录. 使用数码相机 (Canon EOS 5 D) 和增强型电荷耦合设备 (ICCD) (Andor DH334 T) 拍摄放电照片. 利用与 Wu 等^[44] 类似的方法, 实现 ICCD 和放电的同步触发. 同步触发方法简述如下, 利用自制的触发器将激励 APPJ 的正弦信号转换为与之同步的晶体管逻辑 (transistor-transistor logic, TTL) 信号, 用于触发 ICCD 和示波器. 由于放电时刻相对于激励电压存在一定抖动, 为了实现 ICCD 快门和放电的精确同步, 将 TTL 和放电发光信号同时输入示波器, 通过调节 ICCD 的延迟时间在示波器上可以获得 ICCD 相对于放电的曝光时刻. 此外, 放电的发光信号经透镜汇聚后, 通过光纤 (PI LG-455-020-1) 传入光谱仪 (PI ACTON SP2750) 的入射狭缝 (宽度 50 μm), 经 1200 刻线的光栅分光后, 利用电脑采集放电的发射光谱. 为了获得具有较好信噪比的发射光谱, 光谱仪的积分时间设为 5 s, 所以光谱诊断是整个放电过程的平均结果.

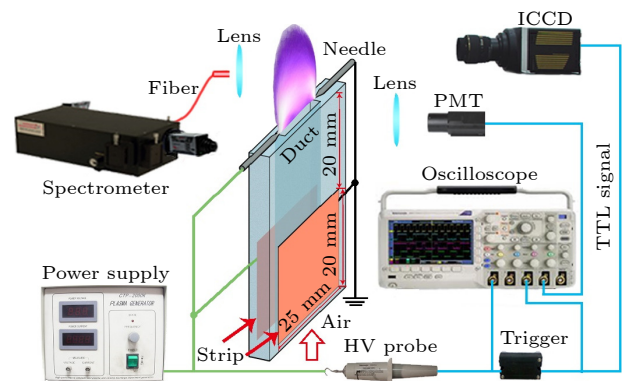


图 1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

采用激光诱导荧光系统 (Laser induced fluorescence, LIF) 对等离子体羽中 OH 分布进行了诊断. 激光系统主要包含 Nd: YAG 激光器 (Nimma-900) 和染料激光器 (Narrow Scan K). 激光系统产生单脉冲能量 0.5 mJ, 脉宽 10 ns 的 282.78 nm 脉冲激光, 激发 OH 后荧光信号由装配有 308 nm 滤波片的 ICCD (中智科仪 EyeITS-D-HQB-F) 记录. 由于激光器最高工作频率是 10 Hz. 而放电驱动频率为 70 kHz. 因此. 利用自制触发器将 70 kHz 的正弦电压信号转换为同步的 TTL 信号, 该信号输入信号发生器 (Tektronix AFG3052 C) 后利用其 Burst 功能, 产生 10 Hz 的分频信号, 用于触发激光器和 ICCD. 通过设置时序控制器 (中智科仪 D400) 及 ICCD 的时间延迟. 实现采集系统和激光系统的同步 [45]. 由于放电时刻具有一定抖动. 所以将激光的入射时刻设置在放电结束后 2 μ s, 以确保激光脉冲对放电等离子体不会产生影响. 由于 ICCD 曝光时间为 100 ns, 单发激光脉冲所产生的 LIF 强度很弱. 实验中通过叠加 3000 次激光脉冲来拍摄 LIF 照片.

3 结果与讨论

当外加电压峰值 (V_p) 增大到约 8.5 kV, 上游会产生 DBD. 由于两针间隙很大, 此时喷口附近还不能产生放电. 继续增大 V_p 到约 9.0 kV, 两针间的电场达到击穿阈值, 在喷口的下游形成一个刷状等离子羽, 如图 2 所示. 为了方便描述, 沿着两针的连线建立 x 轴, 沿气流方向建立 y 轴, 坐标原点位于针尖连线的中点 (图 2(a)). 从图 2 可以发现, 弥散的等离子体羽呈现紫色, 并且针尖附近发光最亮. 进一步增大 V_p , 刷状等离子体羽变得更长更亮. 当 $V_p = 14.0$ kV 时刷状等离子体羽的面积达到了 15.0 mm \times 12.7 mm. 在此基础上如果进一步增大 V_p , 放电面积将会缩小, 产生气体温度很高的等离子体羽 [41], 因此 V_p 高于 14.0 kV 不是本文的研究范围. 需要指出的是, 如果没有铜箔电极 (即没有 DBD), 则等离子体羽的击穿电压会很高, 且击穿后只能产生气体温度很高的等离子体羽. 可见, DBD 在较低温度刷状等离子体羽产生中发挥着重要作用. 我们推测上游区域的 DBD 会产生一些长寿命的活性粒子, 例如单线态氧 $O_2(a^1\Delta_g)$ [46], NO_2^- , NO_3^- 和 OH^- 等负离子 [47], 及 $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ 和

$N_2(a^1\Pi_g)$ 等氮的亚稳态粒子 [48]. 这些长寿命的活性粒子随气流运动到下游区域, 通过反应可能释放种子电子, 从而会降低针电极间放电的击穿电场. 击穿电场的降低, 有助于降低放电的气体温度.

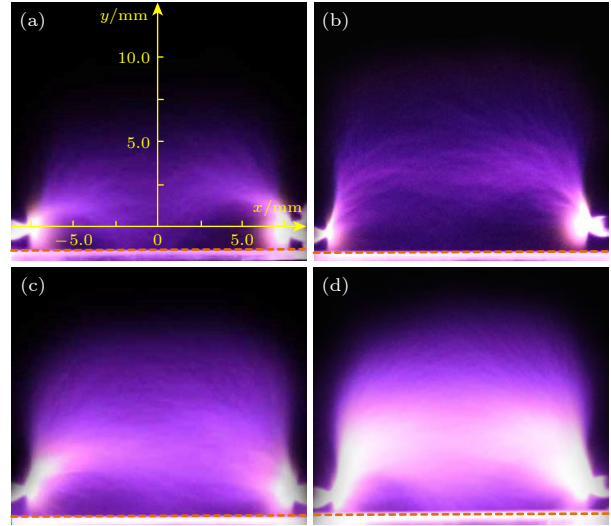


图 2 曝光时间 (t_{exp}) 为 0.5 s, 不同 V_p 下等离子体羽的照片 (a) 9.0 kV; (b) 10.8 kV; (c) 12.4 kV; (d) 14.0 kV

Fig. 2. Images of the plasma plume under different V_p with an exposure time (t_{exp}) of 0.5 s: (a) 9.0 kV; (b) 10.8 kV; (c) 12.4 kV; (d) 14.0 kV.

图 3 给出了刷状等离子体羽对应的外加电压和发光信号的波形. 可以看出, 当 V_p 较低时在外加电压的峰值或谷值附近可能会出现一个发光脉冲 (对应一次放电过程), 光脉冲的持续时间约为 260 ns. 放电在时间上是较为随机的, 即有的电压半周期出现一次放电, 而有的半周期是没有放电的. 随着 V_p 的增大, 每半个电压周期中放电脉冲的出现概率增大, 但最多也就是每半个电压周期出现一个放电脉冲. 定义放电时刻对应的外加电压值为起始电压 (V_{inc}), 通过图 3 可以看出, 随着 V_p 增大 V_{inc} 降低, 且发光脉冲的强度增大.

图 4(a) 给出了 V_{inc} 随 V_p 的变化情况, 从图中可以看出随着 V_p 增大, V_{inc} 逐渐减小. 图 4(b) 给出了发光脉冲强度和每半个电压周期内放电概率随 V_p 的变化关系, 其中每个数据点是采集 600 个电压周期的统计结果. 可以看出每半个电压周期的放电概率和平均光脉冲强度都随着 V_p 的增大而增大. 在 V_p 达到 14.0 kV 时 每半个电压周期放电概率达到最大值 (约为 1), 且平均发光脉冲强度也达到最大值. 如前所述, DBD 产生的长寿命活性粒子会降低下游的击穿电场. 当 V_p 增大时 DBD 增强,

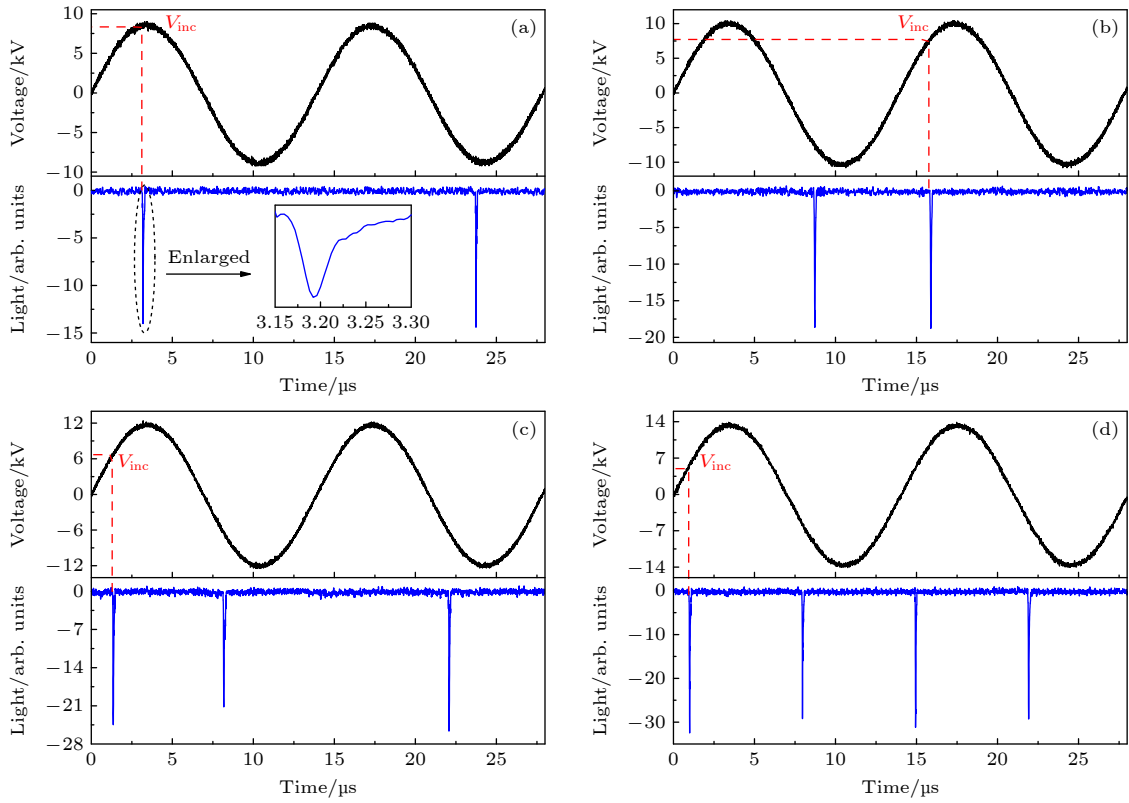


图 3 外加电压和发光信号的波形, (a)–(d) 分别对应图 2(a)–(d)

Fig. 3. Waveforms of applied voltage and light emission signal from the plasma plume, (a)–(d) correspond to Fig. 2(a)–(d), respectively.

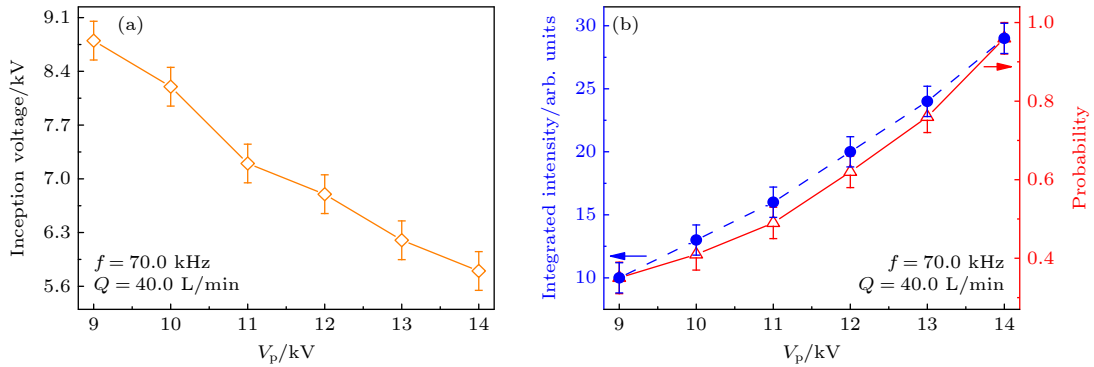


图 4 (a) V_{inc} 随 V_p 的变化关系; (b) 平均发光脉冲强度和每半个电压周期内放电概率随 V_p 的变化关系

Fig. 4. (a) V_{inc} as a function of V_p ; (b) average pulse intensity and probability per voltage half cycle as functions of V_p .

意味着产生了更多的长寿命活性粒子. 在更多活性粒子的帮助下, 下游区域的击穿电场会减小, 因此导致 V_{inc} 降低. 即 V_{inc} 随着 V_p 的增大而降低. 此外, 当 V_{inc} 减小时, 每半个电压周期满足放电条件的的时间跨度 ($2\Delta t$, 其中 Δt 表示从起始电压到峰值电压的时间间隔) 会增大. 由于流光放电的随机性, 放电在该时间跨度内的某个时刻随机出现, 因此该时间跨度增大, 则意味着每半个电压周期内的放电概率增大. 即每半个电压周期内的放电概率会随

着 V_p 增大而增大.

图 5 给出了不同 t_{exp} 下等离子体羽的 ICCD 照片. 可以看出, 当 t_{exp} 较长时放电是均匀弥散的. 随着 t_{exp} 降低到 1.0 ms, 放电呈现出均匀性. 进一步降低 t_{exp} 到 0.1 ms 可以看出放电是由一些微放电丝构成的. 当 t_{exp} 降低到一个光脉冲的持续时间 (约 260 ns), 放电仅为一个分叉的丝状微放电, 该丝状放电连接了瞬时阴极和瞬时阳极, 我们推测该丝状微放电对应着分叉流光的传播过程. 对比

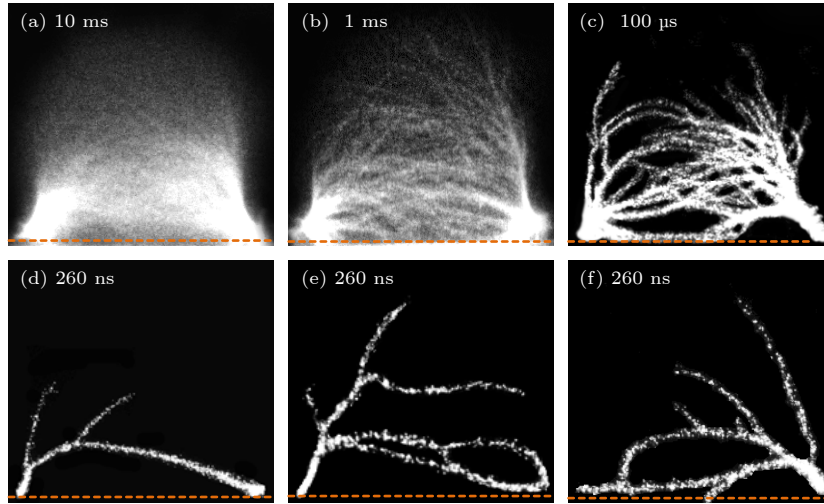

 图 5 不同 t_{exp} 下等离子体羽的 ICCD 图像, V_p 为 14.0 kV

 Fig. 5. ICCD images of the plasma plume with varying t_{exp} , V_p is 14.0 kV.

图 5(d)–(f) 可知, 不同流光在分叉数目和分叉长度上都是随机的. 由于每个流光对应着一次放电过程, 这说明每次放电产生的分叉数量和流光传播总长度都是随机的. 总之, 视觉上弥散的刷状等离子体羽对应着随机分叉流光的传播过程. 这些流光的轨迹在空间是随机出现的, 时间叠加后产生了视觉上弥散的等离子体羽. 这和小尺度空气弥散等离子体羽的产生机制是类似的^[49].

由于针电极尖端附近电场强度是最大的, 高的电场强度会导致针电极附近具有大的 α 系数 (汤森第一电离系数)^[50]. 因此, 在一次放电过程中, 针电极附近最先产生电子雪崩 (初始电子雪崩). 考虑作瞬时阳极的针电极, 由于电子和离子迁移速度的巨大差异, 初始电子雪崩中的电子很快进入针尖, 从而在针尖附近遗留下空间正电荷层. 空间正电荷层会增强针阳极前方的电场, 因此二次电子雪崩最有可能在空间正电荷层的前方产生. 在电场作用下, 二次电子雪崩中的电子会向着空间正电荷层传播, 并中和空间正电荷层的离子. 二次电子雪崩会在其轨迹上遗留下正电荷, 形成新的空间正电荷层. 这导致空间正电荷层 (流光头) 会从瞬时阳极出发后向着瞬时阴极传播^[51]. 在流光传播过程中, 引发二次电子雪崩的初始电子 (种子电子) 可能来源于 DBD 提供的长寿命活性粒子, 也可能来自于光电离. 由于活性粒子和光电子分布的随机性, 导致流光头前方可能同时产生两个或者多个二次电子雪崩, 所以流光在向着瞬时阴极传播的过程中会发生随机分叉.

图 6 给出了等离子体羽在 300–800 nm 范围内的发射光谱, 主要包括 OH ($A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$)、 $N_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g)$ 、 $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+)$ 、 $N_2(B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+)$ 以及 O I ($3p^5P \rightarrow 3s^5S$) 的谱线^[42,52]. 其中 OH 的谱线是由于电子与空气中的水分子碰撞产生的. 碰撞-辐射模型表明电子密度和电子温度分别正相关于谱线 371 nm/380 nm 和 391 nm/380 nm 的强度比^[53]. 图 7 给出了相关谱线强度比随 V_p 的变化关系. 可以看出, 随着 V_p 增大电子密度和电子温度呈上升趋势. 此外, 利用 Lifbase 软件拟合 N_2^+ 的第一负带系 ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$) 光谱可以得到分子转动温度, 其近似等于气体温度 (T_g)^[54,55]. 振动温度 (T_v) 可以通过 N_2 的第二正带系光谱获得^[52,56]. 图 8(a), (b) 给出了 T_g 和 T_v 的拟合图. T_g 和 T_v 随 V_p 的变化关系, 如图 8(c), (d) 所示. 可见刷状空气等离子体羽的 T_g 基本不随 V_p 变化, 约为 437 K, 远低于文献^[41, 43] 报道的刷状空气等

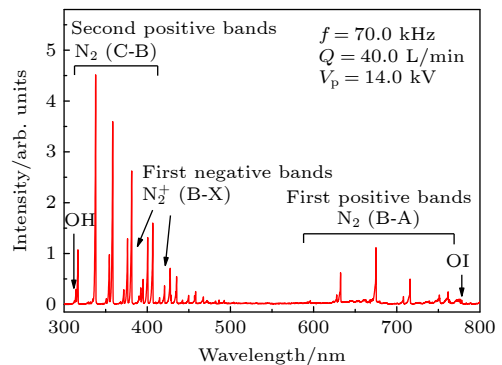


图 6 等离子体羽的总发射光谱

Fig. 6. Optical emission spectrum of the plasma plume.

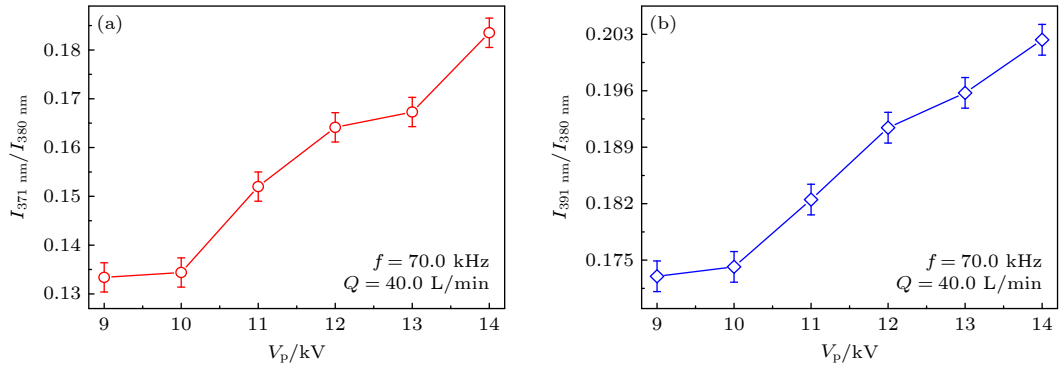

 图 7 谱线强度比 $I_{371 \text{ nm}}/I_{380 \text{ nm}}$ (a) 与 $I_{391 \text{ nm}}/I_{380 \text{ nm}}$ (b) 随 V_p 的变化关系

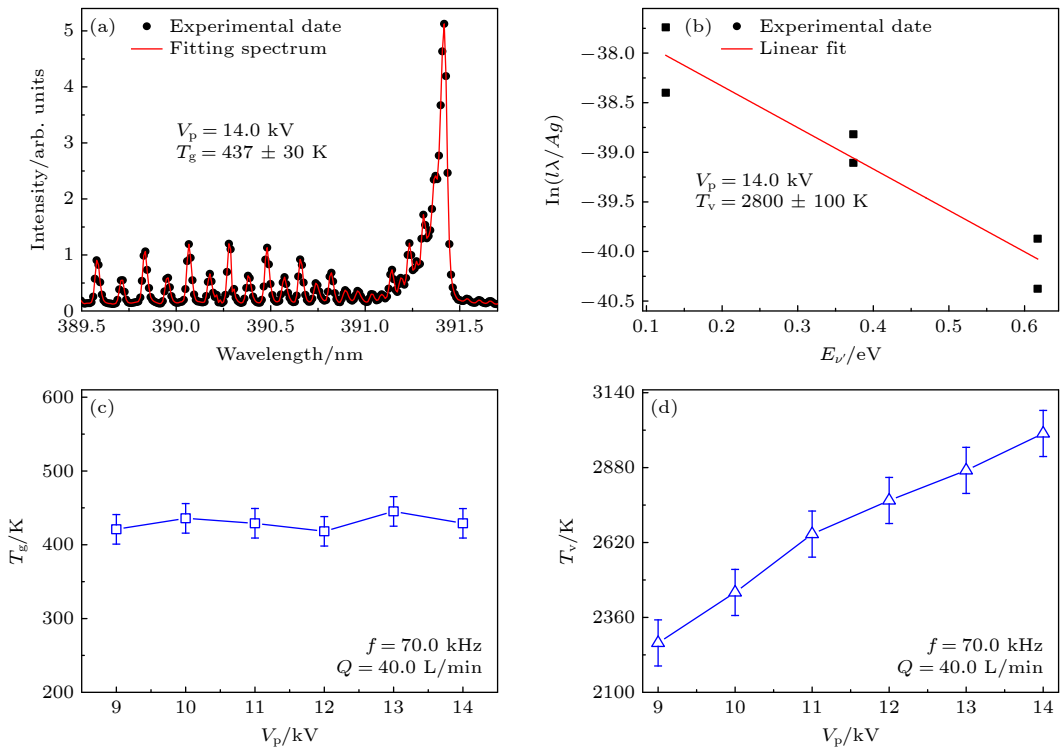
 Fig. 7. Line intensity ratios of $I_{371 \text{ nm}}/I_{380 \text{ nm}}$ (a) and $I_{391 \text{ nm}}/I_{380 \text{ nm}}$ (b) as functions of V_p .

 图 8 T_g (a) 和 T_v (b) 的拟合图, T_g (c) 和 T_v (d) 随 V_p 的变化关系

 Fig. 8. A fitting process to calculate T_g (a) and T_v (b); T_g (c) and T_v (d) as functions of V_p .

离子体羽的气体温度. T_v 与电子密度和电子温度的变化趋势类似, 随着 V_p 增大呈上升趋势.

等离子体参数随 V_p 的变化关系可以定性解释如下. 如前所述, 随着 V_p 增大 DBD 会为下游区域产生更多的长寿命活性粒子, 这些活性粒子能增大 α 系数. 这意味着流光发展过程中二次电子雪崩会产生更多电子, 因此导致电子密度随着 V_p 增大而上升. 随着电子密度增大, 二次电子雪崩遗留的正离子也增多, 即空间正电荷层 (流光头) 的电荷量会随着 V_p 增大而增大. 流光在低外场传播过程中电场主要由流光头的电荷量决定 [51]. 因此, 电场会

随着 V_p 增大而变强. 在气压恒定的情况下, 电子温度主要由电场决定, 这意味着电子温度也会随着 V_p 增大而升高. 此外, 电子温度升高, 平均电子能量增大, 这意味着电子能更有效地激发更高的振动能级 [57], 因此导致 T_v 随 V_p 增大而升高. 虽然电子温度和电子密度随着 V_p 增大都升高, 但考虑到流光的持续时间非常短 (只有约 260 ns), 这导致电子没有足够的时间将能量有效地传递给气体分子, 因此等离子体羽的 T_g 较低, 且基本不随 V_p 变化.

如前所述, 随 V_p 增大放电电场会增强, 这在定向流光传播中可以导致流光可以传播更远的距

离^[28]. 在分叉流光传播中, 随着电场的增大, 流光头前方会有更多的种子电子, 从而引发更多的分叉. 此外, 随 V_p 增大电子密度增大, 导致中性粒子的激发更剧烈. 因此, 等离子体羽的发光强度随着 V_p 增大而增大 (图 2).

利用 LIF 对 OH 的空间分布进行了诊断, 如图 9 所示. 由于 OH 的寿命在 ms 量级^[58], 图中 LIF 照片为多次放电叠加的结果. 从图中可以发现 LIF 亮度是较为均匀的, 这说明刷形等离子体羽中 OH 的分布是比较均匀的. 随着 V_p 增大 LIF 的亮度逐渐增大, 表明 OH 的浓度随着 V_p 增大而增大. 如前所述, 随着 V_p 的增大, 等离子体羽的电子温度和电子密度都增大, 这导致电子碰撞引发水分子的离解会增多, 因此等离子体羽中 OH 浓度会随着 V_p 的增大而增大.

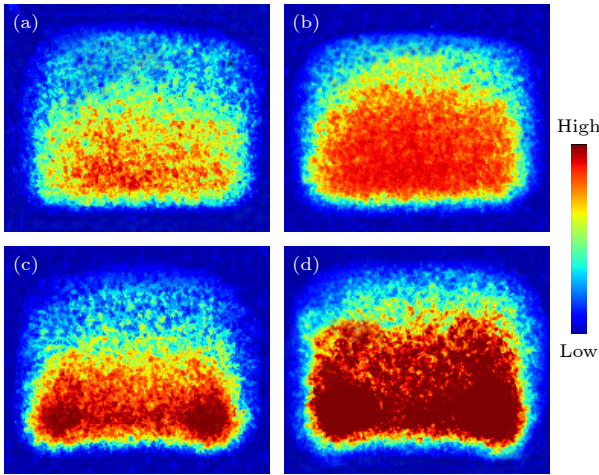


图 9 不同 V_p 下等离子体羽的 LIF 照片 (a) 9.0 kV; (b) 10.8 kV; (c) 12.4 kV; (d) 14.0 kV

Fig. 9. Images of laser induced fluorescence under different V_p : (a) 9.0 kV; (b) 10.8 kV; (c) 12.4 kV; (d) 14.0 kV.

4 结 论

利用上游辅助 DBD 在 70 kHz 正弦交流激励下在针-针电极 APPJ 下游产生了面积约为 $15.0 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 的空气等离子体羽, 其 T_g 约为 437 K, 远低于文献报道的刷形空气等离子体羽的气体温度. 随着 V_p 增大, 刷形等离子体羽的长度和发光强度都增大. 在外加电压的半个周期内, 最多会有一次放电, 并且每半个电压周期的放电概率和放电脉冲强度均随着 V_p 增大而增大. 此外, 起始电压随着 V_p 的增大而降低. 利用 ICCD 研究

表明视觉上弥散的等离子体羽, 来自于分叉正流光的时间叠加. 等离子体参数诊断结果表明, 随着 V_p 增大等离子体羽的电子密度、电子温度和 T_v 均呈上升趋势, 但 T_g 基本保持不变. LIF 诊断结果表明, 刷形等离子体羽中 OH 分布较为均匀, 且其浓度随着 V_p 的增大而增大. 这些研究结果对于 APPJ 的工业应用具有一定的指导意义.

参考文献

- [1] Naidis G V, Sosnin E A, Panarin V A, Skakun V S, Tarasenko V F 2016 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44** 3249
- [2] Reuter S, Von Woedtke T, Weltmann K D 2018 *J. Phys. D Appl. Phys.* **51** 233001
- [3] Li X C, Liu R J, Li X N, Gao K, Wu J C, Gong D D, Jia P Y 2019 *Phys. Plasmas* **26** 023510
- [4] Chen S L, Cheng T, Chen Z Q, Chen X Y, Zhang G J 2021 *Appl. Surf. Sci.* **544** 148956
- [5] Jia P Y, Jia H X, Ran J X, Wu K Y, Wu J C, Pang X X, Li X C 2023 *Chin. Phys. B* **32** 085202
- [6] Gangal U, Exarhos S, Contreras T, Rich C C, Dolan K, Yang V, Frontiera R R, Bruggeman P 2022 *Plasma Process. Polym.* **19** e2200031
- [7] Xuan L T Q, Nguyen L N, Dao N T 2021 *Nanotechnol.* **33** 105603
- [8] Ning W, Dai D, Zhang Y H 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 054104
- [9] Satale V V, Ganesh V, Dey A, Krishnamurthy S, Bhat S V 2021 *Int. J. Hydrogen Energy* **46** 12715
- [10] Liu D W, Zhang Y Z, Xu M Y, Chen H X, Lu X P, Ostrikov K K 2020 *Plasma Process. Polym.* **17** e1900218
- [11] Xu Z M, Lan Y, Ma J, Shen J, Han W, Hu S H, Ye C B, Xi W H, Zhang Y D, Yang C J, Zhao X, Cheng C 2020 *Plasma Sci. Technol.* **22** 103001
- [12] Lata S, Chakravorty S, Mitra T, Pradhan P K, Mohanty S, Patel P, Jha E, Panda P K, Verma S K, Suar M 2022 *Mater. Today Bio.* **13** 100200
- [13] Shashurin A, Keidar M, Bronnikov S, Jurjus R A, Stepp M A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 181501
- [14] Duan Y X, Huang C, Yu Q S 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 015104
- [15] Li X C, Chu J D, Zhang Q, Zhang P P, Jia P Y, Geng J L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 204102
- [16] Li X C, Chu J D, Jia P Y, Li Y R, Wang B, Dong L F 2018 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **46** 583
- [17] Urabe K, Sands B L, Ganguly B N, Sakai O 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** 034004
- [18] Babaeva N Y, Naidis G V, Tereshonok D V, Zhang C, Huang B D, Shao T 2021 *Plasma Sources Sci. Technol.* **30** 115021
- [19] Chen J Y, Zhao N, Wu J C, Wu K Y, Zhang F R, Ran J X, Jia P Y, Pang X X, Li X C 2022 *Chin. Phys. B* **31** 065205
- [20] Lu X P, Jiang Z H, Xiong Q, Tang Z, Hu X, Pan Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 081502
- [21] Darny T, Bauville G, Fleury M, Pasquiers S, Sousa J S 2021 *Plasma Sources Sci. Technol.* **30** 105021
- [22] Matsusaka S 2019 *Adv. Powder Technol.* **30** 2851
- [23] Duan Z C, Li P Z, He F, Han R Y, Ouyang J T 2021 *Plasma Sources Sci. Technol.* **30** 025001
- [24] Li Q, Li J T, Zhu W C, Zhu X M, Pu Y K 2009 *Appl. Phys.*

- Lett.* **95** 141502
- [25] Liu Z Y, Xu J G, Zhu X, Liu F, Fang Z 2022 *High Volt.* **7** 771
- [26] Cao Z, Nie Q, Bayliss D L, Walsh J L, Ren C S, Wang D Z, Kong M G 2010 *Plasma Sources Sci. Technol.* **19** 025003
- [27] Wang S M, Zhang J L, Li G F, Wang D Z 2014 *Vacuum* **101** 317
- [28] Yang L J, Song C H, Zhao N, Zhou S, Wu J C, Jia P Y 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 155201 (in Chinese) [杨丽君, 宋彩虹, 赵娜, 周帅, 武珈存, 贾鹏英 2021 *物理学报* **70** 155201]
- [29] Li Q, Takana H, Pu Y K, Nishiyama H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 241501
- [30] Li Q, Takana H, Pu Y K, Nishiyama H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 133501
- [31] Li X C, Chu J D, Zhang Q, Zhang P P, Jia P Y, Dong L F 2018 *Phys. Plasmas* **25** 043519
- [32] Tang J, Cao W Q, Zhao W, Wang Y S, Duan Y X 2012 *Phys. Plasmas* **19** 013501
- [33] Wu K Y, Liu J N, Wu J C, Chen M, Ran J X, Pang X X, Jia P Y, Li X C, Ren C H 2023 *High Volt.* **8** 1161
- [34] Kolb J F, Mohamed A A H, Price R O, Swanson R J, Bowman A, Chiavarini R L, Stacey M, Schoenbach K H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241501
- [35] Wu S Q, Liu X Y, Mao W H, Chen W, Liu C, Zhang C H 2018 *J. Appl. Phys.* **124** 243302
- [36] Liu K, Zhang X H, Zhou X F, Huo X M, Wang X H, Ostrikov K K 2022 *J. Phys. D Appl. Phys.* **55** 485202
- [37] Liu K, Hu H, Lei J, Hu Y, Zheng Z 2016 *Phys. Plasmas* **23** 123510
- [38] Lu X P, Liu D W, Xian Y B, Nie L L, Cao Y G, He G Y 2021 *Phys. Plasmas* **28** 100501
- [39] Yang Y W, Wu J Y, Chiang M H, Wu J S 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 3003
- [40] Li X C, Wu J C, Jia B Y, Wu K Y, Kang P C, Zhang F R, Zhao N, Jia P Y, Wang L, Li S Z 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 134102
- [41] Li X C, Bao W T, Chu J D, Zhang P P, Jia P Y 2015 *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** 065020
- [42] Li X C, Wu K Y, Liu R J, Yang L W, Geng J L, Wang B, Jia P Y 2019 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47** 1330
- [43] Li Z, Liu J, Lu X 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 045015
- [44] Wu J C, Jia P Y, Ran J X, Chen J Y, Zhang F R, Wu K Y, Zhao N, Ren C H, Yin Z Q, Li X C 2021 *Phys. Plasmas* **28** 073501
- [45] Lu X P, Wu F, Li J Y 2021 *High Voltage Eng.* **47** 1831 (in Chinese) [卢新培, 吴帆, 李嘉胤 2021 *高电压技术* **47** 1831]
- [46] Jiang J K, Gonzalvo Y A, Bruggeman P J 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29** 045023
- [47] Darny T, Pouvesle J M, Fontane J, Joly L, Dozias S, Robert E 2017 *Plasma Sources Sci. Technol.* **26** 105001
- [48] Lichten W 1957 *J. Chem. Phys.* **26** 306
- [49] Akishev Y, Aponin G, Petryakov A, Trushkin N 2018 *J. Phys. D Appl. Phys.* **51** 274006
- [50] Yuri R P 1991 *Gas Discharge Physics* (New York: Springer-Verlag) pp53–60
- [51] Lu X P, Laroussi M 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 063302
- [52] Wu J C, Li X C, Ran J X, Jia H X, Wu K Y, Han G X, Liu J N, Chen J Y, Pang X X, Jia P Y 2023 *Plasma Process. Polym.* **20** e2200188
- [53] Wu K Y, Zhao N, Niu Q M, Wu J C, Zhou S, Jia P Y, Li X C 2022 *Plasma Sci. Technol.* **24** 055405
- [54] Belmonte T, Noël C, Gries T, Martin J, Henrion G 2015 *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** 064003
- [55] Li X C, Zhou S, Gao K, Ran J X, Wu K Y, Jia P Y 2022 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **50** 1717
- [56] Ran J X, Zhang X X, Zhang Y, Wu K Y, Zhao N, He X R, Dai X H, Liang Q H, Li X C 2023 *Plasma Sci. Technol.* **25** 055403
- [57] Masoud N, Martus K, Figus M, Becker K 2005 *Contrib. Plasma Phys.* **45** 32
- [58] Yue Y F, Wu F, Cheng H, Xian Y B, Liu D W, Lu X P, Pei X K 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 033302

Discharge characteristics and parameter diagnosis of brush-shaped air plasma plumes under auxiliary discharge*

Zhang Xue-Xue¹⁾ Jia Peng-Ying¹⁾ Ran Jun-Xia¹⁾ Li Jin-Mao¹⁾²⁾
Sun Huan-Xia¹⁾ Li Xue-Chen^{1)†}

1) (*College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China*)

2) (*School of Electrical and Information Engineering, Heilongjiang University of Technology, Jixi 158100, China*)

(Received 10 December 2023; revised manuscript received 5 February 2024)

Abstract

Atmospheric pressure plasma jet (APPJ) can produce plasma plumes rich in active species, which has a wide scope of applications. From the perspective of applications, it is one of the hot issues in APPJ research to generate a diffuse plasma plume on a large scale. At present, large-scale plasma plume has been produced by noble working gases, which is more economic and valuable if it is reproduced by air used as the working gas. In this work, an APPJ with an auxiliary discharge is proposed, with which a large-scale air plasma plume with a brush shape is produced. Results indicate that the brush-shaped air plume can exist by changing voltage amplitude (V_p) in a certain range. The length and brightness of the plasma plume increase with V_p increasing. The waveforms of voltage and light emission signal indicate that the discharge can start at most once within half a cycle of applied voltage. The probability of discharge and the intensity of light emission pulse for each half a voltage cycle increase with V_p increasing, but the voltage value at the discharge moment decreases with V_p increasing. High-speed imaging study shows that the generation mechanisms of diffuse brush-shaped air plasma plumes and small-scale air plasma are similar, both originating from the temporal superposition of bifurcated normal flow light. In addition, optical emission spectra from the brush-shaped air plasma plume are utilized to study electron temperature, electron density, molecular vibrational temperature, and gas temperature. With V_p increasing, gas temperature is low and almost unchanged, while electron density, electron temperature, and molecular vibrational temperature increase. In addition, OH concentration of the plasma plume is investigated by laser-induced fluorescence, indicating that OH is uniformly distributed, and its concentration increases with the V_p increasing. All these results mentioned above are qualitatively analyzed.

Keywords: plasma jet, air plasma plume, optical emission spectrum, plasma parameters

PACS: 52.30.-q, 52.70.Kz, 52.80.Mg

DOI: [10.7498/aps.73.20231946](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231946)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12375250, 11875121, 51977057, 11805013), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. A2023201012, A2020201025, A2022201036), and the Fundamental Research Funds for the Undergraduate Universities in Heilongjiang Province, China (Grant No. 2022-KYYWF-0475).

† Corresponding author. E-mail: plasmalab@126.com



辅助放电下刷状空气等离子体羽的放电特性和参数诊断

张雪雪 贾鹏英 冉俊霞 李金懋 孙换霞 李雪辰

Discharge characteristics and parameter diagnosis of brush-shaped air plasma plumes under auxiliary discharge

Zhang Xue-Xue Jia Peng-Ying Ran Jun-Xia Li Jin-Mao Sun Huan-Xia Li Xue-Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 085201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231946

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231946>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气压氩气刷形等离子体羽的特性研究

Discharge characteristics of argon brush plasma plume operated at atmospheric pressure

物理学报. 2021, 70(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202091>

13.56 MHz/2 MHz柱状感性耦合等离子体参数的对比研究

Experimental investigation of plasma parameters in 13.56 MHz/2 MHz cylindrical inductively coupled plasma

物理学报. 2019, 68(10): 105202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190071>

激光等离子体射流驱动亚毫米直径铝飞片及姿态诊断

Laser-plasma jet driven sub-millimeter diameter aluminum flyer and its gesture diagnosis

物理学报. 2022, 71(9): 095201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212136>

纵磁作用下真空电弧单阴极斑点等离子体射流三维混合模拟

Three-dimensional hybrid simulation of single cathode spot vacuum arc plasma jet under axial magnetic field

物理学报. 2021, 70(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201701>

大气压脉冲放电等离子体射流特性及机理研究

Discharge characteristics and mechanism of plasma plume generated by atmospheric pulsed discharge

物理学报. 2021, 70(9): 095202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202246>

高压氩气辉光放电条纹等离子体的形成和演化

Formation and evolution of striation plasma in high-pressure argon glow discharge

物理学报. 2022, 71(14): 145201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212394>